****

مجله علمی – پژوهشی

مهندسی عمران مدرس

دوره بیست و یکم، شماره 1، سال1400

**تشخیص خرابی در ساختمان پیش ساخته پانلی آزمایش شده**

**به روش تحلیلی آنالیز موجک پیوسته**

**مجتبی حنطه1، امید رضایی فر2\*، مجید قلهکی3**

1.دانشجوي دكتري مهندسي سازه، دانشگاه سمنان، سمنان، ايران

2.دانشیار، دانشگاه سمنان، سمنان، ايران

3. دانشیار، دانشگاه سمنان، سمنان، ايران

[\*Orezayfar@semnan.ac.ir](mailto:*Orezayfar@semnan.ac.ir)

تاریخ دریافت: تاریخ پذیرش:

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 مودهای اصلی این ساختمان که در بررسی پایش سلامت این سازه تاثیر دارد، بدست آمده است. خطای کمتر از 5/2 درصد هماهنگی مناسب بین نتایج دو مدل را آشکار می­نماید. با توجه به نتایج آزمایشگاهی، موقعیت خرابی به کمک تابع coif5 با پارامتر مقیاس 8 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 %8 شناسایی نمود. همچنین اثر مودهای بالاتر در نمایش شدت خرابی محسوس­تراست 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.

**1- مقدمه**

رﺷﺪ ﭼﺸﻤﮕﻴﺮ ﺻﻨﻌﺖ ﺳﺎﺧﺘﻤﺎن در ﺳﺎل­ﻫﺎي اﺧﻴﺮ و روش ﺳﺎﺧﺘﻤﺎن­ﺳﺎزي ﺻﻨﻌﺘﻲ ﺑﺎ رویکرد ﺳﻨﺘﻲ، ﺗﺤﻮل زﻳﺎدي در اﻳﻦ ﺻﻨﻌﺖ از ﺟﻤﻠﻪ ﺳﺒﻜﻲ، ﻣﻘﺎوﻣﺖ، ﻳﻜﭙﺎرﭼﮕﻲ، ﻋﺎﻳﻖ ﺑﻮدن، ﺳﺮﻋﺖ ﻧﺼﺐ و ﺳﻬﻮﻟﺖ در اﺟﺮا را بوجود آورده است. یکی از ﺳﻴﺴﺘﻢ­های ﺳﺎزه­ای که بسیاری از ویژگی­های ﺳﺎﺧﺘﻤﺎن‌های ﺻﻨﻌﺘﻲ را دارد، ﺳﻴﺴﺘﻢ ﭘﺎﻧﻞ پیش ساخته ﺳﻪ ﺑﻌﺪي 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 [[1]](#footnote-1)(SHM) مطرح است. روش­های شناسایی خرابی و ارزیابی شدت خسارت ناشی از آن­ها در سازه­ها به طور کلی به دو دسته روش­های محلی[[2]](#footnote-2) و روش­های کلی[[3]](#footnote-3) 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 ديوارهاي پانلي با اتصالات برشي غيرخرپايي را تحت بارگذاري فشاري در مركز پانل و همچنين بارگذاري خارج از مركز را بررسي کردند [7]. شیگانگ و همکاران در يك مطالعه عددي به بررسي رفتار كششي تك محوري، رفتار برشي و رفتار خمشي پانل­هاي پيش ساخته­ سبك سه بعدي به روش المان محدود پرداختند [8]. در پژوهشی که کاربونای و همکاران انجام داده­اند، سه برنامه آزمايشي متفاوت براي تعيين تأثير تكيه­گاه­ها و شرايط بارگذاري مختلف بر رفتار خمشي پانل‌هاي پيش ساخته سه بعدي با اتصالات برشي قائم(اتصالات غيرخرپايي) در نظر گرفتند [9]. پاویز و بورناس در پژوهش‌های خود رفتار ده دیوار پانلی منفرد با بازشو و بدون بازشو را در مقياس كامل و تحت بارهاي افقي و قائم به صورت آزمايشگاهي ارزيابي کردند تا رفتار ديوارهاي طره­ای و ديوارهاي با دو انتهاي گيردار مقاوم در برابر بار جانبي بررسي شود[10]. با توجه به اينكه مقاومت پانل­هاي سه بعدي بيشتر بستگي به اتصالات برشي بين دو لايه بتن دارد و لايه پلي استايرن در برش بسيار ضعيف است و هيچ­گونه سهمي در مقاومت برشي اتصالات برشي ندارد بنابراين در پژوهشی الكاشف و موتي از بتن سبک هوادار به عنوان هسته عايق به جاي لايه پلي استايرن در ساخت پانل­هاي سه بعدي استفاده كردند تا تأثير آن را در انتقال برش بين لايه­هاي پانلي مورد بررسي قرار دهند [11]. کانگ با مطالعه روي پانل­هاي سه بعدي، رفتار كامپوزيتي و غيركامپوزيتي آن­ها را تحت بارگذاري خمشي گسترده مورد بررسي قرار داده است [12]. در پژوهشی كه توسط كبير و شادان انجام گرفته است، به بررسي رفتار ديناميكي يك قاب خمشي بتني تركيب شده با سيستم پانل سه بعدي پرداخته شده است [13]. مشعل و فیلیاترالت [14] در پژوهش‌های خود روي سيستم سازه­اي پانل سه بعدي، مقادير پارامترهاي عملكرد لرزه­اي شامل ضريب رفتار، ضريب كاهش شكل‌پذيري و ضريب مقاومت افزون را براي ساختمان­هاي يك و دو طبقه ساخته شده با اين سيستم سازه­اي هماهنگ با روند آيين­نامهFEMA. P-695 [15] بدست آوردند. ژانگ و اویادیجی روشی جدید برای شناسایی آسیب در تیرهای دارای ترک­های کوچک (با نسبت ارتفاع ترک به ارتفاع تیر کمتر از 5 درصد) ارائه دادند [16]. درمورد تشخیص خرابی در صفحات، بی سا و همکاران با استفاده از تبدیل موجک دوبعدی، روشی را ارائه دادند [17]. رضایی­فر 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]. کاتنین با استفاده از موجک­های ناپایدار تحت اثر انرژی­های مختلف به تجزیه و تحلیل شکل مودهای آسیب­دیده صفحات کامپوزیتی پرداخت [27]. یانگ و اویادیجی 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 سازماندهی­شده چندانی 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.

