

انتخاب تابع موجک مناسب در تشخیص خرابی ساختمان پیش‌ساخته‌ی پانلی مبتنی بر نتایج آزمایشگاهی و روش عددی

Original Article

مجیدی حنطه (دانشجوی دکتری)

امید رضایی فر* (دانشیار)

مجید قلهکی (استاد)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

بیشتر سازه‌های عمرانی به مرور زمان و تحت شرایط محیطی و بارهای خارجی دچار آسیب می‌شوند و همواره وقوع خرابی امری اجتناب‌ناپذیر است. لذا تشخیص آسیب، موضوع بسیاری از مطالعات بوده است. در این زمینه، تبدیل موجک که یک ابزار ریاضی توانمند پردازش سیگنال است، در حوزه‌ی پایش سلامت، نظر بسیاری از پژوهشگران را به خود جلب کرده است. پژوهش حاضر به پایش سلامت ساختمان پیش‌ساخته‌ی پانلی کامل بر مبنای نتایج آزمایشگاهی و به کمک روش تبدیل موجک پیوسته پرداخته است و آسیب‌هایی که ممکن است در سازه‌های مذکور رخ دهند، ارزیابی شده است. با توجه به نتایج آزمایشگاهی و تحلیل نتایج توابع موجک مختلف، موقعیت خرابی به کمک تابع ۵ coif با پارامتر مقیاس ۸ با موفقیت شناسایی شده است. همچنین اثر مودهای بالاتر در نمایش شدت خرابی محسوس‌تر بوده است، به طوری که در مود پیمایشی سازه، بیشینه‌ی ضرایب موجک بزرگ‌تر و شدت خرابی بیشتر نمایان شده است.

mhenteh@semnan.ac.ir
orezayfar@semnan.ac.ir
mgholhaki@semnan.ac.ir

واژگان کلیدی: پانل سه‌بعدی، تبدیل موجک، پایش سلامت سازه، تشخیص خرابی، پردازش سیگنال.

۱. مقدمه و تاریخچه‌ی مطالعات

سازه‌ها بیشتر در معرض بارهای زلزله و باد، که گاهی بزرگ هم هستند، قرار دارند و در طول عمر خود ممکن است لرزش‌های جدی تجربه کنند، که می‌توان آنها را از بی‌خطر تا شدید دسته‌بندی کرد. لرزش‌های شدید منجر به وارد شدن خسارت‌های جدی و گاهی فروریزش سازه می‌شوند. حفاظت از سلامت سازه‌ها و تشخیص آسیب در آنها با عنوان پایش سلامت سازه (SHM) مطرح است، که در حوزه‌های مختلف مهندسی، از جمله: مکانیک، هوافضا، عمران و همچنین پزشکی و اقتصاد جایگاه ویژه‌ی دارد. با نظر به این‌که آسیب‌های به وجود آمده در سازه‌ها می‌توانند خسارت‌های جانی و مالی فراوانی را بر جای گذارند، امروزه بیشتر اهمیت موضوع سلامت سازه‌ها و تشخیص خرابی در آنها احساس می‌شود. در حوزه‌ی پایش سلامت سازه، منظور از خرابی هرگونه تغییر در خواص ماده یا هندسه، سیستم سازه‌ی است که عملکرد کلی سازه را تحت تأثیر قرار می‌دهد. نیروهای جانبی و قائم، بارگذاری‌های بیش از ظرفیت طراحی اعضا، اجرای نادرست، فرسودگی مصالح و عوامل دیگر در طول خدمت‌رسانی همواره عملکرد صحیح سازه را مختل می‌کنند.

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۹/۴/۱۱، اصلاحیه ۱۳۹۹/۸/۳، پذیرش ۱۳۹۹/۹/۳۰

DOI:10.24200/J30.2020.56237.2812

الگوریتم عیب‌یابی برای سازه‌ها با استفاده از پارامترهای لرزه‌ی پیشنهاد دادند و دریافتند که با استفاده از الگوریتم پیشنهادی می‌توان آسیب را دقیقاً در یک زمان محاسباتی نسبتاً کوتاه شناسایی کرد.^[۱۹] همچنین ساهو^{۱۵} و همکاران (۲۰۱۸)، یک روش ترکیبی برای تشخیص خرابی ارائه دادند.^[۲۰] غیائی و همکاران (۲۰۱۹)، نیز یک روش سه مرحله‌ی برای شناسایی آسیب سازه‌های فضایی در مقیاس بزرگ با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی خفاش پیشرفته پیشنهاد دادند و دریافتند که روش پیشنهادی می‌تواند مکان و شدت آسیب در سازه‌های فضایی را دقیقاً تشخیص دهد.^[۲۱] آنو^{۱۶} و همکاران (۲۰۱۹)، مطالعه‌ی تحلیلی عیب‌یابی با استفاده از خطوط تأثیر جابه‌جایی پل را بررسی کردند و دریافتند که رویکرد مذکور می‌تواند به درستی آسیب در مدل شبیه‌سازی را تشخیص دهد.^[۲۲] روفلز^{۱۷} و همکاران (۲۰۲۰)، با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی به عیب‌یابی پل پرداختند و روش مذکور، نتایج امیدوارکننده‌ی را نشان داد و ۴ مورد از ۵ مورد آسیب‌دیدگی را با موفقیت شناسایی کرد.^[۲۳] با توجه به مطالعات و پژوهش‌های صورت گرفته توسط پژوهشگران مختلف در سرتاسر جهان در زمینه‌ی بررسی خصوصیات و عیب‌یابی می‌توان نتیجه گرفت که در زمینه‌ی سازه‌های پانلی سه‌بعدی، مطالعات مدون، منسجم و سازمان‌دهی شده‌ی چندان صورت نگرفته است، که این موضوع ضرورت انجام پژوهش حاضر را فراهم کرده است. لذا در پژوهش حاضر، به بررسی و پایش سلامت ساختمان پیش‌ساخته‌ی پانلی کامل بر مبنای نتایج آزمایشگاهی و تحلیل توابع موجک مختلف پرداخته و آسیب‌هایی که ممکن است در سازه‌های اخیر رخ دهند، ارزیابی و تحلیل شده‌اند.

۲. تبدیل موجک

تبدیل موجک^{۱۸} یا تبدیل ویولت، تبدیلی است که با استخراج مشخصات بسامدی یک سیگنال در یک بازه‌ی زمانی کوتاه بیان می‌کند که اجزاء مذکور با گذشت زمان به چه نحو تغییر می‌کنند. در واقع، تبدیل موجک بر این اصل استوار است که هر سیگنال می‌تواند به مجموعه‌ی از توابع موضعی، که موجک نامیده می‌شوند، تبدیل شود. هر نوع ویژگی موضعی یک سیگنال را می‌توان با استفاده از توابع موجکی مرتبط تحلیل و بررسی کرد. تبدیلات موجک به نقاط تکیه^{۱۹} در سیگنال‌ها حساس هستند و می‌توان از همین موضوع برای پیدا کردن تغییرات تند و ناگهانی در شکل‌های مودی، که اغلب نشان‌دهنده‌ی آسیب است، استفاده کرد.

تبدیل موجک در حالت کلی به دو صورت پیوسته و گسسته تعریف می‌شوند، که در پژوهش حاضر از تبدیل موجک پیوسته^{۲۰} استفاده شده است. اگر $x(t)$ یک سیگنال در بازه‌ی $-\infty$ تا $+\infty$ باشد، در این صورت تبدیل موجک پیوسته‌ی یک‌بعدی آن به صورت رابطه‌ی ۱ تعریف می‌شود:

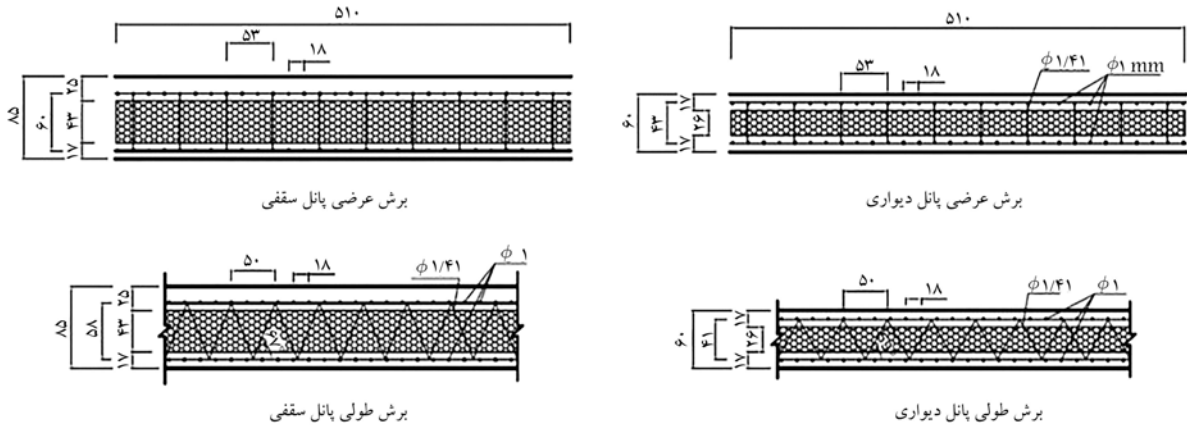
$$CWT(s, b) = \frac{1}{\sqrt{|s|}} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \psi^* \left(\frac{t-b}{s} \right) dt \quad (1)$$

که در آن، پارامترهای b و s به ترتیب پارامترهای انتقال^{۲۱} و مقیاس^{۲۲} هستند و $CWT(s, b)$ ضریب موجک نامیده می‌شود. Ψ نیز تابع موجک مادر نامیده می‌شود و Ψ^* مزدوج مختلط Ψ است. هر ضریب موجک، نشان‌دهنده‌ی میزان همبستگی یا شباهت سیگنال اصلی به شکل موج موجک تغییر مقیاس یافته‌ی موجک مادر با پارامتر مقیاس s در حوالی نقطه‌ی b است. پارامتر مقیاس در تبدیل موجک پیوسته به عنوان یک اپراتور ریاضی باعث انقباض یا انبساط سیگنال می‌شود. مقیاس‌های بالا، متناظر با جزئیات^{۲۳} و مقیاس‌های پایین، متناظر با تقریبات^{۲۴} سیگنال هستند.

