Archive of SID

# تعیین محل خرابی در ساختمان اسکلت فولادی با استفاده از آنالیز موجکِ پاسخ‌های شتاب گره‌ها و مود اول ارتعاشی سازه

**صادق گریزی نسب**
دانشجوی کارشناسی ارشد عمران، سازه، دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول، ایران
sadegh.gorizinasab@gmail.com

**پنام زرفام**
استادیار گروه عمران زلزله، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران، ایران
zarfam@srbiau.ac.ir

**چکیده**

با گذشت زمان و فرسوده شدن سازه‌ها در اثر عوامل مخرب از جمله زلزله، امکان ایجاد آسیب در سازه وجود دارد. به همین دلیل سازه‌ها در طول عمر خود به مراقبت و نگهداری نیاز دارند. به طور کلی روش‌های شناسایی آسیب در سازه‌ها، تحت عنوان سیستم پایش سلامت سازه‌ها شناخته می‌شوند. در این تحقیق، هدف، شناسایی آسیب در اسکلت یک ساختمان فولادی می‌باشد. به همین جهت یک سازه اسکلت فولادی به عنوان نمونه مورد مطالعه، در نرم‌افزار انسیس مدل شده و پس از ایجاد آسیب در برخی المان‌ها و همچنین وارد کردن شتابنگاشت زلزله طبس به سازه، پاسخ شتاب گره‌های مختلف با استفاده از یک تحلیل تاریخچه زمانی و پاسخ مود اول ارتعاشی سازه با استفاده از آنالیز مودال بر روی سازه، برداشت شده است. پس از آن، پاسخ شتاب گره‌های مختلف و همچنین مود اول ارتعاشی سازه، تحت آنالیز موجک قرار گرفته و اثر آسیب ایجاد شده بر روی نمودار ضرایب موجک بررسی شده است. در حالت استفاده از پاسخ شتاب گره‌ها، بررسی‌ها نشان داد که اثر آسیب بر روی پاسخ شتاب گره‌های نزدیک به آسیب بیشتر از گره‌های دور از آسیب بوده و در واقع با نزدیک شدن به آسیب پرش ایجاد شده در نمودار ضرایب موجک در لحظه ایجاد شدن آسیب افزایش می‌یابد. لذا از این روش می‌توان جهت تعیین محدوده آسیب ایجاد شده در سازه استفاده نمود. در حالت استفاده از پاسخ مود ارتعاشی اول سازه نیز بررسی‌ها نشان داد که استفاده از آنالیز موجک پاسخ مود ارتعاشی اول سازه کارایی بالایی در شناسایی محل دقیق آسیب در اعضای اسکلت سازه دارا می‌باشد. لذا از این روش می‌توان جهت تعیین محل دقیق آسیب ایجاد شده در سازه استفاده نمود.

**کلمات کلیدی**: پایش سلامت سازه‌ها، شناسایی آسیب، ساختمان اسکلت فولادی، آنالیز موجک، آنالیز تاریخچه زمانی، شتاب سازه، مود ارتعاشی اول سازه، آنالیز مودال


www.SID.ir

Archive of SID

**مقدمه**

لزوم شناسایی مقدار و محل خرابی در سازه‌ها بسیار حائز اهمیت است. با استفاده از روش‌های شناسایی خرابی در سازه‌ها می‌توان موقعیت خرابی در سازه آسیب دیده را شناسایی و با انجام اقدامات ترمیمی لازم، از گسترش آسیب در سازه جلوگیری نموده و عمر سازه را افزایش داد. پایش سلامت سازه‌ها عبارتست از پیاده سازی روشی جهت شناسایی آسیب در سازه‌های مهندسی. در اینجا آسیب به عنوان تغییر در خصوصیات مواد و یا هندسه سازه تعریف شده است (فولادقدم و غفوری، ۱۳۹۴). در سال‌های اخیر، موضوع پایش سلامت سازه‌ها، مورد توجه فراوان قرارگرفته است. از این رو تحقیقات زیادی در رابطه با ارائه یک روش بهینه جهت شناسایی آسیب در سازه‌ها صورت پذیرفته است. در این تحقیق، جهت شناسایی آسیب در ساختمان با اسکلت فولادی از روش آنالیز موجک استفاده شده است. این آنالیز، پاسخ سازه را که توسط سنسورهای کارگذاشته شده بر روی بدنه سازه برداشت می‌شود، به عنوان ورودی دریافت کرده و محل آسیب احتمالی را نمایش می‌دهد. نوع پاسخ سازه که در این روش مورد آنالیز قرار می‌گیرد از اهمیت فراوانی برخوردار می‌باشد و محققان درسال‌های اخیر پاسخ‌های متفاوتی از قبیل مودهای ارتعاشی،تغییرشکل‌های سازه، شتاب سازه و ... را مورد بررسی قرار داده‌اند. در این تحقیق جهت بررسی میزان کارایی روش آنالیز موجک، از پاسخ‌های شتاب گره‌ها و مود اول ارتعاشی سازه، جهت شناسایی محل آسیب‌های بوجود آمده در سازه استفاده شده است.