**2- آنالیز موجک[[4]](#footnote-4)**

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 تکینه[[5]](#footnote-5) در سیگنال­ها حساس هستند و می­توان از همین موضوع برای پیدا کردن تغییرات تند و ناگهانی در اشکال مودی، که اغلب نشان دهنده آسیب است، استفاده كرد.

آنالیز موجک در حالت کلی به دو صورت پیوسته و گسسته تعریف می­شوند که در ادامه به آنها پرداخته می­شود.

**1-2- آنالیز موجک پیوسته[[6]](#footnote-6)**

اگر x(t) یک سیگنال در بازه تا باشد، در این صورت آنالیز موجک پیوسته یک بعدی آن به­صورت رابطه 1 تعریف می­گردد:



که در آن پارامترهای به ترتیب پارامترهای انتقال[[7]](#footnote-7) و مقیاس[[8]](#footnote-8) می­باشند و  ضریب موجک نامیده می­شود.  نیز تابع موجک مادر نامیده می­شود و مزدوج مختلط  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.

**2-2- آنالیز موجک گسسته**[[9]](#footnote-9)

تبدیل موجک گسسته یک سیگنال یک بعدی S0(n) به­صورت رابطه 2 تعریف می­شود:

(2) در رابطه 2،  و  به ترتیب تقریبات[[10]](#footnote-10) و جزئیات[[11]](#footnote-11) یک سیگنال یک بعدی در سطح i ام است که در سطح i+1 از روابط 3 و 4 به­دست می­آیند.

(3) 

(4) 

در روابط 3 و 4،  و  به­ترتیب ضرایب فیلتر پایین­گذر 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.

**3- مشخصات مصالح و مدل اجزا محدود ساختمان پیش ساخته پانلی مورد بررسی**

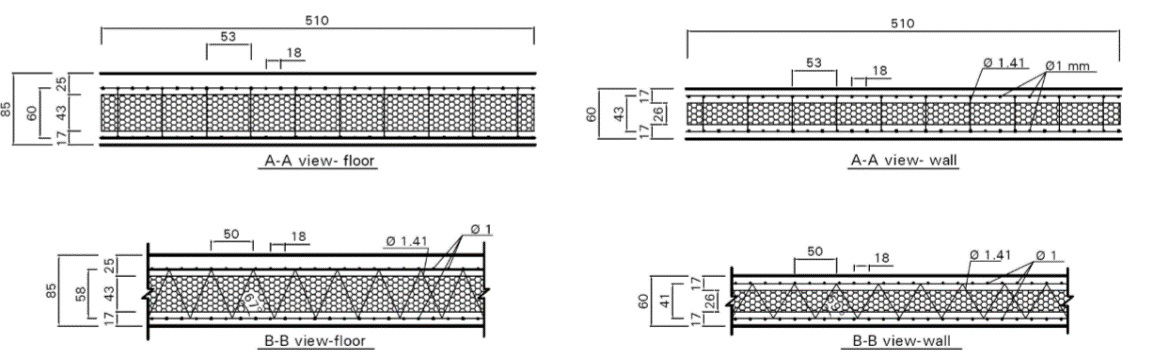
مدل در نظر گرفته شده برای این پژوهش، ساختمان چهار طبقه ساخته شده از پانل­های پیش­ساخته سه بعدی با مقیاس 2.35/1 روی میز لرزان دانشگاه صنعتی شریف تحت بارگذاری­های لرزه­ای مختلف است، به گونه‌ای که این لرزه­ها بتواند سطح جامعی از زلزله­ها از لحاظ انرژی و فرکانس را در بربگیرد [32]. در این لرزه­ها عکس العمل 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 2.35/1 است، کلیه ابعاد از جمله قطر میلگرد نیز مقیاس شده است. در شکل (1) 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