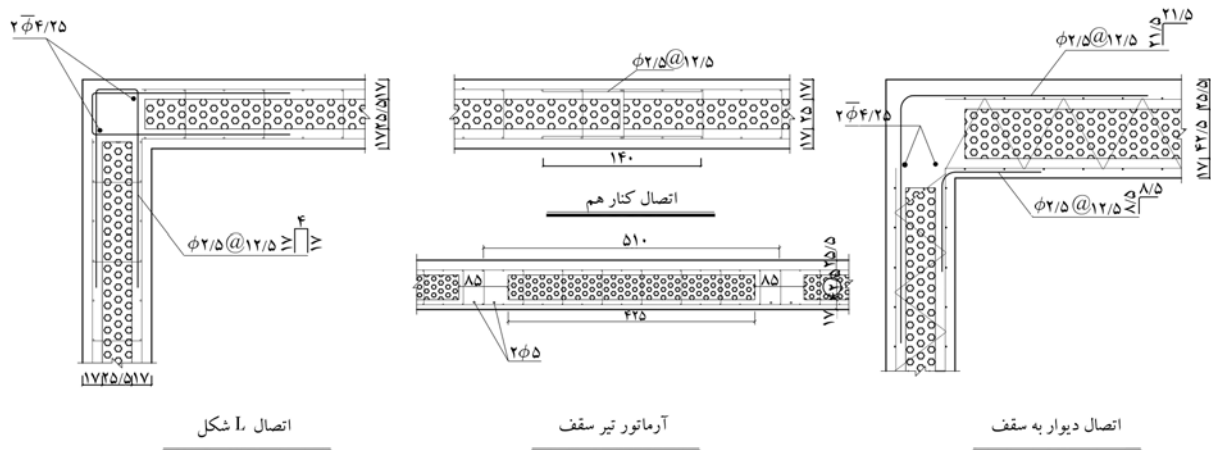
در مطالعه‌ی تشخیص آسیب در یک پل فولادی با مقیاس کامل توسط سوندسن^۲ و همکاران (۲۰۲۰)، یک روش برای تشخیص اتصال‌های مفصلی آسیب دیده در پل‌های فولادی برای بهبود کیفیت بازرسی از پل ارائه شده است، که می‌تواند در هنگام بازرسی از پل، آسیب‌های سازه‌ی مهم را شناسایی کند و برای پل‌های فولادی روباز استفاده شود.^[۱] گوکداج و کمپاز^۳ (۲۰۰۹)، نیز با استفاده از رویکردی جدید مبتنی بر ترکیب تبدیل موجک گسسته و پیوسته به تشخیص آسیب در تیرها پرداخته‌اند.^[۲] قدرتی امیری و همکاران (۲۰۱۰)، هم با استفاده از شکل مودی صفحات سالم و معیوب توسط تبدیل موجک گسسته به تشخیص محل آسیب پرداخته‌اند.^[۴] لیو^۴ و همکاران (۲۰۱۲)، نیز با استفاده از تبدیل موجک موفق به شناسایی محل خرابی در توربین‌های بادی شدند و بر اساس ارتباط پیشینه‌ی ضرایب موجک و میزان خسارت موجود، شدت خرابی را ارزیابی کردند.^[۵] لوتریدی^۵ و همکاران (۲۰۰۴)، به تشخیص آسیب با استفاده از تحلیل مودهای ارتعاشی اصلی تیرهای طره‌ی دوپل ترک‌خورده به کمک تبدیل موجک پیوسته پرداختند و دریافتند که ضرایب تبدیل موجک، مقادیر بالایی را در محل ترک‌ها نشان می‌دهند و روش پیشنهادی قادر به تشخیص آسیب‌های منفرد و چندگانه است.^[۵] فان و کیا^۶ (۲۰۰۹)، روشی جهت شناسایی محل خرابی بر اساس تبدیل موجک گوسی دو بعدی در صفحات خمشی ارائه کردند، که قادر به شناسایی آسیب در سازه‌های صفحه‌ی کامپوزیتی نیز است.^[۶] کاتونین^۷ (۲۰۱۰)، با استفاده از تبدیلات موجک گسسته روی پاسخ‌های مودال یک تیر ساخته شده از ورق پلیمری به بررسی ترک‌های متعدد پرداخت و نشان داد روش پیشنهادی قادر به تشخیص ترک‌های چندگانه است و در بحث پایش سلامت سازه مؤثر است.^[۷] روش پیشنهادی باقری و کورهای (۲۰۱۳)، نیز در بررسی محل خرابی در سازه‌های تحت تحریک زلزله با استفاده از موجک گسسته، مبتنی بر تشخیص تغییرات ناگهانی در پاسخ‌های لرزه‌ی جابه‌جایی یا سرعت بوده است.^[۸] در مطالعات دیگری، بررسی رفتار دینامیکی در سیستم‌های پانل سه‌بعدی توسط کبیر و رضایی‌فر (۲۰۰۸ و ۲۰۱۲) ارزیابی شده است.^{[۹] و [۱۰]} بتی^۹ و همکاران (۲۰۱۵)، هم یک روش ترکیبی بر اساس شبکه‌های عصبی مصنوعی و الگوریتم ژنتیک برای شناسایی آسیب پیشنهاد کردند و نتایج روش پیشنهادی ایشان مطابقت کاملی با نتایج آزمایشگاهی داشته است.^[۱۱] همچنین عموزاده و همکاران (۲۰۱۶)، با استفاده از تبدیل موجک به پردازش پاسخ سازه‌ها جهت تشخیص خسارت‌های به وجود آمده در اثر زلزله پرداختند و توانایی روش مطالعه شده در تشخیص آسیب‌دیدگی سازه‌ها تحت اثر زلزله و قابلیت بالای آن در تعیین محل و زمان رخداد آسیب‌ها، بدون نیاز به اطلاعات سازه‌ی اولیه را بیان کردند.^[۱۲] آشوری و همکاران (۲۰۱۷)، نیز با استفاده از ترکیب تبدیل موجک و مدل المان محدود به روزرسانی شده به تشخیص آسیب در صفحات کامپوزیتی چندلایه پرداختند.^[۱۳] یانگ و اوایدیجی^۹ (۲۰۱۷)، روش جدیدی جهت شناسایی خرابی در صفحات کامپوزیتی چندلایه با استفاده از سطح بسامد مودال ارائه کردند.^[۱۴] وانگ^{۱۰} و همکاران (۲۰۱۵)، نیز برای شناسایی خرابی سازه‌ی 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 کردند.^[۱۵] همچنین فریگیو^{۱۱} و همکاران (۲۰۱۸)، روشی کلی برای عیب‌یابی در سازه‌های عمرانی ارائه دادند و تشخیص آسیب را در دو حالت اعمال خرابی عمدی و خرابی ناشی از سیگنال زلزله بررسی و تأیید کردند.^[۱۶] کارمیناتی و ریچی^{۱۲} (۲۰۱۸)، در مطالعه‌ی به بررسی عیب‌یابی سازه‌ها با استفاده از ارتعاش‌ها پرداختند.^[۱۷] فریرا گومز^{۱۳} و همکاران (۲۰۱۹) هم با استفاده از روش‌های معکوس به عیب‌یابی سازه‌های مکانیکی با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی و شبکه‌ی عصبی مصنوعی پرداختند.^[۱۸] کریشانونی^{۱۴} و همکاران (۲۰۱۹)، نیز یک

جدول ۱. مشخصات مصالح مصرفی.

نوع مواد	ضریب پواسون	وزن مخصوص (kg/m^3)	مدول یانگ (Gpa)	تنش تسلیم (Mpa)	مقاومت کششی (Mpa)	مقاومت فشاری (Mpa)
فولاد	۰/۲۸	۷۸۵۵	۲۰۶	۴۷۰	۵۲۰	-
شاتکریت	۰۱۵	۲۱۷۵	۱۵	-	۲/۸	۲۴/۶
پلی استایرن	۰/۱۷	۱۰	۰/۰۲	-	-	-



شکل ۱. جزئیات پانل دیواری و سقفی مقیاس شده (ابعاد به میلی متر). [۲۴]



شکل ۲. جزئیات اتصال های مقیاس شده (ابعاد به میلی متر). [۲۴]

می شوند. مشخصات مصالح مصرفی به طور خلاصه در جدول ۱ ارائه شده است.

ابعاد اصلی ساختمان ۴ طبقه دارای ابعاد به پلان $۷/۵ \times ۴/۷$ و ارتفاع $۱۳/۲$ متر بوده است، که با مقیاس $\frac{1}{27.35}$ به ابعاد پلان $۳/۲ \times ۲$ و ارتفاع $۵/۶$ متر تغییر پیدا کرده است. در شکل ۳، پلان ساختمان ۴ طبقه و میز لرزان به همراه فونداسیون فلزی به صورت دقیق بر روی آن به همراه موقعیت آرماتورهای تقویتی و در شکل ۴، نماهای کلی ساختمان در مجموعه آزمایشگاهی میز لرزان دانشگاه صنعتی شریف مشاهده می شود.

پس از انجام تحلیل مودال، شکل مودهای سازه استخراج و با استفاده از تبدیل موجک پیوسته، ماتریس شکل مودهای سالم و معیوب در محیط نرم افزار متلب ۲۵ تحلیل و موقعیت خرابی ها شناسایی شده است.

۳. مدل سازی ساختمان پیش ساخته ی پانلی در نرم افزار

اجزاء محدود آباکوس و نمونه ی آزمایشگاهی

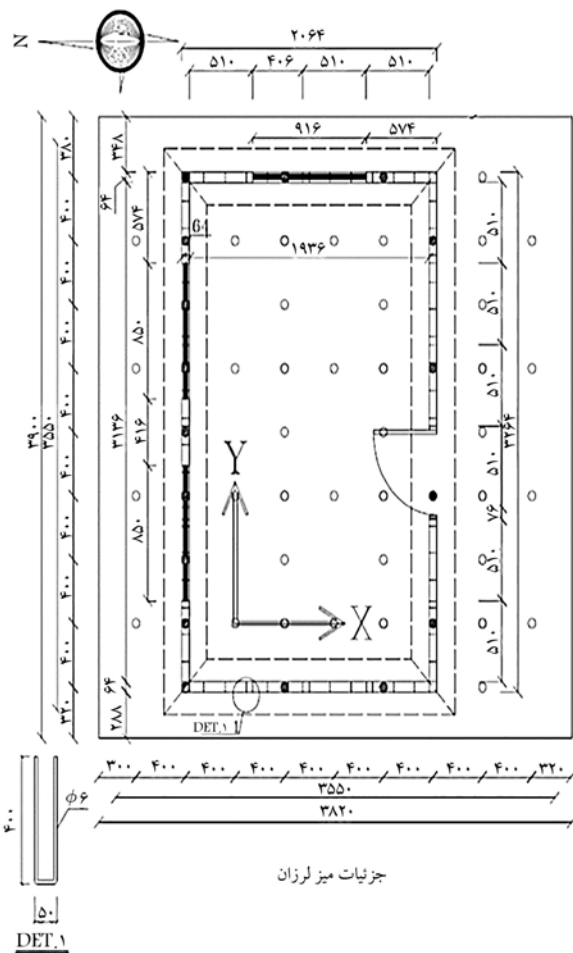
جهت مدل سازی ساختمان ۴ طبقه از المان پوسته یی مرکب در نرم افزار اجزاء محدود آباکوس استفاده شده است. در این خصوص با استفاده از آزمایش های اجزاء سیستم پانلی، مشخصات استاتیکی لایه های مختلف به دست آمده و در مدل سازی استفاده شده است. [۲۴] با توجه به این که مقیاس مدل نسبت به نمونه اصلی $\frac{1}{27.35}$ است، کلیه ابعاد از جمله قطر میلگرد نیز مقیاس شده است. در شکل ۱، جزئیات پانل های دیواری و سقفی مقیاس شده و همچنین در شکل ۲، جزئیات اتصال دیوارها و سقف های سازه ی پانلی مقیاس شده برای مدل مشاهده

جدول ۲. مقایسه‌ی نتایج تحلیل مودی مدل‌های آزمایشگاهی و اجزاء محدود سازی سالم.