**مبانی تبدیل موجک**

تبدیل موجک، یک تبدیل ریاضی است که چنانچه بر تابع یا سیگنال دلخواهی مثل f(t) عمل کند، نقاط گسستگی و یا محل تغییر شیب‌های ناگهانی آن تابع (یا سیگنال) را، هرچقدر هم که کوچک و نامشهود باشند، به نحو بارز و چشم‌گیری تقویت می‌کند؛ به صورتی که با یک وارسی ساده، محل این ناپیوستگی‌ها مشخص و شناسایی می‌شوند (کوینونس و همکاران، ۲۰۱۵).

تبدیل موجک پیوسته به عنوان روشی جایگزین بر تبدیل فوریه زمان-کوتاه ارائه گردید و هدف آن، فائق آمدن بر مشکلات مربوط به رزولوشن در تبدیل فوریه زمان-کوتاه است. در آنالیز موجک، مشابه با تبدیل فوریه زمان-کوتاه، سیگنال مورد نظر در یک تابع(موجک) ضرب می‌شود که در حقیقت نقش همان تابع پنجره را دارد. همچنین به طور مشابه با قبل، تبدیل موجک نیز به‌طور جداگانه بر روی قطعه‌های زمانی مختلف سیگنال انجام می‌شود. براین اساس تبدیل موجک پیوسته به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$CWT_x^{\psi}(\tau,s) = \frac{1}{\sqrt{|s|}} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)\psi^*\left(\frac{t-\tau}{s}\right) dt \qquad (۱)$$

که درآن $\tau$ و s به ترتیب پارامترهای انتقال و مقیاس می‌باشند. مفهوم انتقال دقیقا مشابه با مفهوم انتقال زمانی در تبدیل فوریه زمان-کوتاه است که میزان جابجایی پنجره را معلوم می‌کند و به وضوح، اطلاعات زمانی را دربردارد. اما برخلاف تبدیل فوریه زمان-کوتاه در تبدیل موجک به‌طور مستقیم پارامتر فرکانس نداریم. در عوض، پارامتر مقیاس را داریم که به‌طور معکوس با فرکانس ارتباط دارد. به عبارت دیگر s = 1/f (جنتیل و مسینا، ۲۰۰۳).

در رابطه۱، $\psi$ تابع پنجره است که اصطلاحا موجک مادر نامیده می‌شود. واژه موجک به معنای موج کوچک است و دلیل استفاده از واژه کوچک، محدود بودن و کوتاه بودن تابع پنجره می‌باشد. علت استفاده از واژه موج نیز به دلیل ماهیت نوسانی این تابع است. واژه مادر نیز به این منظور به کار برده می‌شود که تمامی نسخه‌های انتقال یافته و مقیاس شده، همگی از روی یک تابع اولیه بدست می‌آیند که اصطلاحا موجک مادر نامیده می‌شود. به بیان علمی، موجک مادر، یک تابع الگو جهت تولید سایر پنجره‌ها می‌باشد (جنتیل و مسینا، ۲۰۰۳).


www.SID.ir

Archive of SID

آنچنانکه پیش از این عنوان شد، در تبدیل موجک به جای فرکانس، پارامتر مقیاس وجود دارد. همانگونه که از معنی این پارامتر برمی‌آید، نوعی مفهوم مقیاس درون آن نهفته است. درست به مانند مفهوم مقیاس در نقشه، در تبدیل موجک نیز مقیاس‌های بزرگ، متناظر با یک دید کلی و فارغ از جزئیات به سیگنال است (متناظر با فرکانس‌های پائین) و مقیاس‌های کوچک، متناظر با نگاه به جزئیات سیگنال است و لذا در تناظر با فرکانس‌های بالا خواهد بود. مقیاس کردن، به عنوان یک اپراتور ریاضی، سیگنال را منقبض یا منبسط می‌کند. بدین سان، در مقیاس‌های بالا که سیگنال منبسط می‌شود، جزئیات را خواهیم داشت و در مقیاس‌های پائین که سیگنال منقبض می‌شود، کلیات را خواهیم داشت. توجه داریم که متغیر مقیاس در تعریف تبدیل موجک، در مخرج ظاهر شده است. بنابراین به ازای مقادیر $s > 1$ سیگنال منبسط شده و به ازای $s < 1$ سیگنال فشرده می‌گردد (جنتیل و مسینا، ۲۰۰۳).