جدول 1- مشخصات مصالح مصرفی

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Compression Strength(MPa) | Tensile Strength(MPa) | Yield Stress(MPa) | Young Modulus(GPa) | Density(kg/m3) | Poisson Ratio | Material |
| - | 520 | 470 | 206 | 7855 | 0.28 | **Steel bars** |
| 24.6 | 2.8 | - | 15 | 2175 | 0.15 | **Shotcrete** |
| - | - | - | 0.02 | 10 | 0.17 | **Polystyrene** |

**Table 1.** Material Properties of Test Model

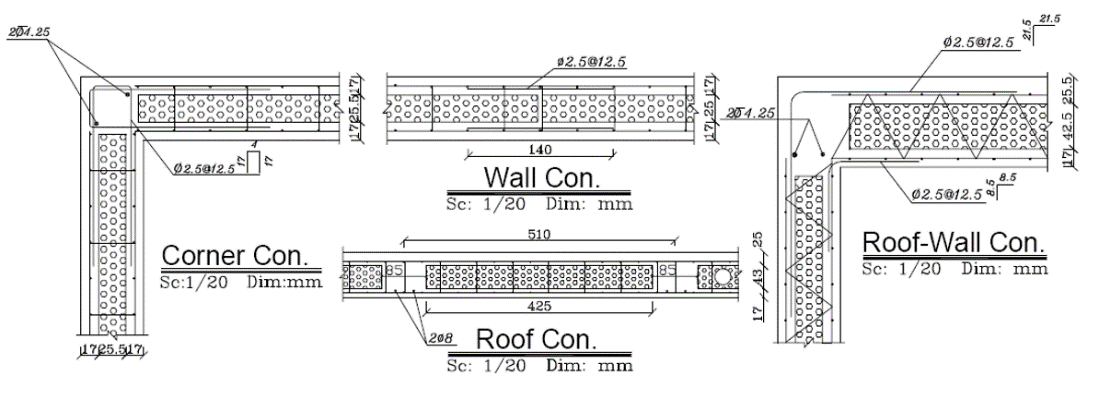
**شکل 1.** جزئیات پانل دیواری و سقفی مقیاس شده(ابعاد به میلی­متر)[32]



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

در شکل (2) جزئیات اتصال دیوارها و سقف­های سازه پانلی مقیاس شده برای مدل نشان داده شده است. همچنین مشخصات مصالح مصرفی به­طور خلاصه در جدول (1) ذکر شده است.