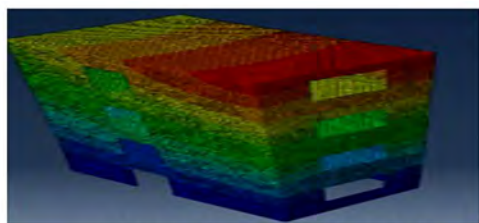
مود	نتایج تحلیل مودی مدل آزمایشگاهی		نتایج تحلیل مودی مدل اجزا محدود		درصد خطا مدل آزمایشگاهی و مدل عددی	
	بسامد (هرتز)	تناوب (ثانیه)	بسامد (هرتز)	تناوب (ثانیه)	بسامد (هرتز)	تناوب (ثانیه)
۱	۵/۶۱	۰/۱۷۸	۵/۷۶	۰/۱۷۴	۲/۶۷	۲/۲۴
۲	۷/۳۷	۰/۱۳۶	۷/۲۹	۰/۱۳۷	۱/۰۸	۰/۷۳
۳	۱۵/۵۰	۰/۰۶۵	۱۴/۱۷	۰/۰۷۱	۸/۵۸	۹/۲۳



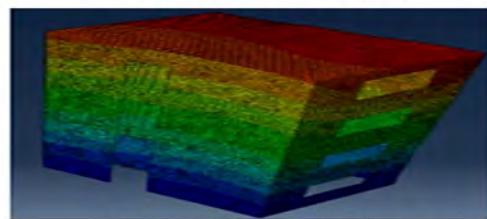
شکل ۴. نماهای کلی ساختمان در مجموعه‌ی آزمایشگاهی میز لرزان. [۲۴]



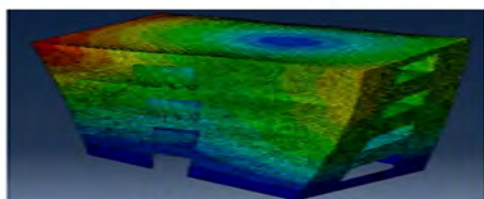
شکل ۳. پلان ساختمان ۴ طبقه و جزئیات میز لرزان، فونداسیون و آرماتورهای تقویتی مقیاس شده (ابعاد به میلی‌متر). [۲۴]



الف) مود اول (اثر توام انتقالی X و دورانی Z)؛



ب) مود دوم (اثر توام انتقالی Y و دورانی Z)؛



ج) مود سوم (اثر دورانی Z).

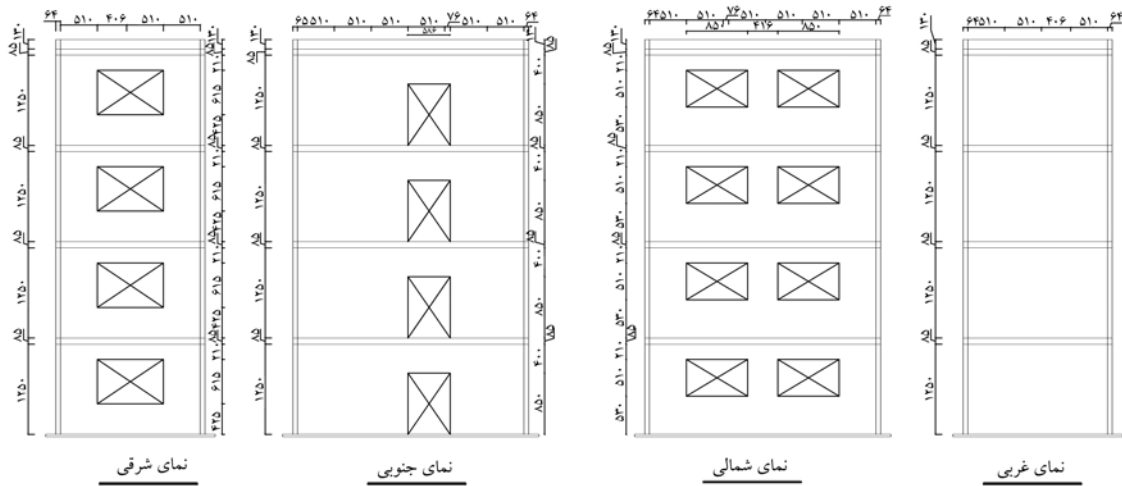
شکل ۵. شکل مودهای سازی سالم.

ایجاد شده پس از لرزه‌ی ناغان - ۱۳۵٪ آزمایشگاهی (منظور از ۱۳۵٪ یعنی رکوردهای شتاب، سرعت و جابه‌جایی زلزله‌ی واقعی ناغان، ۳۵٪ افزایش یافته است) مشاهده می‌شود، که مطابق آن بخش عمده‌ی از انرژی زلزله در طبقه‌ی اول و بخش کمتری در طبقه‌ی دوم با وارد شدن سازه به ناحیه‌ی غیرخطی تلف شده است. بنابراین در روند کاهش سختی سازه، طبقات اول و دوم نقش مهم‌تری ایفا می‌کنند. همچنین اطراف بازشوها از نقاط حساس سازه است، که ترک‌ها از آن‌جا شروع می‌شود و دلیل آن وجود تمرکز تنش در اطراف بازشوهاست.

به منظور صحت‌سنجی مدل اجزاء محدود، نتایج تحلیل مودال مدل آزمایشگاهی و مدل اجزاء محدود، سازی سالم برای ۳ مود اصلی انتقالی و دورانی سازه در جدول ۲ ارائه شده است، که مطابق آن، مطابقت مناسبی بین نتایج دو مدل برقرار است. همچنین در شکل ۵، شکل ۳ مود اصلی انتقالی و دورانی سازی سالم ترسیم شده است.

۴. بررسی تغییرات بسامدی و شکل مودی

عکس‌العمل سازه تحت لرزه‌های مختلف با نصب ابزارهای دقیق اندازه‌گیری و سپس رفتار واقعی سازه تحت زمین‌لرزه برآورد شده است. در شکل ۶، ترک‌های



شکل ۶. ترک‌های ایجاد شده پس از لرزه‌ی ناغان - ۱۳۵٪ آزمایشگاهی.

جدول ۳. مقایسه‌ی نتایج تحلیل مودی مدل‌های آزمایشگاهی و اجزاء محدود سازه‌ی آسیب دیده.

مود	نتایج تحلیل مودی مدل آزمایشگاهی		نتایج تحلیل مودی مدل اجزاء محدود		درصد خطا مدل آزمایشگاهی و مدل عددی	
	بسامد (هرتز)	تناوب (ثانیه)	بسامد (هرتز)	تناوب (ثانیه)	بسامد (هرتز)	تناوب (ثانیه)
۱	۴/۰۰	۰/۲۵۰	۴/۰۲	۰/۲۴۹	۰/۵۰	۰/۴۰
۲	۵/۱۰	۰/۱۹۶	۵/۰۶	۰/۱۹۸	۰/۷۸	۱/۰۲
۳	۷/۵۰	۰/۱۳۳	۷/۶۷	۰/۱۳۰	۲/۲۷	۲/۲۵

جدول ۴. مقادیر معیار همبستگی شکل مودها.

مود	نمای جنوبی سازه	نمای شمالی سازه	نمای شرقی سازه
۱	۰/۹۹۷۳۳۶۹۷۲	۰/۹۹۶۳۸۶۰۳۰	۰/۹۷۳۰۹۳۳۶۴
۲	۰/۹۵۵۷۸۱۹۵۳	۰/۸۸۱۱۵۸۶۳۹	۰/۹۹۹۱۹۰۱۱۶
۳	۰/۹۸۴۴۵۴۴۱۱	۰/۹۹۰۰۲۵۲۹۸	۰/۹۶۷۷۷۷۸۲۵

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

مود	نمای جنوبی سازه	نمای شمالی سازه	نمای شرقی سازه
۱	۲/۹۵۸۰	۳/۴۴۶۵	۹/۴۴۱۰
۲	۱۲/۱۳۸۸	۲۰/۱۶۵۵	۱/۶۳۰۸
۳	۷/۱۶۲۴	۵/۷۳۱۹	۱۰/۳۴۰۹

ϕ_i^U و ϕ_i^D به ترتیب بردار شکل مود سازه‌های سالم و آسیب دیده‌ی مود i ام هستند. مقادیر معیار همبستگی شکل مود همواره بین ۰ و ۱ بوده و مقدار ۱ نشان دهنده‌ی انطباق کامل شکل مودها (عدم وجود آسیب) و مقادیر کمتر از ۱، نشان دهنده‌ی عدم انطباق شکل مودها (وجود آسیب) در سازه است.

در 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 ۱ هستند و وجود آسیب تأیید می‌شود. در جدول ۵، زاویه‌ی بین بردار شکل

نتایج تحلیل مدل آزمایشگاهی و مدل اجزاء محدود سازه‌ی آسیب دیده پس از لرزه‌ی ناغان - ۱۳۵٪ برای ۳ مود اصلی انتقالی و دورانی سازه در جدول ۳ ارائه شده است، که مطابق آن مطابقت مناسبی بین نتایج دو مدل برقرار است.

در صورت انطباق کامل شکل مودهای سازه‌های سالم و آسیب دیده، هیچ‌گونه خرابی در سازه وجود ندارد؛ بنابراین اگر چنانچه بتوان میزان همبستگی شکل مودهای مختلف سازه‌های سالم و آسیب دیده را بررسی کرد، می‌توان به مسئله‌ی وجود خرابی در سازه پاسخ داد. یکی از معیارهای اطمینان بخش جهت مقایسه‌ی شکل مودهای سازه‌های سالم و آسیب دیده، معیار همبستگی شکل مود (MAC) ^{۲۶} است، که از طریق رابطه‌ی ۲ به بیان می‌شود: ^[۲۵]

$$MAC i(Ud, D) = \frac{\left(\sum_{i=1}^n \phi_i^U \phi_i^D \right)^2}{\sum_{i=1}^n (\phi_i^U)^2 \sum_{i=1}^n (\phi_i^D)^2} \quad (2)$$

بسامد سازه‌ی سالم (هرتز)	بسامد سازه‌ی آسیب‌دیده (هرتز)	بسامد سازه‌ی سالم (هرتز)	بسامد سازه‌ی آسیب‌دیده (هرتز)	بسامد سازه‌ی سالم (هرتز)	بسامد سازه‌ی آسیب‌دیده (هرتز)
۵/۷۶۸۰	۴/۰۲۲۶	۸	۱۱/۹۱۱	۱۱/۳۹۸	۱
۷/۲۹۹۲	۵/۰۶۰۶	۹	۱۱/۹۵۸	۱۱/۸۲۰	۲
۸/۰۱۷۷	۷/۶۶۵۹	۱۰	۱۱/۹۶۵	۱۱/۸۸۸	۳
۸/۲۶۸۵	۸/۱۶۱۸	۱۱	۱۴/۱۶۶	۱۱/۹۰۶	۴
۸/۳۲۲۶	۸/۲۲۶۱	۱۲	۱۵/۶۹۰	۱۳/۳۵۱	۵
۸/۳۲۷۰	۸/۲۴۲۸	۱۳	۱۶/۰۲۶	۱۵/۳۵۰	۶
۱۱/۷۰۹	۹/۹۲۱۳	۱۴	۱۶/۰۸۸	۱۵/۷۷۷	۷

$$n1 = 2 * numel(x(:));$$

$$xi = linspace(0, L, n1);$$

$$Ui = interp\ (x, U, xi, Interpolation);$$

$$Di = interp\ (x, D, xi, Interpolation);$$

گام ۳. محاسبه‌ی اختلاف شکل مودهای i ام حالت سالم و هر یک از نماهای آسیب‌دیده.

$$Signal = Ui - Di;$$

گام ۴. اعمال تبدیل موجک پیوسته به گام ۳ و استخراج ضرایب حاصل از جزئیات تحلیل‌های موجک.

$$c = cwt (Signal, Scale, 'wname');$$

$$\% wname = wavelet name$$

گام ۵. درون‌یابی اسپلاین مکعبی ضرایب موجک و توزیع ضرایب (شناسایی ناحیه‌ی خرابی).

$$xx = linspace(0, L, numel(cD(:)));$$

$$n2 = 2 * numel(xi(:)); n3 = 2 * numel(xx(:));$$

$$xii = linspace(0, L, n2); xxi = linspace(0, L, n3);$$

$$ci = interp\ (xi, c, xii, Interpolation);$$

$$cDi = interp\ (xx, cD, xxi, Interpolation);$$

$$figure; plot(xii, ci)$$

$$figure; plot(xxi, cDi)$$

در شکل‌های ۷ الی ۱۳، نمودارهای توابع مذکور حاصل از تحلیل موجک اختلاف شکل مودهای سه مود اصلی انتقالی و دورانی مربوط به نماهای مختلف سازه مشاهده می‌شود. نتایج مربوط به شناسایی خرابی در نماهای مختلف سازه مربوط به سه مود اصلی انتقالی و دورانی سازه نشان می‌دهد که با توجه به نتایج آزمایشگاهی، موقعیت خرابی به کمک تابع $coif5$ با پارامتر مقیاس ۸ با موفقیت شناسایی شده و تابع $coif5$ با پارامتر مقیاس ۸ علاوه بر شباهت بسامدی با محتوای

مودهای سالم و آسیب‌دیده‌ی 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، غیرصفر هستند و این موضوع نیز وجود آسیب در ساختمان پانلی را تأیید می‌کند.