رابطه ۱ را می‌توان به صورت ضرب داخلی سیگنال و یک تابع پایه به فرم زیر نوشت:

$$CWT_x^{\psi}(\tau,s) = < x(t).\psi_{\tau,s}(t) > \quad (۲)$$

که در آن:

$$\psi_{\tau,s}(t) = \frac{1}{\sqrt{|s|}}\psi(\frac{t-\tau}{s}) \quad (۳)$$

با تعریف ارائه شده در رابطه ۲ که به صورت ضرب داخلی بیان شده است، می‌توان این گونه برداشت کرد که تبدیل موجک در حقیقت اندازه‌گیری شباهت بین سیگنال و توابع پایه (موجک‌ها) است. منظور از شباهت در این بحث، شباهت سنجی بین محتوای فرکانسی است. به بیان دیگر، ضرایب تبدیل موجک بیانگر میزان نزدیکی سیگنال به موجک در مقیاس موردنظر است. بدین ترتیب، اگر سیگنال موردنظر یک مؤلفه برجسته در فرکانس متناظر با مقیاس مورد تحلیل داشته باشد، در این صورت موجک مقیاس شده، شبیه سیگنال موردنظر خواهد بود. بنابراین ضریبی از تبدیل موجک پیوسته که در این مقیاس محاسبه می‌شود مقداری نسبتاً بزرگ خواهد داشت (جنتیل و مسینا، ۲۰۰۳).

اصول تبدیل موجک گسسته به روشی تحت عنوان کدینگ زیرباند برمی‌گردد که در سال ۱۹۷۶ سنگ‌بنای اولیه آن گذارده شد. ایده اصلی این روش نیز مشابه تبدیل موجک پیوسته است که در آن نوعی توصیف زمان-مقیاس از سیگنال گسسته با استفاده از فیلترهای دیجیتال ارائه می‌گردد. همانطور که بیان شد، تبدیل موجک، حاصل شباهت سنجی(کورولیشن) بین محتوای فرکانسی(مقیاسی) سیگنال و تابع موجک در مقیاس‌های مختلف است. در حالت گسسته، فیلترهایی با فرکانس قطع‌های مختلف برای تحلیل سیگنال در مقیاس‌های متفاوت به کار برده می‌شود. با عبور سیگنال از فیلترهای بالاگذر و پایین‌گذر، فرکانس‌های مختلف آن تحلیل می‌شود. به طور معمول، این روند تغییر نرخ نمونه‌ها بر روی یک شبکه Dyadic با $s_0 = 2$ و $\tau_0 = 1$ انجام می‌پذیرد. بنابراین مقیاس‌ها و شیفت‌های زمانی متناظر عبارتند از $s = 2^j$ و $\tau = k2^j$ (بچاری صالح و همکاران، ۱۳۸۸).


www.SID.ir

Archive of SID

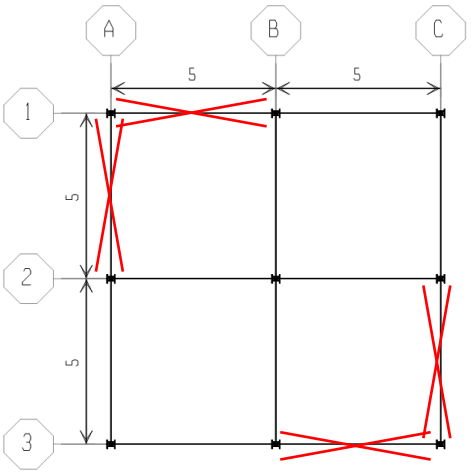
## نمونه مورد مطالعه و مدلسازی

مشخصات کلی سازه به شرح جدول۱ فرض شده اند:

**جدول۱- مشخصات کلی سازه نمونه مورد بررسی**

| | |
|---|---|
| موقعیت سازه | دزفول |
| کاربری سازه | مسکونی |
| تعداد طبقات | ۵ طبقه |
| ارتفاع طبقات | ۳ متر |
| سیستم باربر جانبی | در هر دوجهت مهاربند همگرای فولادی |
| نوع خاک | نوع ۳ |

پلان سازه نمونه مورد بررسی و همچنین محل جانمایی مهاربندها در شکل۱ قابل مشاهده است.




**شکل ۱-پلان سازه و محل جانمایی مهاربندها**

مشخصات مصالح فولادی مورد استفاده به شرح جدول۲ می‌باشند:

**جدول۲- مشخصات مصالح فولادی مورد استفاده**

| | |
|---|---|
| وزن مخصوص | 7850 $kg/m^3$ |
| مدول الاستیسیته | $2\times10^{10}$ $kg/m^2$ |
| نسبت پواسون | 0.3 |

مقاطع فرض شده برای اعضای مختلف اسکلت به شرح جدول۳ می‌باشند.