**شکل 2.** جزئیات اتصالات مقیاس شده(ابعاد به میلی­متر)[32]

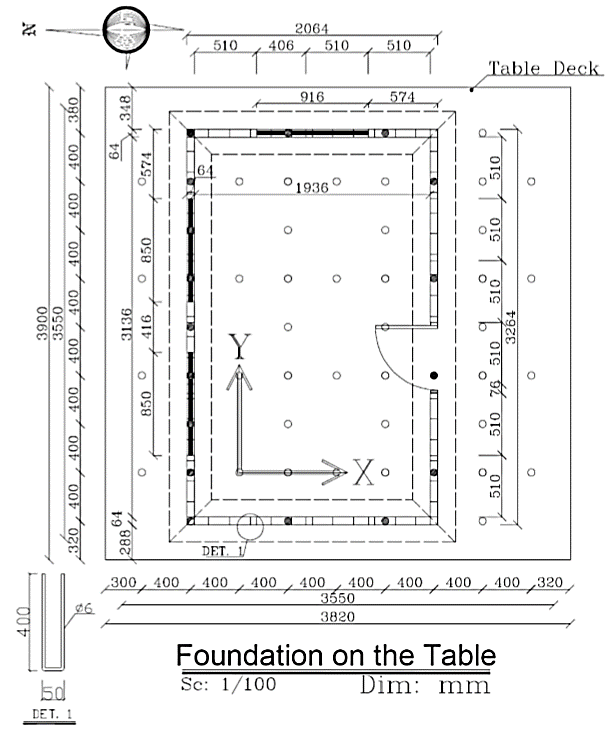


**Fig. 2.** Details of Scaled Connections (dimensions in mm) [32]

ابعاد اصلی سازه چهار طبقه دارای ابعاد به پلان 7/4 در 5/7 و ارتفاع 2/13 متر بوده است که با مقیاس 2.35/1 به ابعاد به پلان 2 در 2/3 و ارتفاع 6/5 متر تغییر پیدا می­کند. در شکل (3) پلان ساختمان چهار طبقه و میز لرزان به­همراه فونداسیون فلزی را به صورت دقیق روی آن به­همراه موقعیت آرماتورهای تقویتی نشان داده شده است. در شکل (4) محل قرارگیری ابزارهای اندازه­گیری اعم از جابه‌جایی­سنج، کرنش­سنج و شتاب­سنج و در شکل (5) نماهای کلی ساختمان در مجموعه آزمایشگاهی میز لرزان دانشگاه صنعتی شریف نشان داده شده است. برای مدل­سازی ساختمان چهار طبقه در نرم­افزار آباکوس 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 (1) 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.

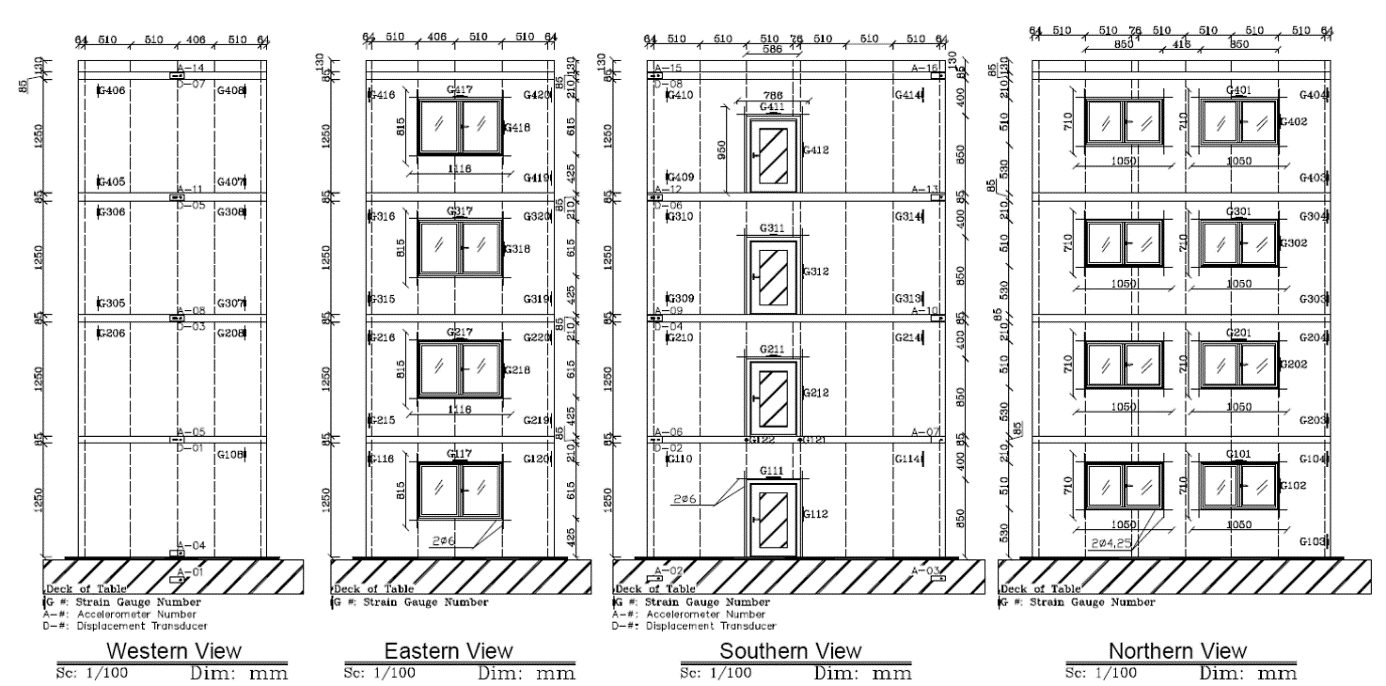
**شکل 3.** پلان ساختمان چهار طبقه و جزئیات میز لرزان، فونداسیون و آرماتورهای تقویتی مقیاس شده(ابعاد به میلی­متر)[32]



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

به منظور درستی‌‌‌آزمایی مدل اجزا محدود، نتایج تحلیل مودال مدل آزمایشگاهی و مدل اجزا محدود سازه سالم برای سه مود اصلی انتقالی و دورانی سازه در جدول (2) نشان داده شده است. همان­گونه که در جدول مشخص است، هماهنگی مناسبی بین نتایج دو مدل برقرار است. همچنین در شکل (6)، شکل سه مود اصلی انتقالی و دورانی سازه سالم، ترسیم شده است.