همان‌طوری که 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 مسئله‌ی وجود خرابی پاسخ داد. کوچک‌ترین تغییر در ماتریس سختی سازه با تغییرات در ماتریس بسامدهای طبیعی همراه خواهد بود. در جدول ۶، بسامدهای طبیعی ۱۴ مود اول سازه‌ی پانلی در حالت‌های سالم و آسیب‌دیده تحت زلزله‌ی ناغان - ۱۳۵٪ مدل اجزاء محدود ارائه شده است. تغییرات بسامدهای طبیعی تأییدی بر وجود خرابی در سازه‌ی پانلی است.

۵. شناسایی محل وقوع خرابی در نماهای مختلف ساختمان

ماتریس‌های مربوط به اختلاف شکل مودهای سازه‌های سالم و آسیب‌دیده توسط تبدیل موجک پیوسته با استفاده از انواع توابع موجک، از جمله: db , $Haar$, $bior$, $gaus$ و $mexh$, $morl$, sym , $dmey$, $meyr$, $coif$, $rbio$ به علت محدود بودن حجم پژوهش، نتایج توابع موجک $Haar$, $db45$ و $coif5$ در پژوهش حاضر بررسی شده‌اند. در این‌جا، گام‌های الگوریتم شناسایی خرابی تشریح شده است:

گام ۱. فراخوانی شکل مودهای حالت‌های سالم و آسیب‌دیده به محیط نرم‌افزار متلب.

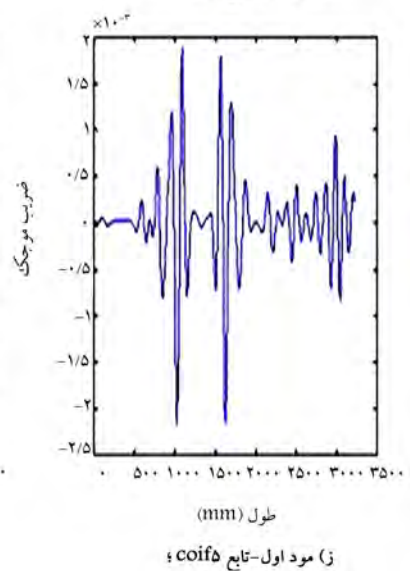
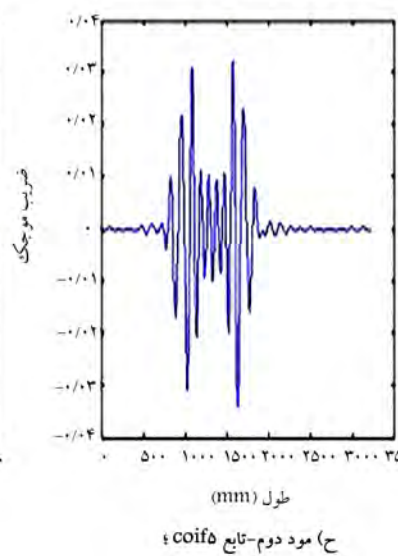
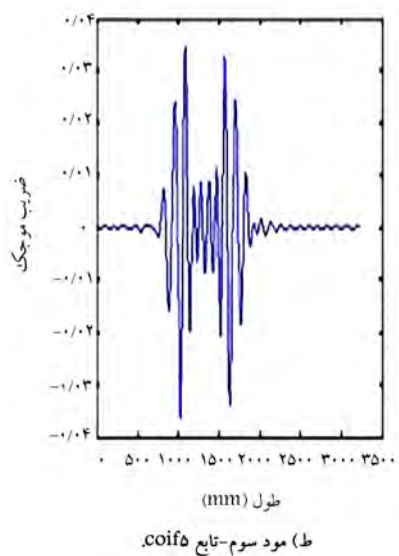
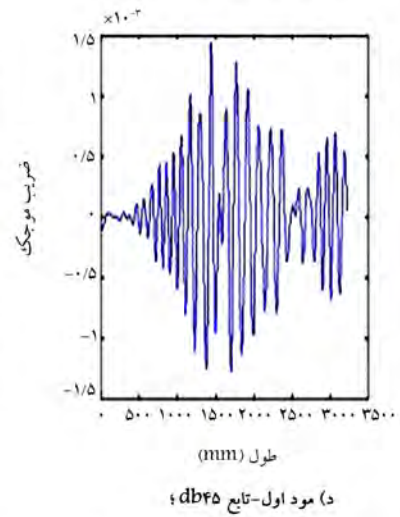
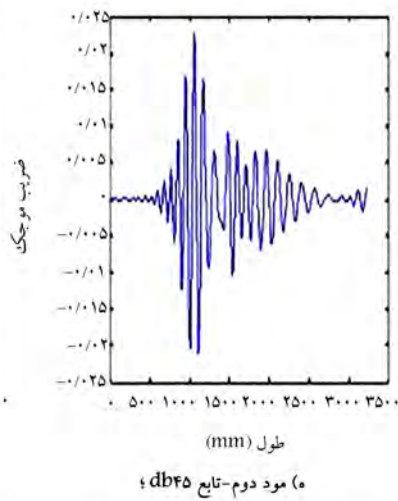
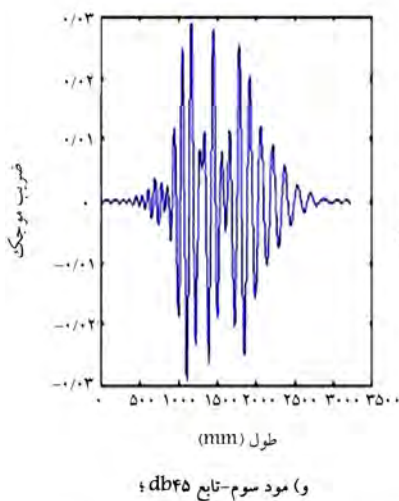
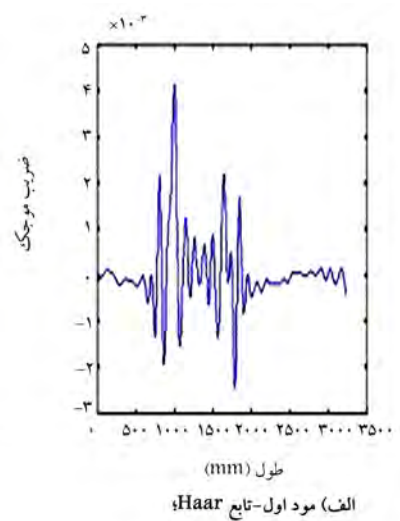
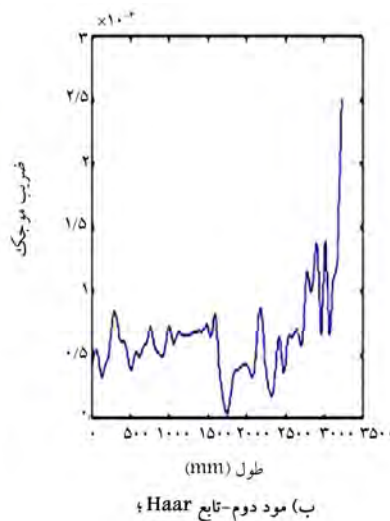
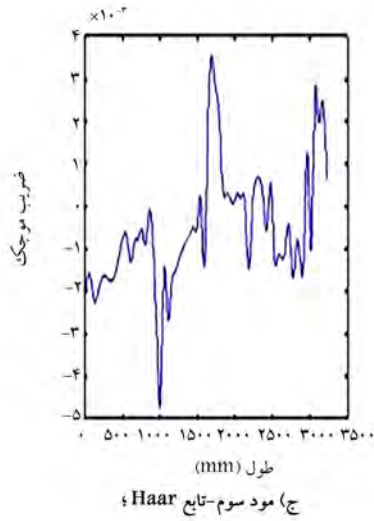
$$U = xlsread('undamaged signal.xlsx');$$