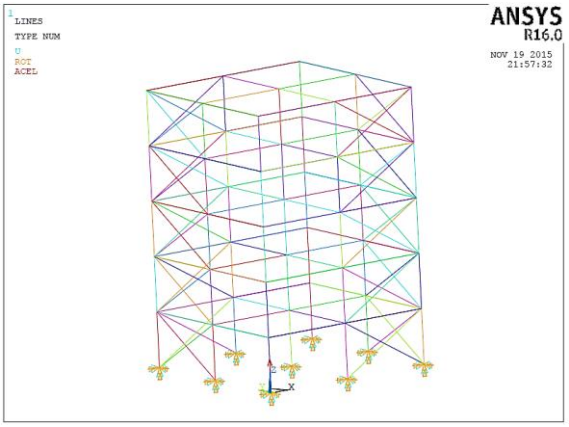
**جدول۳- مقاطع مورد استفاده**

| | |
|---|---|
| مقطع تیرها | IPE 160 |
| مقطع ستون‌ها | 2IPE 160 |
| مقطع بادبندها | 2UNP 100 |


www.SID.ir

Archive of SID

پس از ساخت مدل، اقدام به مش‌بندی مدل می‌نماییم. سازه مورد نظر از المان‌های خطی شامل تیر، ستون و بادبند تشکیل شده است به همین دلیل جهت المان‌بندی مدل از المان beam188 استفاده شده است. این المان دارای دو گره و سه درجه آزادی انتقالی و سه درجه آزادی دورانی در جهات x,y,z می‌باشد. در این مرحله مقاطع اعضای مختلف اسکلت ساختمان و همچنین نوع مصالح مورد استفاده در این اعضا که به نرم‌افزار معرفی شده بودند به تیرها و ستون‌ها و بادبندها اختصاص داده شده و سپس سازه المان بندی می‌شود.

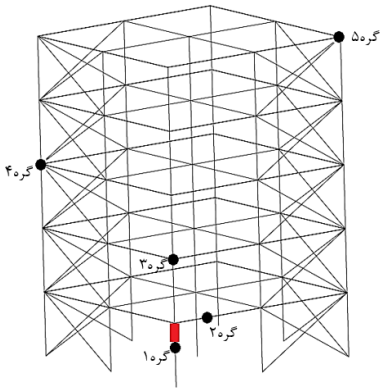



**شکل۲- مدل ترسیم‌شده در نرم‌افزار**

### شناسایی آسیب با استفاده از آنالیز موجک شتاب گره‌ها

در این مرحله سازه تحت ترکیب بارهای وزن و زلزله، تحلیل شده است. بار وزن اجزای تشکیل دهنده اسکلت (تیر،ستون و بادبند) که به صورت خودکار و با معرفی کردن شتاب جاذبه زمین به مقدار ۹,۸۰۶ متر بر مجذور ثانیه به نرم افزار، به سازه اعمال می شود. بار زلزله نیز با معرفی اطلاعات مربوط به شتابنگاشت زلزله طبس به نرم‌افزار بر روی سازه مدل می‌شود. لازم به ذکر است که جهت کاهش حجم محاسبات فقط بار ۱۰ ثانیه اول زلزله طبس به سازه وارد شده است.

جهت ایجاد آسیب در سازه، یک المان در یکی از ستون‌های طبقه همکف، انتخاب و مدول الاستیسیته آن به میزان ۳۰درصد، به عنوان نشانه‌ای از آسیب، کاهش داده شد. در شکل۴ محل المان آسیب دیده و همچنین گره‌هایی که شتاب آنها جهت بررسی میزان تاثیر آسیب ایجاد شده بر روی نمودار شتاب-زمان گره‌ها، برداشت شده است، نشان داده شده است. لازم به ذکر است که آسیب ایجاد شده به صورت ناگهانی، در حین زلزله ده ثانیه‌ای و در ثانیه پنجم ایجاد شده است.