**شکل 4.** محل قرارگیری ابزارهای اندازه­گیری(ابعاد به میلی­متر)[32]



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

شکل 5. نماهای کلی ساختمان در مجموعه آزمایشگاهی میز لرزان[32]

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  |  |  |  |

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

**شکل 6.** شکل مودهای سازه سالم

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| C:\Users\Home\Desktop\Article1-Fa\mode3z.jpg  C) Third Mode  (Z torsional effect) | C:\Users\Home\Desktop\Article1-Fa\mode2y.jpg  B) Second Mode (combined effect of transition Y and torsional Z) | C:\Users\Home\Desktop\Article1-Fa\mode1x.jpg  A) First Mode(combined effect of transition X and torsional Z) |

**Fig. 6.** Shapes of Mode for an Undamaged Structure

**4- بررسی تغییرات فرکانسی و شکل مودی**

عکس‌العمل سازه تحت لرزه­های مختلف با نصب ابزارهای دقیق اندازه­گیری شده است و رفتار واقعی سازه تحت زمین لرزه برآورد شده است. در شکل (7) ترک­های ایجاد شده پس از لرزه ناغان-135درصد آزمایشگاهی(منظور از 135 درصد یعنی رکوردهای شتاب، سرعت و جابه‌جایی زلزله واقعی ناغان، 35 درصد افزایش یافته است) نشان داده شده است. با توجه به شکل (7) به خوبی قابل مشاهده است که بخش عمده­ای از انرژی زلزله در طبقه اول و بخش کمتری در طبقه دوم با وارد شدن سازه به ناحیه غیر خطی تلف می­شود. 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 این مکان­ها است. نتایج تحلیل مدل آزمایشگاهی و مدل اجزا محدود سازه آسیب دیده پس از لرزه ناغان-135 درصد برای سه مود اصلی انتقالی و دورانی سازه در جدول (3) نشان داده شده است. همان­گونه که در جدول (3) مشخص است، هماهنگی مناسبی بین نتایج دو مدل برقرار است.

در صورت هماهنگی کامل شکل مودهای سازه سالم و آسیب دیده، هیچ­گونه خرابی در سازه وجود ندارد؛ بنابراین اگر چنانچه بتوان میزان همبستگی شکل مودهای سازه سالم و آسیب دیده مودهای مختلف را بررسی نمود، می­توان 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 [[12]](#footnote-12)(MAC) است که با رابطه 5 به صورت زیر بیان می­شود [33]:



در رابطه مذکور،  و  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 نشان­دهنده هماهنگی کامل شکل مودها(عدم وجود آسیب) و مقادیر کمتر از یک نشان­دهنده عدم هماهنگی شکل مودها(وجود آسیب) در سازه است. در جدول (4) 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 تائید است. در جدول (5) 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 تائید می‌نماید.

**جدول 2.** مقایسه نتایج تحلیل مودی مدل آزمایشگاهی و مدل اجزا محدود سازه سالم

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Error(%) | | Results of Modal Analysis of the Finite Element Model | | Results of Modal Analysis of the Experimental Model | |  |
| Period (seconds) | Frequency (Hz) | Period (seconds) | Frequency (Hz) | Period (seconds) | Frequency (Hz) | **Mode** |
| 2.24 | 2.67 | 0.174 | 5.76 | 0.178 | 5.61 | **1** |
| 0.73 | 1.08 | 0.137 | 7.29 | 0.136 | 7.37 | **2** |
| 9.23 | 8.58 | 0.071 | 14.17 | 0.065 | 15.50 | **3** |

**Table 2.** Comparison of Modal Analysis Results of Experimental Model and Finite Element Model of 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 cرا می­توان از تعادل نیروها با رابطه 6 به صورت زیر بیان نمود:



**جدول 3.** مقابسه نتایج تحلیل مودی مدل آزمایشگاهی و مدل اجزا محدود سازه آسیب دیده

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

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

جدول 4- مقادیر معیار همبستگی شکل مودها

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

**Table 4.** Modal Assurance Criterion(MAC)

**جدول 5.** زاویه بین بردار شکل مودهای سالم و آسیب دیده(درجه)

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

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

**جدول 6.** مقادیر فرکانس­های طبیعی سازه سالم و آسیب دیده مدل اجزا محدود

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

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

**شکل 11.** نمودارهای تابع coif5 حاصل از تحلیل موجک اختلاف شکل مودهای سه مود اصلی سازه مربوط به طبقه اول-بالای بازشوهای نمای شمالی

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Third mode | Second mode | First mode |

**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

جواب عمومی معادله مشخصه رابطه (6)، 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 (7) قابل محاسبه هستند.