$$D = xlsread('damaged signal.xlsx');$$

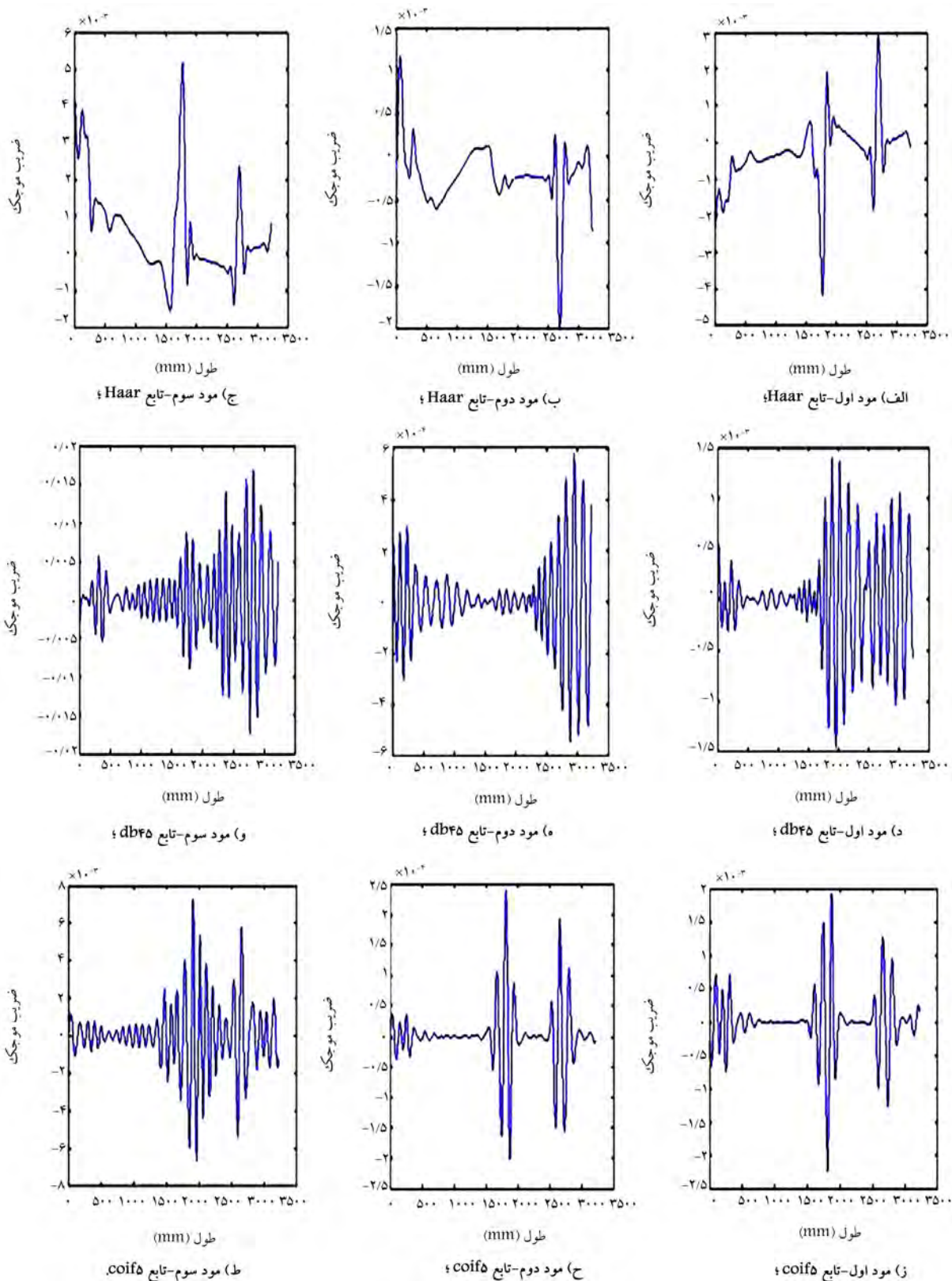
گام ۲. درون‌یابی اسپلاین مکعبی (CSI) 2^m شکل مودها.

$$x = linspace(0, L, numel(U(:))); \% L = Length of beam$$

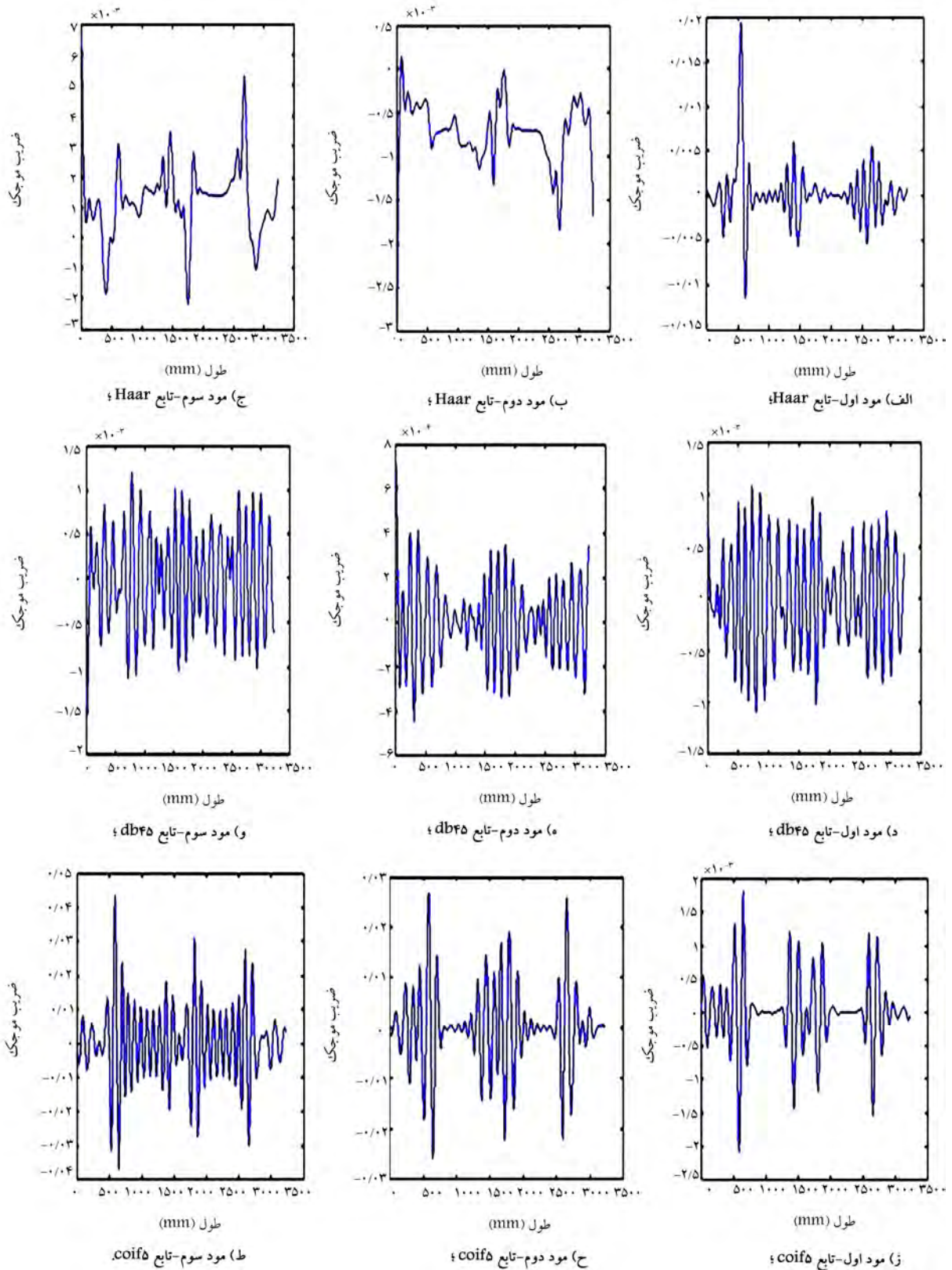
$$Interpolation = 'spline';$$



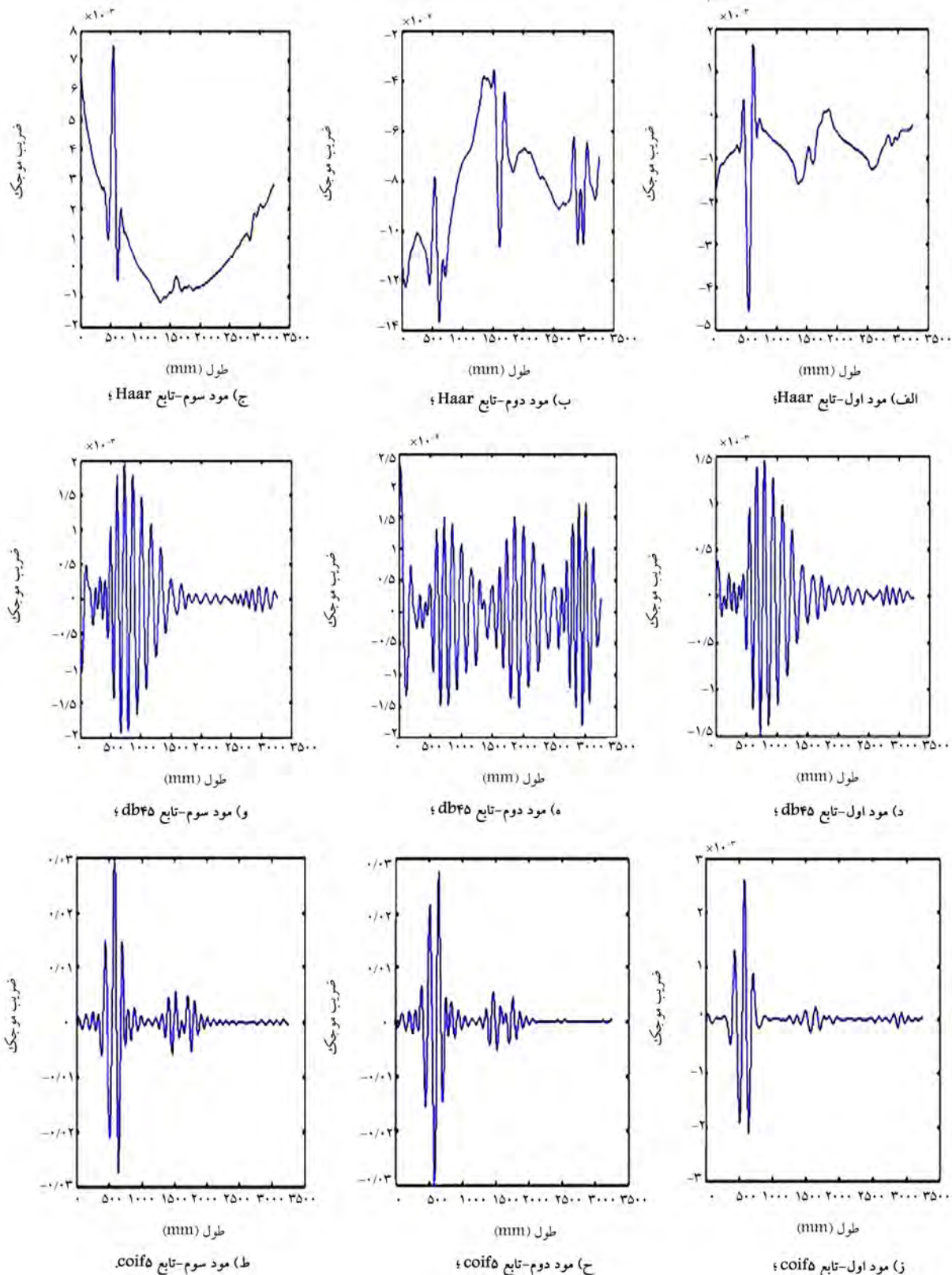
شکل ۷. نمودارهای توابع مختلف حاصل از تحلیل موجک اختلاف شکل ۳ مود اصلی سازه مربوط به طبقه‌ی اول نمای جنوبی.