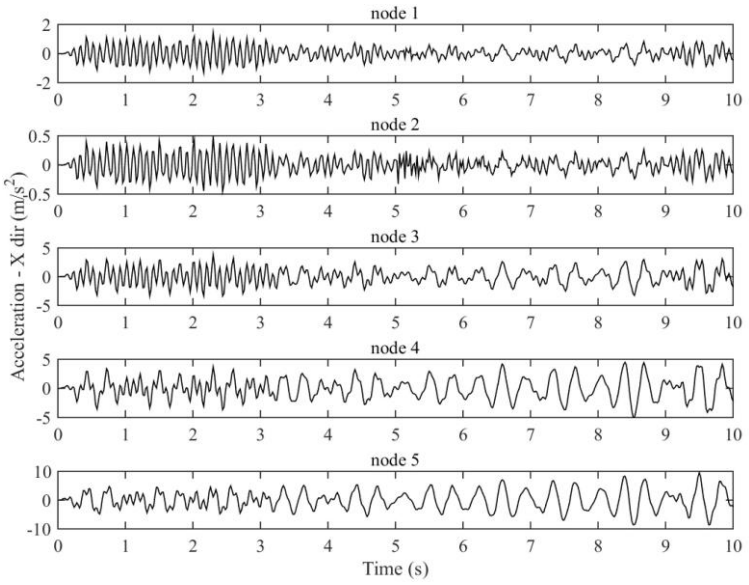



**شکل۳- محل آسیب و گره‌های پنج‌گانه برداشت پاسخ شتاب-زمان**


www.SID.ir

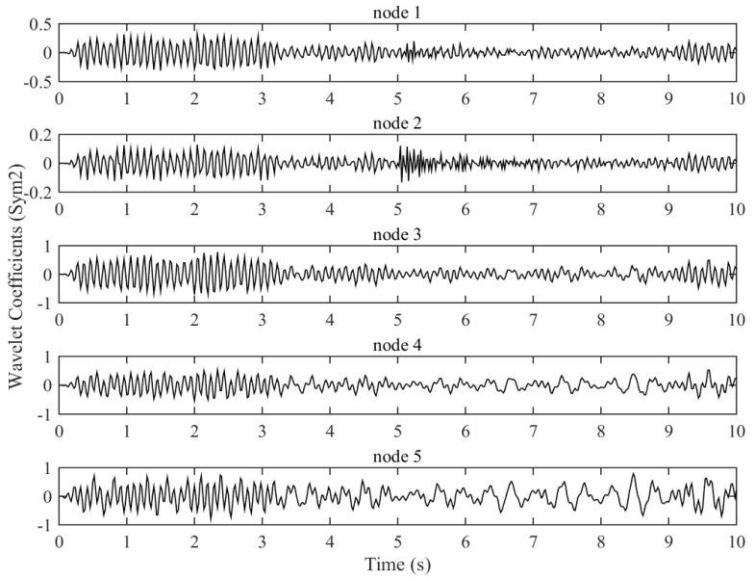
Archive of SID

در شکل ۴، نمودار شتاب-زمان در جهت x مربوط به ۵ گره نشان داده شده است. همانطور که قابل مشاهده است، آسیب ایجاد شده در ثانیه ۵ از روی این نمودارها، در هیچ یک از گره‌ها محسوس نمی‌باشد.




**شکل۴- نمودارهای شتاب-زمان ۵ گره در جهت x**

در شکل۵ نمودار ضرایب موجک مربوط به نمودارهای شتاب-زمان ۵ گره در جهت x قابل مشاهده است. همانطور که دیده می‌شود، در این نمودارها نیز آسیب در ثانیه ۵ اثر بارزی بر روی منحنی نداشته است.