به روشنی، کوچک­ترین تغییر در ماتریس سختی سازه با تغییرات در ماتریس فرکانس­های طبیعی همراه خواهد بود. در جدول (6) فرکانس­های طبیعی 14 مود اول سازه پانلی در حالت­های سالم و آسیب دیده تحت زلزله ناغان-135درصد مدل اجزا محدود آورده شده است. همچنین در شکل (8) 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 تائیدی بر وجود خرابی در سازه پانلی است.

**شکل 8.** نمودار درصد تغییرات فرکانس­های طبیعی سازه سالم و آسیب دیده

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

**شکل 9.** نمودارهای تابع coif5 حاصل از تحلیل موجک اختلاف شکل مودهای سه مود اصلی سازه مربوط به طبقه اول نمای جنوبی

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Third mode | Second mode | First mode |

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

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Third mode | Second mode | First mode |

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

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Third mode | Second mode | First mode |

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

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Third mode | Second mode | First mode |

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

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Third mode | Second mode | First mode |

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

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Third mode | Second mode | First mode |

**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

**5- شناسایی محل وقوع خرابی**

امروزه روش­های نوینی برای شناسایی خرابی در سازه­ها ابداع شده و یک روش مفید و کارا در این زمینه، ارزیابی­های 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 روش­ها 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، 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.

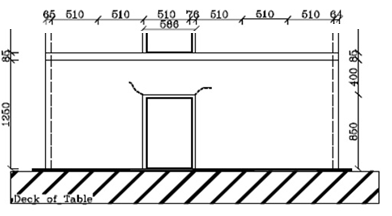
**1-5- تشخیص خرابی­های نمای جنوبی سازه**

در شکل (9) نمودارهای تابع coif5 حاصل از تحلیل موجک اختلاف شکل مودهای سه مود اصلی انتقالی و دورانی مربوط به طبقه اول نمای جنوبی سازه آوره شده است. نمودارها نشان می­دهد با توجه به نتایج آزمایشگاهی موقعیت خرابی به کمک تابع coif5 با پارامتر مقیاس 8 با موفقیت شناسایی شده و در محل خرابی اغتشاش بیشتری از ضرایب موجک در شکل­ها وجود دارد.

**شكل 16**. مقایسه­ی شناسایی محل ترک­های ایجاد شده آزمایشگاهی، اجزا محدود و روش آنالیز موجک مربوط به طبقه اول نمای جنوبی سازه



**Experimental**

****

**Finite elements**



**Wavelet Analysis**

**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

**2-5- تشخیص خرابی­های نمای شمالی سازه**

در شکل­های (10 تا 13) 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 آوره 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.

**3-5- تشخیص خرابی­های نمای شرقی سازه**

در شکل­های(14 و 15) نمودارهای تابع coif5 حاصل از تحلیل موجک اختلاف شکل مودهای سه مود اصلی انتقالی و دورانی مربوط به طبقه اول نمای شرقی سازه آوره 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.

**6- نتایج و تفسیر آن­ها**

بررسی‌های مقایسه‌ای 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 (9 تا 15) 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 %8 شناسایی می‌گردد. نتایج این بررسی‌ها برای نماهای مختلف سازه برای سه مود اصلی انتقالی و دورانی برای تابع coif5 با پارامتر مقیاس 8 در جدول (7) 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 8 در جدول (8) گزارش شده است. مشاهده می‌شود که مرکز واقعی خرابی‌ها بر مبنای مینیمم ضرایب موجک در شدت‌های مختلف با خطای ناچیز کمتر از %8 شناسایی شده و با افزایش شدت خرابی‌ها، مینیمم ضرایب موجک کاهش می‌یابد.

**7- 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 (9) مقایسه اثر پارامتر مقیاس(S) 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 8 بیش­ترین درصد دقت در شناسایی موفق خرابی با توجه به نتایج آزمایشگاهی در مقایسه با سایر پارامترها را دارد.

**8-جمع­بندی تشخیص خرابی ساختمان پیش ساخته پانلی کامل**

نتایج مربوط به شناسایی خرابی در نماهای مختلف سازه مربوط به سه مود اصلی انتقالی و دورانی سازه نشان می­دهد تابع coif5 با پارامتر مقیاس 8 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 (16)، مقایسه نتایج آزمایشگاهی و تحلیل عددی مربوط به طبقه اول نمای جنوبی سازه نشان دهنده دقت بالای شناسایی آسیب به کمک این تابع می­باشد.