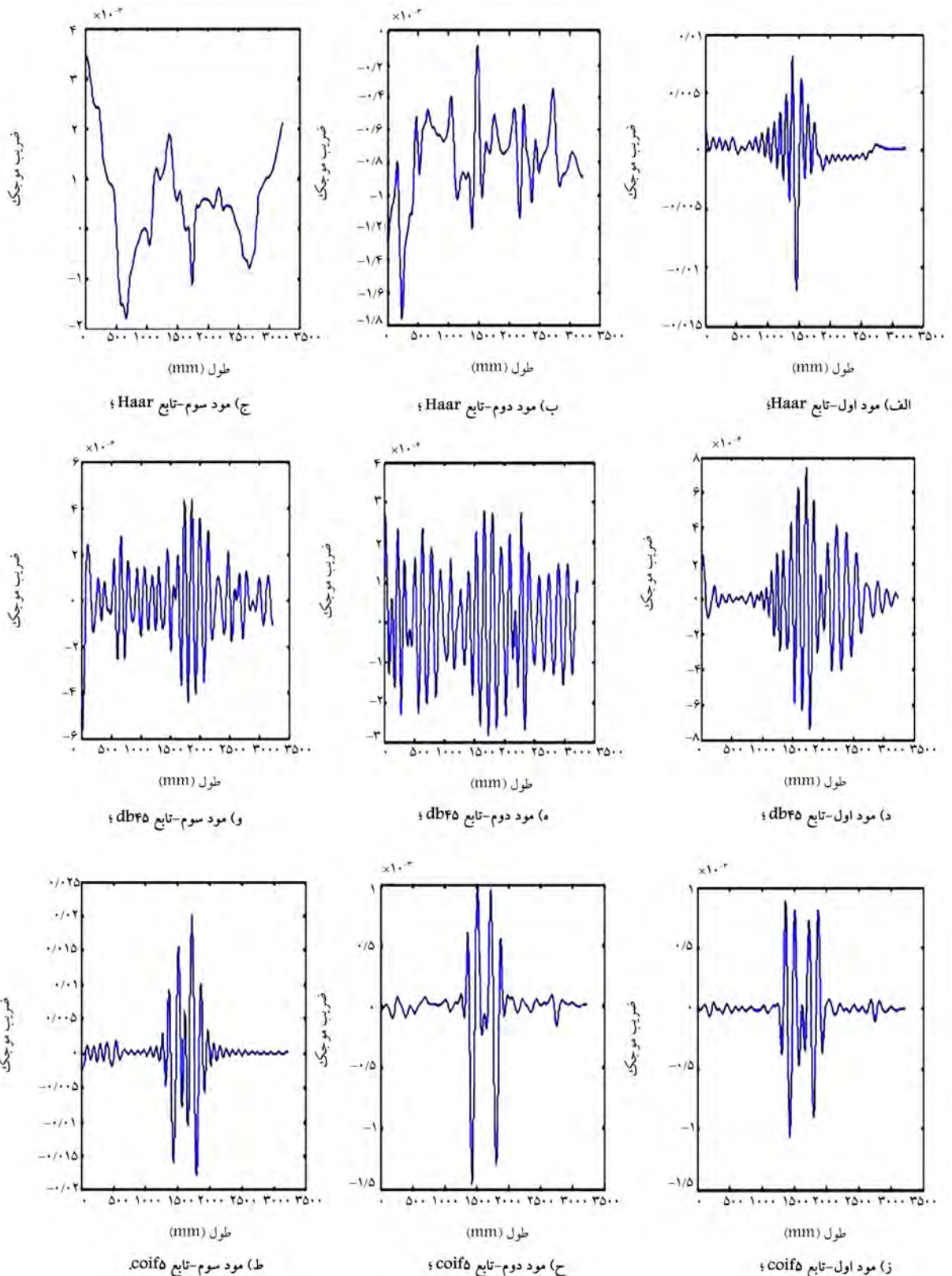
شکل ۸. نمودارهای توابع مختلف حاصل از تحلیل موجک اختلاف شکل ۳ مود اصلی سازه مربوط به طبقه‌ی اول - پایین بارشوهای نمای شمالی.



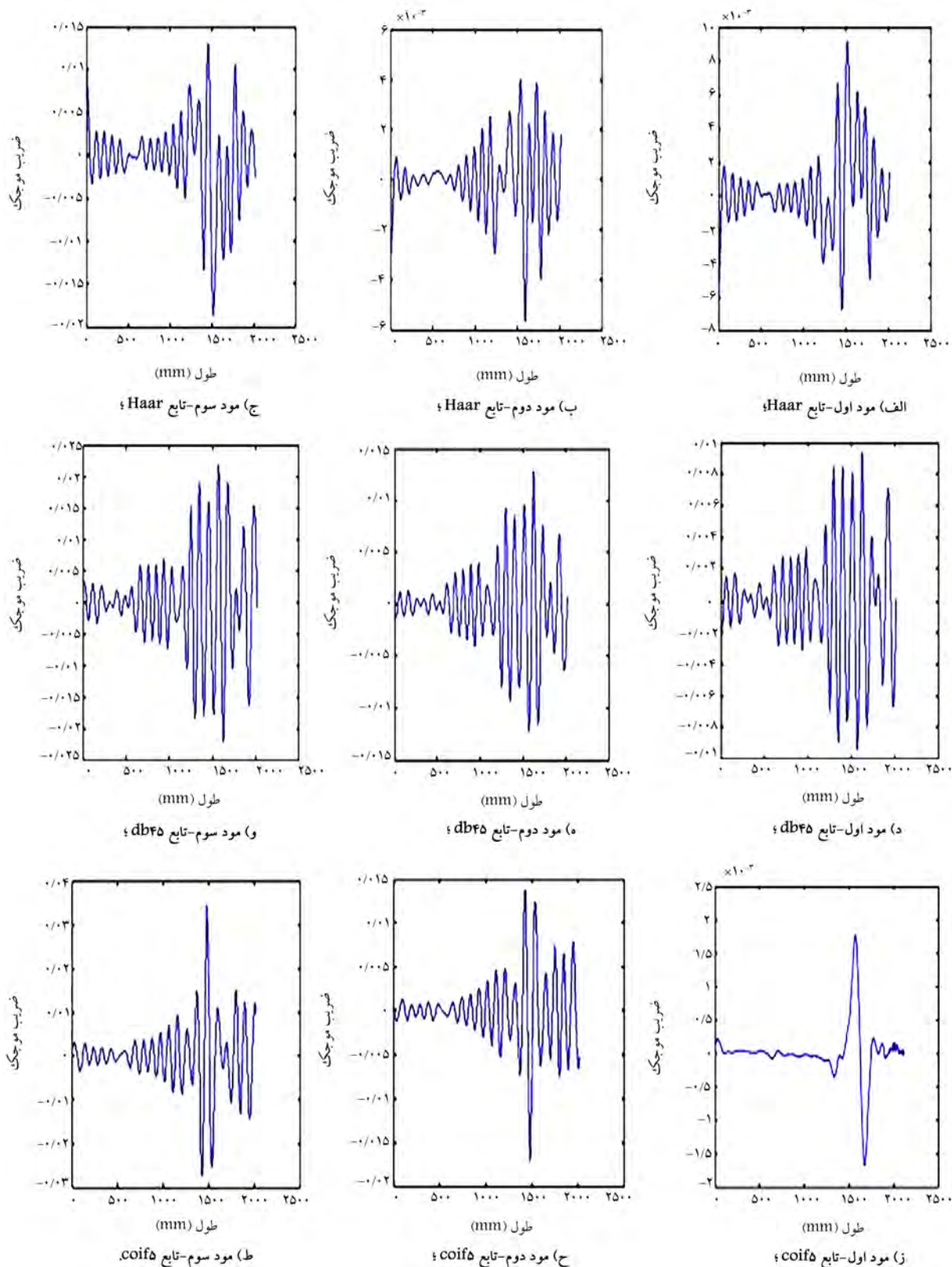
شکل ۹. نمودارهای توابع مختلف حاصل از تحلیل موجک اختلاف شکل ۳ مود اصلی سازه مربوط به طبقه اول - بالایی بازشوهای نمای شمالی.



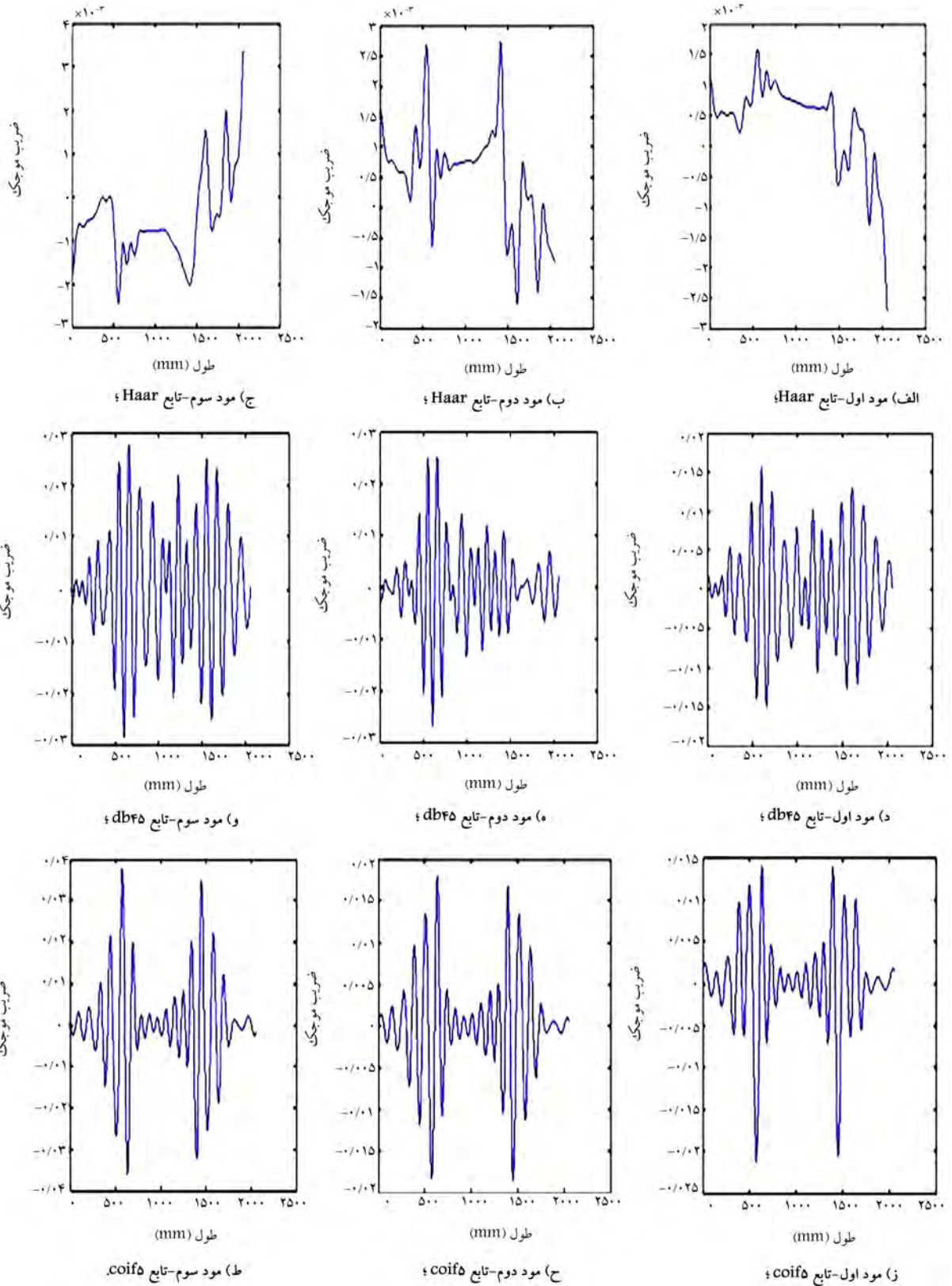
شکل ۱۰. نمودارهای توابع مختلف حاصل از تحلیل موجک اختلاف شکل ۳ مود اصلی سازه مربوط به طبقه دوم - پایین بازشوهای نمای شمالی.



شکل ۱۱. نمودارهای توابع مختلف حاصل از تحلیل موجک اختلاف شکل ۳ مود اصلی سازه مربوط به طبقه دوم - بالای بازشوهای نمای شمالی.



شکل ۱۲. نمودارهای توابع مختلف حاصل از تحلیل موجک اختلاف شکل ۳ مود اصلی سازه مربوط به طبقه اول - پایین بازشوهای نمای شرقی.



شکل ۱۳. نمودارهای توابع مختلف حاصل از تحلیل موجک اختلاف شکل ۳ مود اصلی سازه مربوط به طبقه اول - بالای بازشوهای نمای شرقی.