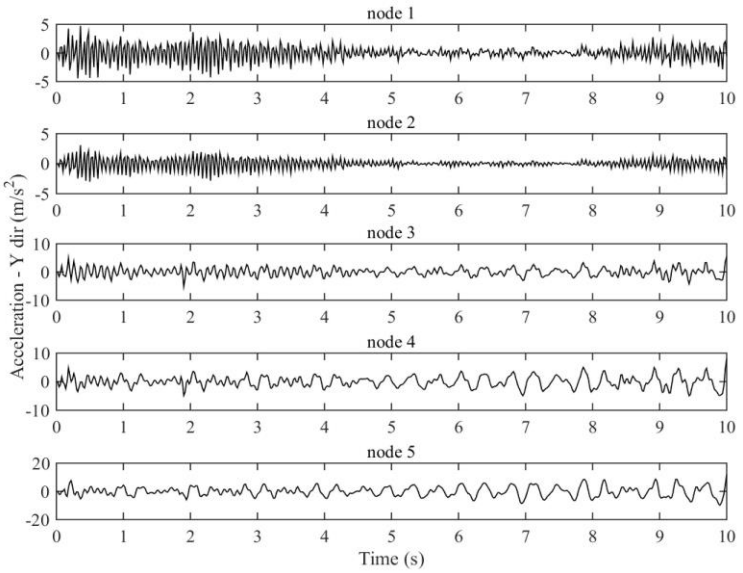



**شکل۵- نمودار ضرایب موجک منحنی‌های شتاب-زمان ۵ گره در جهت x**


www.SID.ir

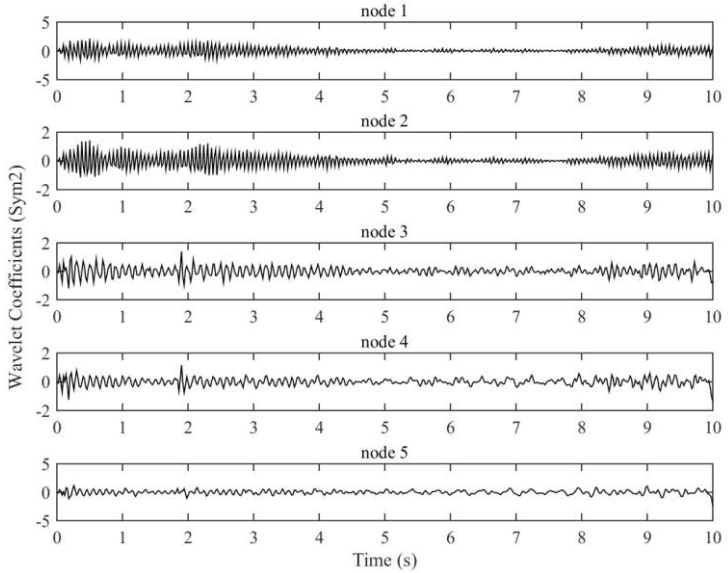
Archive of SID

در شکل ۶، نمودار شتاب-زمان در جهت y مربوط به ۵ گره نشان داده شده است. همانطور که قابل مشاهده است، آسیب ایجاد شده در ثانیه ۵ از روی این نمودارها، در هیچ یک از گره‌ها محسوس نمی‌باشد.




**شکل۶- نمودارهای شتاب-زمان ۵ گره در جهت y**

در شکل۷ نمودار ضرایب موجک مربوط به نمودارهای شتاب-زمان ۵ گره در جهت y قابل مشاهده است. همانطور که دیده می‌شود در این نمودارها نیز آسیب در ثانیه ۵ اثری بر روی منحنی نداشته است.

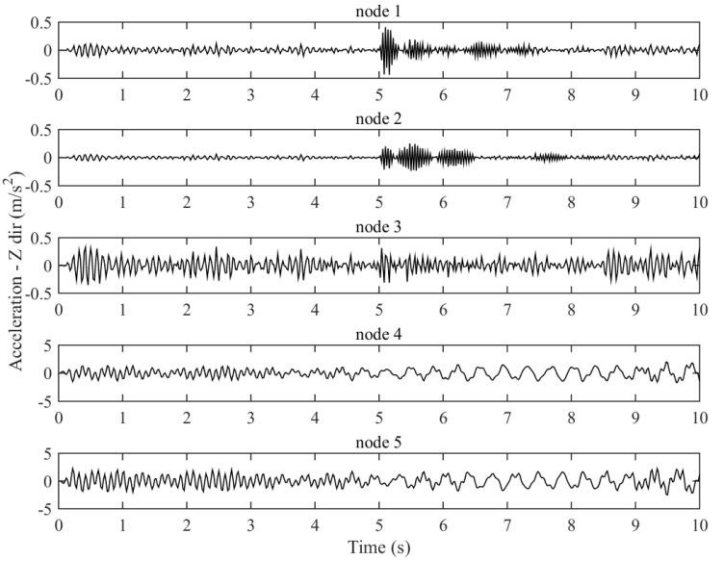



**شکل۷- نمودار ضرایب موجک منحنی‌های شتاب-زمان ۵ گره در جهت y**


www.SID.ir

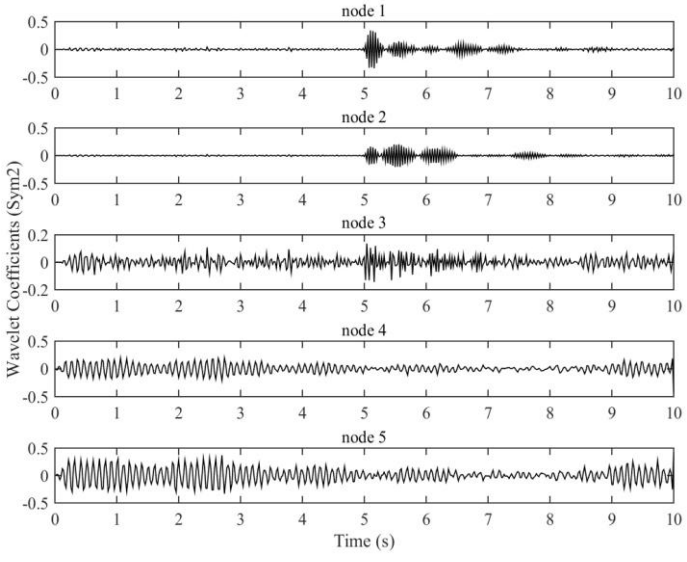
Archive of SID

در شکل ۸، نمودار شتاب-زمان در جهت z مربوط به ۵ گره نشان داده شده است. همانطور که قابل مشاهده است، آسیب ایجاد شده در ثانیه ۵ در منحنی‌های مربوط به گره‌های ۱و۲ که نزدیک‌ترین گره‌ها به آسیب می‌باشند به وضوح قابل تشخیص است و در گره‌های دورتر، اثر آسیب دیده نمی‌شود.