**جدول 7.** شناسایی مرکز خرابی­ها بر مبنای ماکزیمم ضرایب موجک

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Error(%) | Damage Detected Center (mm) | Actual Center of Damage  (mm) | Maximum Wavelet Coefficients | Mode | Damage Range  (mm) | Location | Story | View |
| 4.06 | 1024 | 984 | 1.9\*10-3 | 1 | 884-1084 | Above Opening | First | **Southern** |
| 4.06 | 1024 | 984 | 32\*10-3 | 2 |
| 4.06 | 1024 | 984 | 36\*10-3 | 3 |
| 5.65 | 1670 | 1770 | 1.8\*10-3 | 1 | 1670-1870 |
| 5.65 | 1670 | 1770 | 33\*10-3 | 2 |
| 5.65 | 1670 | 1770 | 34\*10-3 | 3 |
| 2.04 | 1750 | 1715 | 1.9\*10-3 | 1 | 1590-1840 | Bottom Openings | First | **Northern** |
| 2.04 | 1750 | 1715 | 2.4\*10-3 | 2 |
| 2.04 | 1750 | 1715 | 7.5\*10-3 | 3 |
| 1.46 | 2700 | 2740 | 1.3\*10-3 | 1 | 2690-2790 |
| 1.46 | 2700 | 2740 | 1.9\*10-3 | 2 |
| 1.46 | 2700 | 2740 | 5.9\*10-3 | 3 |
| 6.40 | 515 | 484 | 1.8\*10-3 | 1 | 324-574 | Above Openings |
| 6.40 | 515 | 484 | 28\*10-3 | 2 |
| 6.40 | 515 | 484 | 44\*10-3 | 3 |
| 1.63 | 1450 | 1474 | 1.2\*10-3 | 1 | 1424-1524 |
| 1.63 | 1450 | 1474 | 15\*10-3 | 2 |
| 1.63 | 1450 | 1474 | 18\*10-3 | 3 |
| 0.56 | 1800 | 1790 | 1.1\*10-3 | 1 | 1740-1840 |
| 0.56 | 1800 | 1790 | 19\*10-3 | 2 |
| 0.56 | 1800 | 1790 | 31\*10-3 | 3 |
| 2.31 | 2750 | 2815 | 1.2\*10-3 | 1 | 2690-2940 |
| 2.31 | 2750 | 2815 | 26\*10-3 | 2 |
| 2.31 | 2750 | 2815 | 28\*10-3 | 3 |
| 5.92 | 555 | 524 | 2.8\*10-3 | 1 | 474-574 | Bottom Openings | Second |
| 5.92 | 555 | 524 | 28\*10-3 | 2 |
| 5.92 | 555 | 524 | 30\*10-3 | 3 |
| 1.08 | 1490 | 1474 | 0.85\*10-3 | 1 | 1424-1524 | Above Openings |
| 1.08 | 1490 | 1474 | 1\*10-3 | 2 |
| 1.08 | 1490 | 1474 | 15\*10-3 | 3 |
| 0.56 | 1800 | 1790 | 0.75\*10-3 | 1 | 1740-1840 |
| 0.56 | 1800 | 1790 | 0.95\*10-3 | 2 |
| 0.56 | 1800 | 1790 | 20\*10-3 | 3 |
| 6.85 | 1495 | 1605 | 1.8\*10-3 | 1 | 1490-1740 | Bottom Opening | First | **Eastern** |
| 6.85 | 1495 | 1605 | 14\*10-3 | 2 |
| 6.85 | 1495 | 1605 | 36\*10-3 | 3 |
| 7.66 | 535 | 494 | 14\*10-3 | 1 | 374-574 | Above Opening |
| 7.66 | 535 | 494 | 18\*10-3 | 2 |
| 7.66 | 535 | 494 | 38\*10-3 | 3 |
| 7.23 | 1475 | 1590 | 14\*10-3 | 1 | 1490-1690 |
| 7.23 | 1475 | 1590 | 17\*10-3 | 2 |
| 7.23 | 1475 | 1590 | 37\*10-3 | 3 |