جدول ۷. شناسایی مرکز خرابی‌ها بر مبنای بیشینه و کمینه‌ی ضرایب موجک.

نما	طبقه	موقعیت	محدوده خرابی (mm)	مود	بیشینه ضرایب موجک	کمینه‌ی ضرایب موجک	مرکز واقعی خرابی (mm)	مرکز شناسایی شده‌ی خرابی بر مبنای کمینه‌ی ضرایب موجک (mm)	مرکز شناسایی شده‌ی خرابی بر مبنای بیشینه‌ی ضرایب موجک (mm)	درصد خطا نسبت به بیشینه‌ی ضرایب موجک	درصد خطا نسبت به کمینه‌ی ضرایب موجک	
جنوبی	اول	بالای بازشوها	۸۸۴- ۱۰۸۴	۱	$1/9 \times 10^{-2}$	$-2/3 \times 10^{-2}$	۹۸۴	۱۰۲۴	۱۰۰۰	۴/۰۶	۱/۶۳	
				۲	$3/2 \times 10^{-2}$	$-2/2 \times 10^{-2}$	۹۸۴	۱۰۲۴	۱۰۰۰	۴/۰۶	۱/۶۳	
				۳	$3/6 \times 10^{-2}$	$-2/9 \times 10^{-2}$	۹۸۴	۱۰۲۴	۱۰۰۰	۴/۰۶	۱/۶۳	
	پایین	بازشوها	۱۶۷۰- ۱۸۷۰	۱	$1/8 \times 10^{-2}$	$-2/2 \times 10^{-2}$	۱۷۷۰	۱۶۷۰	۱۶۹۰	۵/۱۶۵	۴/۵۲	
				۲	$3/2 \times 10^{-2}$	$-2/5 \times 10^{-2}$	۱۷۷۰	۱۶۷۰	۱۶۹۰	۵/۱۶۵	۴/۵۲	
				۳	$2/4 \times 10^{-2}$	$-2/7 \times 10^{-2}$	۱۷۷۰	۱۶۷۰	۱۶۹۰	۵/۱۶۵	۴/۵۲	
	شمالی	اول	پایین بازشوها	۱۵۹۰- ۱۸۴۰	۱	$1/9 \times 10^{-2}$	$-2/1 \times 10^{-2}$	۱۷۱۵	۱۷۵۰	۱۸۰۰	۲/۰۴	۴/۹۶
					۲	$2/4 \times 10^{-2}$	$-2/2 \times 10^{-2}$	۱۷۱۵	۱۷۵۰	۱۸۰۰	۲/۰۴	۴/۹۶
					۳	$7/5 \times 10^{-2}$	-7×10^{-2}	۱۷۱۵	۱۷۵۰	۱۸۰۰	۲/۰۴	۴/۹۶
دوم		بالای بازشوها	۲۶۹۰- ۲۷۹۰	۱	$1/3 \times 10^{-2}$	$-1/3 \times 10^{-2}$	۲۷۴۰	۲۷۰۰	۲۷۵۰	۱/۲۶	۰/۳۶	
				۲	$1/9 \times 10^{-2}$	$-1/5 \times 10^{-2}$	۲۷۴۰	۲۷۰۰	۲۷۵۰	۱/۲۶	۰/۳۶	
				۳	$5/9 \times 10^{-2}$	$-5/8 \times 10^{-2}$	۲۷۴۰	۲۷۰۰	۲۷۵۰	۱/۲۶	۰/۳۶	
			۲۲۴-۵۷۴	۱	$1/8 \times 10^{-2}$	$-2/1 \times 10^{-2}$	۴۸۴	۵۱۵	۵۲۰	۶/۱۴۰	۷/۴۲	
				۲	$2/8 \times 10^{-2}$	$-2/3 \times 10^{-2}$	۴۸۴	۵۱۵	۵۲۰	۶/۱۴۰	۷/۴۲	
				۳	$4/4 \times 10^{-2}$	$-2/7 \times 10^{-2}$	۴۸۴	۵۱۵	۵۲۰	۶/۱۴۰	۷/۴۲	
۱۴۲۴- ۱۵۲۴	۱	$1/2 \times 10^{-2}$	$-1/4 \times 10^{-2}$	۱۴۷۴	۱۴۵۰	۱۴۷۰	۱/۶۳	۰/۳۷				
	۲	$1/5 \times 10^{-2}$	$-1/4 \times 10^{-2}$	۱۴۷۴	۱۴۵۰	۱۴۷۰	۱/۶۳	۰/۳۷				
	۳	$1/8 \times 10^{-2}$	$-1/9 \times 10^{-2}$	۱۴۷۴	۱۴۵۰	۱۴۷۰	۱/۶۳	۰/۳۷				
شرقی	اول	بالای بازشوها	۱۷۴۰- ۱۸۴۰	۱	$1/1 \times 10^{-2}$	$-1/2 \times 10^{-2}$	۱۷۹۰	۱۸۰۰	۱۷۵۰	-۱/۵۶	۲/۳۲	
				۲	$1/9 \times 10^{-2}$	$-2/3 \times 10^{-2}$	۱۷۹۰	۱۸۰۰	۱۷۵۰	-۱/۵۶	۲/۳۲	
				۳	$3/1 \times 10^{-2}$	$-2/7 \times 10^{-2}$	۱۷۹۰	۱۸۰۰	۱۷۵۰	-۱/۵۶	۲/۳۲	
	پایین بازشوها	۲۶۹۰- ۲۹۴۰	۱	$1/2 \times 10^{-2}$	$-1/5 \times 10^{-2}$	۲۸۱۵	۲۷۵۰	۲۸۱۵	۲/۳۱	۴/۰۸		
			۲	$2/6 \times 10^{-2}$	$-2/2 \times 10^{-2}$	۲۸۱۵	۲۷۵۰	۲۸۱۵	۲/۳۱	۴/۰۸		
			۳	$2/8 \times 10^{-2}$	-3×10^{-2}	۲۸۱۵	۲۷۵۰	۲۸۱۵	۲/۳۱	۴/۰۸		
	دوم	۴۷۴-۵۷۴	۱	$2/8 \times 10^{-2}$	$-2/1 \times 10^{-2}$	۵۲۴	۵۵۵	۵۶۵	۵/۹۲	۷/۳۵		
			۲	$2/8 \times 10^{-2}$	$-2/8 \times 10^{-2}$	۵۲۴	۵۵۵	۵۶۵	۵/۹۲	۷/۳۵		
			۳	3×10^{-2}	-3×10^{-2}	۵۲۴	۵۵۵	۵۶۵	۵/۹۲	۷/۳۵		
۱۴۲۴- ۱۵۲۴		۱	$1/8 \times 10^{-2}$	$-1/1 \times 10^{-2}$	۱۴۷۴	۱۴۹۰	۱۴۸۰	۱/۰۸	۰/۴۱			
		۲	1×10^{-2}	$-1/4 \times 10^{-2}$	۱۴۷۴	۱۴۹۰	۱۴۸۰	۱/۰۸	۰/۴۱			
		۳	$1/5 \times 10^{-2}$	$-1/6 \times 10^{-2}$	۱۴۷۴	۱۴۹۰	۱۴۸۰	۱/۰۸	۰/۴۱			
۱۷۴۰- ۱۸۴۰	۱	$-7/5 \times 10^{-2}$	$-1/8 \times 10^{-2}$	۱۷۹۰	۱۸۰۰	۱۸۵۰	-۱/۵۶	۲/۳۵				
	۲	$-9/5 \times 10^{-2}$	$-1/3 \times 10^{-2}$	۱۷۹۰	۱۸۰۰	۱۸۵۰	-۱/۵۶	۲/۳۵				
	۳	2×10^{-2}	$-1/8 \times 10^{-2}$	۱۷۹۰	۱۸۰۰	۱۸۵۰	-۱/۵۶	۲/۳۵				
اول	پایین بازشوها	۱۴۹۰- ۱۷۴۰	۱	$1/8 \times 10^{-2}$	$-1/7 \times 10^{-2}$	۱۶۰۵	۱۴۹۵	۱۴۸۰	۶/۱۸۵	۷/۷۸		
			۲	$1/4 \times 10^{-2}$	$-1/7 \times 10^{-2}$	۱۶۰۵	۱۴۹۵	۱۴۸۰	۶/۱۸۵	۷/۷۸		
			۳	$3/6 \times 10^{-2}$	$-2/7 \times 10^{-2}$	۱۶۰۵	۱۴۹۵	۱۴۸۰	۶/۱۸۵	۷/۷۸		
	بالای بازشوها	۳۷۴-۵۷۴	۱	$1/4 \times 10^{-2}$	$-1/8 \times 10^{-2}$	۴۹۴	۵۲۵	۵۱۵	۷/۱۶۶	۴/۰۸		
			۲	$1/8 \times 10^{-2}$	$-2/1 \times 10^{-2}$	۴۹۴	۵۲۵	۵۱۵	۷/۱۶۶	۴/۰۸		
			۳	$2/8 \times 10^{-2}$	$-2/7 \times 10^{-2}$	۴۹۴	۵۲۵	۵۱۵	۷/۱۶۶	۴/۰۸		
		۱۴۹۰- ۱۶۹۰	۱	$1/4 \times 10^{-2}$	$-1/8 \times 10^{-2}$	۱۵۹۰	۱۴۷۵	۱۴۹۰	۷/۱۲۲	۶/۳۹		
			۲	$1/7 \times 10^{-2}$	$-2/1 \times 10^{-2}$	۱۵۹۰	۱۴۷۵	۱۴۹۰	۷/۱۲۲	۶/۳۹		
			۳	$3/7 \times 10^{-2}$	$-2/3 \times 10^{-2}$	۱۵۹۰	۱۴۷۵	۱۴۹۰	۷/۱۲۲	۶/۳۹		

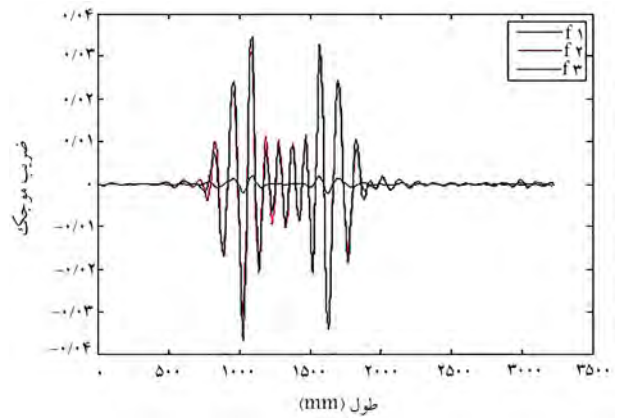
شناسایی شده و با افزایش شدت خرابی‌ها، کمینه‌ی ضرایب موجک کاهش یافته است.

در ضمن اثر مودهای بالاتر در نمایش شدت خرابی محسوس‌تر است، به طوری که در مود پیشگی سازه، بیشینه‌ی ضرایب موجک بزرگ‌تر و شدت خرابی بیشتر نمایان شده است. برای نمونه مطابق شکل ۱۴، اثر مودهای بالاتر در نمایش شدت خرابی مربوط به طبقه‌ی اول نمای جنوبی سازه مشاهده می‌شود.