**شکل۸- نمودارهای شتاب-زمان ۵ گره در جهت z**

در شکل۹ نمودار ضرایب موجک مربوط به نمودارهای شتاب-زمان ۵ گره در جهت z قابل مشاهده است. همانطور که دیده می‌شود در این نمودارها نیز آسیب در ثانیه ۵ با وضوح کامل در گره‌های ۱و۲ دیده می‌شود و در گره۳ نیز اثر آسیب با وضوح کمی قابل تشخیص است. اما در سایر گره‌ها اثری از آسیب در ثانیه پنجم دیده نمی‌شود.




**شکل۹- نمودار ضرایب موجک منحنی‌های شتاب-زمان ۵ گره در جهت z**

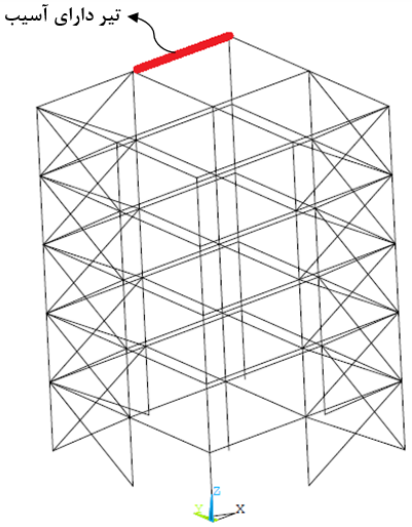

www.SID.ir

Archive of SID

**شناسایی آسیب با استفاده از آنالیز موجک مود اول ارتعاشی سازه**

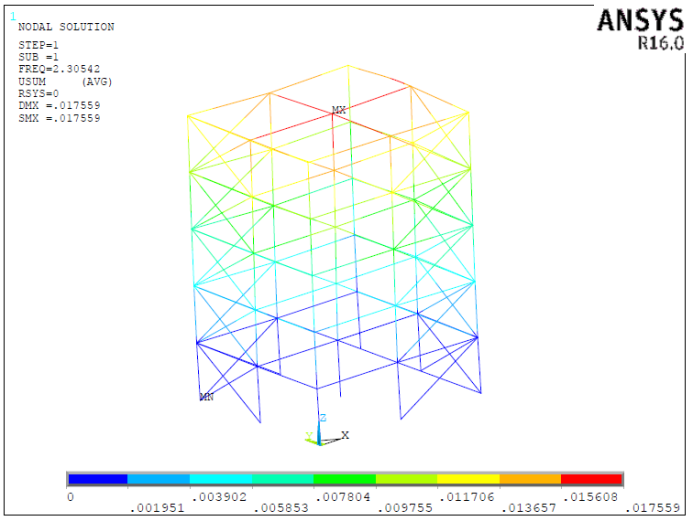
در این مرحله سازه تحت بار وزن ، تحلیل شده است. بار وزن اجزای تشکیل دهنده اسکلت (تیر،ستون و بادبند) که به صورت خودکار و با معرفی کردن شتاب جاذبه زمین به مقدار ۹,۸۰۶ متر بر مجذور ثانیه به نرم افزار، به سازه اعمال می‌شود.

جهت ایجاد آسیب در سازه، یکی از تیرهای طبقه بام که در شکل۱۰ نشان داده شده است، انتخاب شده و به ۵۰۰ المان به طول ۱ سانتی‌متر، تقسیم شد. پس از آن مدول الاستیسیته دو المان در دو نقطه نزدیک به تکیه‌گاه، به میزان ۵۰ و ۱۰ درصد کاهش داده شد.




**شکل۱۰- محل آسیب ایجاد شده در سازه**

در شکل ۱۱ شکل مود ارتعاشی اول سازه قابل مشاهده می‌باشد.