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

**جدول 8.** شناسایی مرکز خرابی­ها بر مبنای مینیمم ضرایب موجک

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Error(%) | Damage Detected Center (mm) | Actual Center of Damage  (mm) | Minimum Wavelet Coefficients | Mode | Damage Range  (mm) | Location | Story | View |
| 1.63 | 1000 | 984 | -2.3\*10-3 | 1 | 884-1084 | Above Opening | First | **Southern** |
| 1.63 | 1000 | 984 | -32\*10-3 | 2 |
| 1.63 | 1000 | 984 | -39\*10-3 | 3 |
| 4.52 | 1690 | 1770 | -2.3\*10-3 | 1 | 1670-1870 |
| 4.52 | 1690 | 1770 | -35\*10-3 | 2 |
| 4.52 | 1690 | 1770 | -37\*10-3 | 3 |
| 4.96 | 1800 | 1715 | -2.1\*10-3 | 1 | 1590-1840 | Bottom Openings | First | **Northern** |
| 4.96 | 1800 | 1715 | -2.3\*10-3 | 2 |
| 4.96 | 1800 | 1715 | -7\*10-3 | 3 |
| 0.36 | 2750 | 2740 | -1.3\*10-3 | 1 | 2690-2790 |
| 0.36 | 2750 | 2740 | -1.5\*10-3 | 2 |
| 0.36 | 2750 | 2740 | -5.8\*10-3 | 3 |
| 7.43 | 520 | 484 | -2.1\*10-3 | 1 | 324-574 | Above Openings |
| 7.43 | 520 | 484 | -23\*10-3 | 2 |
| 7.43 | 520 | 484 | -37\*10-3 | 3 |
| 0.27 | 1470 | 1474 | -1.4\*10-3 | 1 | 1424-1524 |
| 0.27 | 1470 | 1474 | -14\*10-3 | 2 |
| 0.27 | 1470 | 1474 | -19\*10-3 | 3 |
| 2.23 | 1750 | 1790 | -1.2\*10-3 | 1 | 1740-1840 |
| 2.23 | 1750 | 1790 | -23\*10-3 | 2 |
| 2.23 | 1750 | 1790 | -27\*10-3 | 3 |
| 4.08 | 2700 | 2815 | -1.65\*10-3 | 1 | 2690-2940 |
| 4.08 | 2700 | 2815 | -23\*10-3 | 2 |
| 4.08 | 2700 | 2815 | -30\*10-3 | 3 |
| 7.25 | 565 | 524 | -2.1\*10-3 | 1 | 474-574 | Bottom Openings | Second |
| 7.25 | 565 | 524 | -28\*10-3 | 2 |
| 7.25 | 565 | 524 | -30\*10-3 | 3 |
| 0.41 | 1480 | 1474 | -1.1\*10-3 | 1 | 1424-1524 | Above Openings |
| 0.41 | 1480 | 1474 | -1.45\*10-3 | 2 |
| 0.41 | 1480 | 1474 | -16\*10-3 | 3 |
| 3.35 | 1850 | 1790 | -0.85\*10-3 | 1 | 1740-1840 |
| 3.35 | 1850 | 1790 | -1.30\*10-3 | 2 |
| 3.35 | 1850 | 1790 | -18\*10-3 | 3 |
| 7.78 | 1480 | 1605 | -1.7\*10-3 | 1 | 1490-1740 | Bottom Opening | First | **Eastern** |
| 7.78 | 1480 | 1605 | -17\*10-3 | 2 |
| 7.78 | 1480 | 1605 | -27\*10-3 | 3 |
| 4.08 | 515 | 494 | -18\*10-3 | 1 | 374-574 | Above Opening |
| 4.08 | 515 | 494 | -21\*10-3 | 2 |
| 4.08 | 515 | 494 | -37\*10-3 | 3 |
| 6.29 | 1490 | 1590 | -18\*10-3 | 1 | 1490-1690 |
| 6.29 | 1490 | 1590 | -21\*10-3 | 2 |
| 6.29 | 1490 | 1590 | -33\*10-3 | 3 |

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

**جدول 9.** مقایسه اثر پارامتر مقیاس(S) در تشخیص خرابی برای تابع موجک coif5

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

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

**9- نتيجه­گيري**

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، امرزوه 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 تاثیر دارد، بدست آمده است. خطای کمتر از 5/2 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 تائید 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 8 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 %8 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 حالی­که 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. علاوه­براین در روند کاهش سختی سازه، طبقات اول و دوم نقش مهمتری ایفا نموده و اطراف بازشوها از نقاط حساس سازه است که ترک‌ها از آنجا شروع می­شود و دلیل آن وجود تمرکز تنش در این مکان­ها است.

**10- 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 structural wall system. Engineering Structures. 33, 2049-2062.
11. Elkashef, M. and Mooty, M.A. (2014). Investigating the use of autoclaved aerated concreteas 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). 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). Debbonding damage detection in concrete filled tube columns by experimental modal data. Journal of Structural and Construction Engineering (JSCE). (in persian)
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 Detection in Precast Panel Building Tested by Continuous Wavelet Analysis Analytical Method**

**Mojtaba Hanteh1, Omid Rezaifar2\*, 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](mailto:*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.

1. . Structural Health Monitoring [↑](#footnote-ref-1)
2. . Local Methods [↑](#footnote-ref-2)
3. . Global Methods [↑](#footnote-ref-3)
4. . Wavelet Transform [↑](#footnote-ref-4)
5. . Singularities [↑](#footnote-ref-5)
6. . Continuous Wavelet Transform [↑](#footnote-ref-6)
7. . Translation [↑](#footnote-ref-7)
8. . Scaling [↑](#footnote-ref-8)
9. . Discrete Wavelet Trans form [↑](#footnote-ref-9)
10. . Approximations [↑](#footnote-ref-10)
11. . Details [↑](#footnote-ref-11)
12. Modal Assurance Criterion(MAC) [↑](#footnote-ref-12)