۷. نتیجه‌گیری

امروزه اطلاع از وضعیت سلامت سازه‌ها به موضوعی مورد علاقه برای مطالعه‌ی جامع روش‌ها تبدیل شده است. آسیب‌های به وجود آمده در سازه‌ها می‌توانند خسارت‌های جانی و مالی فراوانی را بر جای گذارند، از این رو مطالعات در حوزه‌ی سلامت سازه‌ها و تشخیص خرابی در آنها ضروری و مهم است. با توجه به محدودیت‌ها روش‌های سنتی عیب‌یابی، نظیر: بازرسی‌های چشمی، بازرسی آلتروسونیک و رادیوگرافی، روش‌های عیب‌یابی بر مبنای تحلیل پاسخ‌های استاتیکی و دینامیکی شکل گرفته‌اند. با توجه به مطالعات انجام شده در حوزه‌ی پایش سلامت سازه‌ها، کمتر به موضوع شناسایی آسیب در ساختمان‌های پیش‌ساخته‌ی پانلی پرداخته شده است. به همین دلیل در پژوهش حاضر به بررسی و پایش سلامت ساختمان پیش‌ساخته‌ی پانلی کامل بر مبنای نتایج آزمایشگاهی لرزه‌ی بر روی میز لرزان و تحلیل توابع موجک مختلف پرداخته و آسیب‌هایی که ممکن است در آنها رخ دهند، ارزیابی و تحلیل شده‌اند. عمده‌ی نتایج به دست آمده از پژوهش حاضر به طور مختصر در ذیل ارائه شده است:

- ۱- در روند کاهش سختی سازه، طبقات اول و دوم نقش مهم‌تری ایفا می‌کنند و اطراف بازشوها از نقاط حساس سازه است که ترک‌ها از آن‌جا شروع می‌شود و دلیل آن وجود تمرکز تنش در مکان‌های مذکور است.
- ۲- با توجه به نتایج آزمایشگاهی و تحلیل توابع مختلف، موقعیت خرابی به کمک تابع coif5 با پارامتر مقیاس ۸ نسبت به بقیه‌ی توابع با موفقیت شناسایی شده است و اغتشاش بیشتری از ضرایب در محل وقوع خرابی مشاهده می‌شود؛ به طوری که بیشینه‌ها و کمینه‌های نسبی پرش در ضرایب موجک، در محل وقوع خرابی‌ها اتفاق افتاده است.
- ۳- اغتشاشات ضرایب موجک هر یک از محل‌های خرابی مستقل از محل خرابی دیگر با شدت‌های مختلف است.
- ۴- با افزایش شدت خرابی محل مورد نظر، بیشینه و کمینه‌ی ضرایب موجک تولید شده‌ی آن محل در یک موقعیت ثابت به ترتیب افزایش و کاهش می‌یابد.
- ۵- با در نظر گرفتن بیشینه یا کمینه‌ی ضرایب موجک تولید شده در محل وقوع خرابی‌ها به عنوان مرکز خرابی، می‌توان مرکز خرابی‌ها را با خطای کمتر از ۸٪ شناسایی کرد.
- ۶- اثر مودهای بالاتر در نمایش شدت خرابی محسوس‌تر است، به طوری که در مود پیشگی سازه، بیشینه‌ی ضرایب موجک بزرگ‌تر و شدت خرابی بیشتر نمایان شده است.



شکل ۱۴. اثر مودهای بالاتر در نمایش شدت خرابی مربوط به طبقه‌ی اول نمای جنوبی سازه.

بسامدی ساختمان مورد نظر، محتوای بسامدی بالایی نیز دارد و با توجه به سختی بالای ساختمان می‌تواند در صورت وجود اغتشاش‌های کوچک به وجود آمده در اثر آسیب در پاسخ‌های سازه، آنها را نیز به خوبی و با دقت بالایی شناسایی کند. همچنین در محل خرابی، اغتشاش بیشتری از ضرایب موجک در شکل‌ها وجود دارد.

۶. تفسیر نتایج

بررسی‌های مقایسه‌ی ضرایب موجک تولید شده در محل آسیب‌های نماهای مختلف سازه نشان می‌دهد که حساسیت ضرایب موجک محل‌های مختلف خرابی مستقل از هم هستند. با توجه شکل‌های ۷ الی ۱۳، مربوط به تابع coif5 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 است و فقط با افزایش شدت خرابی آن محل افزایش می‌یابد. نتایج بررسی‌های اخیر برای نماهای مختلف سازه برای ۳ مود اصلی انتقالی و دورانی برای تابع coif5 با پارامتر مقیاس ۸ در جدول ۷ گزارش شده است. در تمامی نماهای بررسی شده، اگر چنانچه بیشینه‌ی ضرایب موجک در محل وقوع خرابی‌ها به عنوان مرکز شناسایی شده‌ی خرابی معرفی شود، در این صورت مرکز واقعی خرابی‌ها با خطای ناچیز کمتر از ۸٪ شناسایی می‌شود. همان‌طور که نتایج نشان می‌دهند، در شدت‌های مختلف خرابی، مختصات مکانی بیشینه‌ی ضرایب موجک تولید شده در محل‌های خرابی ثابت می‌ماند؛ به عبارتی، با افزایش شدت خرابی، بیشینه‌ی ضرایب موجک تولید شده‌ی محل خرابی‌ها در یک موقعیت ثابت افزایش می‌یابد. همچنین، بررسی‌ها جهت شناسایی مرکز خرابی‌ها بر مبنای کمینه‌ی ضرایب موجک تولید شده در محل وقوع خرابی‌ها صورت گرفته است. مشاهده می‌شود که مرکز واقعی خرابی‌ها بر مبنای کمینه‌ی ضرایب موجک در شدت‌های مختلف با خطای ناچیز کمتر از ۸٪

پانویس‌ها

1. structural health monitoring

2. Svendsen
3. Gokdag and Kopmaz
4. Liu

5. Loutridis
6. Fan and Qiao
7. Katunin
8. Betti
9. Yang and Oyadiji
10. Wang
11. Frigui
12. Carminati and Ricci
13. Ferreira Gomes
14. Krishnanunni
15. Sahu
16. Ono
17. Ruffels
18. wavelet transform
19. singularities
20. continuous wavelet transform
21. translation
22. scaling
23. details
24. approximations
25. MATLAB
26. modal assurance criterion
27. cubic spline interpolation

(References) منابع

1. Svendsen, B., Froseth, G. and Ronnquist, A. "Damage detection applied to a full-scale steel bridge using temporal moments", *Journal of Shock and Vibration*, **23**, pp. 1-16 (2020).
2. Gokdag, H. and Kopmaz, O. "A new damage detection approach for beam-type structures based on the combination of continuous and discrete wavelet transforms", *Journal of Sound and Vibration*, **324**(3-5), pp. 1158-1180 (2009).
3. Ghodrati-Amiri, G., Bagheri, A., Seyed Razzaghi, S.A. and et al. "Structural damage detection in plate using wavelet transform", *Challenges, Opportunities and Solution in Structural Engineering and Construction-Ghafoori* (Ed) (2010).
4. Liu, X., Leimbach, K.R., Hartmann, D. and et al. "Signal analysis using wavelets for structural damage detection applied to wind energy converters", *14th International Conference on Computing in Civil and Building Engineering* (2012).
5. Loutridis, S., Douka, E. and Trochidis, A. "Crack identification in double-cracked beams using wavelet analysis", *Journal of Sound and Vibration*, **277**(4-5), pp. 1025-1039 (2004).
6. Fan, W. and Qiao, P. "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), pp. 4379-4395 (2009).
7. Katunin, A. "Identification of multiple cracks in composite beams using discrete wavelet transform", *Scientific Problem of Machines Operation and Maintenance*, **2**(162), pp. 41-52 (2010).
8. Bagheri, A. and Kourehli, S. "Damage detection of structures under earthquake excitation using discrete wavelet analysis", *Asian Journal of Civil Engineering (BHRC)*, **14**(2), pp. 289-304 (2013).

9. Rezaifar, O., Kabir, M.Z., Taribakhsh, M. and et al. "Dynamic behavior of 3D-panel single-story system using shaking table testing", *Journal of Engineering Structures*, **30**(2), pp. 318-337 (2008).
10. Kabir, M.Z. and Shadan, P. "Seismic performance of 3D panel wall on piloti RC frame using shaking table equipment", *Proceedings of the 8th International Conference on Structural Dynamics* (2012).
11. Betti, M., Facchini, L. and Biagini, P. "Damage detection on a three-storey steel frame using artificial neural networks and genetic algorithms", *Meccanica*, **50**(3), pp. 875-886 (2015).
12. Amoozadeh, A., Fadavi Amiri, M., Zare Hosseinzadeh, A. and et al. "Processing of structural responses via wavelet transform for detecting damage under earthquake excitation", *Modares Civil Engineering Journal*, **16**(20), pp. 103-117 (2016) (in Persian).
13. Ashory, M.R., Ghasemi-Ghalebahman, A. and Kokabi, M.J. "Damage identification in composite laminates using a hybrid method with wavelet transform and finite element model updating", *Journal of Mechanical Engineering Science*, **232**(5), pp. 815-827 (2017).
14. Yang, C. and Oyadiji, S.O. "Delamination detection in composite laminate plates using 2d wavelet analysis of modal frequency surface", *Journal of Computers and Structures*, **179**, pp. 109-126 (2017).
15. Wang, S., Li, J., Luo, H. and et al. "Damage identification in underground tunnel structures with wavelet based residual force vector", *Journal of Engineering Structures*, **178**, pp. 506-520 (2019).
16. Frigui, F., Faye, J.P., Martin, C. and et al. "Global methodology for damage detection and localization in civil engineering structures", *Journal of Engineering Structures*, **171**, pp. 686-695 (2018).
17. Carminati, M. and Ricci, S. "Structural damage detection using nonlinear vibrations", *International Journal of Aerospace Engineering*, **151**, pp. 199-220 (2018).
18. Ferreira Gomes, G., Diaz Mendez, Y.A., Alexandrino, P.d.S.L. and et al. "A review of vibration based inverse methods for damage detection and identification in mechanical structures using optimization algorithms and ANN", *Archives of Computational Methods in Engineering*, **26**, pp. 883-897 (2019).
19. Krishnanunni, C.G., Sethu Raj, R., Deepak Nandan, Midhun, C.K. and et al. "Sensitivity-based damage detection algorithm for structures using vibration data", *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, **9**, pp. 137-151 (2019).
20. Sahu, S., Kumar, P.B. and Parhi, D.R. "A hybridised CSAGA method for damage detection in structural elements", *Mechanics & Industry*, **19**(4), pp. 407-419 (2018).
21. Ghiasi, R., Fathnejat, H., and Torkzadeh, P. "A three-stage damage detection method for large-scale space structures using forward substructuring approach and enhanced bat optimization algorithm", *Journal of Engineering with computers*, **35**, pp. 857-874 (2019).
22. Ono, R., Ha, T.M. and Fukada, S. "Analytical study on damage detection method using displacement influence

Archive of SID

- lines of road bridge slab”, *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, **9**, pp. 565-577 (2019).
23. Ruffels, A., Gonzalez, I. and Karoumi, R. “Model-free damage detection of a laboratory bridge using artificial neural networks”, *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, **10**, pp. 183-195 (2020).
 24. Kabir, M.Z. and Rezaifar, O. “Shaking table examination on dynamic characteristics of a scaled down 4-story building constructed with 3D-panel system”, *Journal of Structures*, **20**, pp. 411-424 (2019).
 25. Pastor, M., Binda, M. and Harcarik, T. “Modal assurance criterion”, *Journal of Procedia Engineering*, **48**, pp. 543-548 (2012).