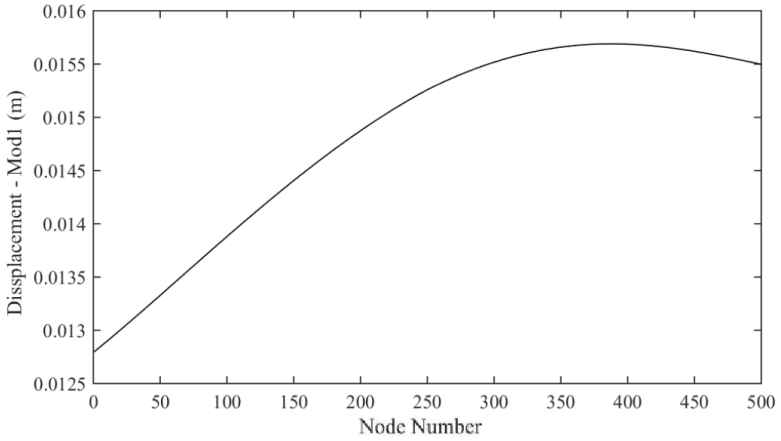



**شکل۱۱- مود ارتعاشی اول سازه**


www.SID.ir

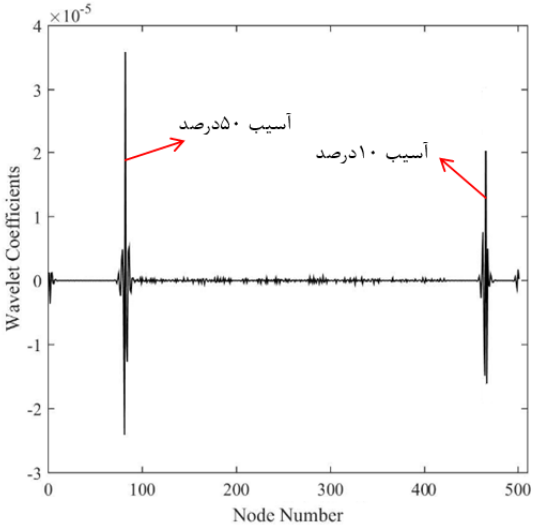
Archive of SID

منحنی جابجایی‌های مودی تیر دارای آسیب، در شکل۱۲ آورده شده است. همانطور که از این شکل قابل مشاهده است، آسیب‌های موجود در تیر از روی این منحنی قابل تشخیص نمی‌باشند.




**شکل۱۲- منحنی جابجایی مودی تیر دارای آسیب**

در شکل۱۳ آنالیز موجک منحنی مود اول ارتعاشی تیر دارای آسیب با استفاده از موجک Sym2 مشاهده می‌شود. با دقت در این شکل می‌توان پرش‌های مربوط به آسیب‌های ۵۰ و ۱۰ درصد را دید. همانطور که از این شکل پیداست پرش مربوط به آسیب شدیدتر، بزرگ‌تر از پرش حاصل از آسیب کوچک‌تر می‌باشد که با استفاده از این نکته می‌توان میزان پرش را به شدت آسیب موجود مرتبط ساخت.




**شکل۱۳- ضرایب آنالیز موجک منحنی جابجایی مودی تیر دارای آسیب**


www.SID.ir

Archive of SID

## نتیجه‌گیری

با بررسی‌های به عمل آمده و تحلیل نمودارهای موجود در این تحقیق می‌توان به نتایج زیر رسید:

- شتاب سازه در گره‌های نزدیک به آسیب تاثیر بیشتری نسبت به گره‌های دورتر، از آسیب موجود می‌پذیرد.
- شتاب در جهت قائم سازه جهت شناسایی محل آسیب بوجود آمده از کارایی بیشتری برخوردار است.
- روش شناسایی آسیب توسط پاسخ شتاب سازه تنها می‌تواند محدوده آسیب موجود را نشان دهد و در نشان دادن محل دقیق آسیب ناتوان است.
- در گره‌های نزدیک به آسیب، اثر آسیب از نمودارهای شتاب-زمان قابل تشخیص بوده و نیازی به استفاده از آنالیز موجک جهت برجسته نمودن اثر آسیب نبود.
- آنالیز موجک مود ارتعاشی اول سازه از کارایی بسیار بالایی جهت شناسایی آسیب در سازه برخوردار است.
- موجک مادر Sym2 نسبت به سایر موجک‌ها از توانایی بیشتری جهت شناسایی آسیب‌ها برخوردار است.
- میزان پرش در ضرایب موجک ارتباط مستقیمی با شدت آسیب موجود دارد.
- با استفاده از روش به کار گرفته شده در این تحقیق می‌توان محل دقیق آسیب در سازه را شناسایی نمود.

## منابع

فولادقدم، یونس، غفوری، حمیدرضا، « کشف آسیب در سازه ها توسط آنالیز موجک با استفاده از داده های آنالیز مودال»، مجله مهندسی عمران دانشگاه شریف، دوره ۲، شماره ۱/۲، ص۱۱۱ تا ۱۲۱، ۱۳۹۴.

بچاری صالح، فرید، کیاست، مهدی سعید، فدوی اردستانی، منوچهر، « تشخیص آسیب در سکوهای ثابت دریایی با استفاده از تبدیل ویولت»، یازدهمین همایش صنایع دریایی، جزیره کیش، ۱۳۸۸، ص ۱ تا۱۰.

M.Quinones, A.Montejo, Jang, " Exprimental and numerical evaluation of wavelet based damage detection methodologies", *Int J Adv Struct Eng*, 2015, pp. 69-80.

Gentile, A, Messina, A, "On the continuous wavelet transforms applied to discrete vibrational data for detecting open cracks in damaged beams", solids and structures", 2003.


www.SID.ir