

## تشخیص الگوی آسیب دیوارهای برشی بتن آرمه با استفاده از تبدیل‌های ریاضیاتی

حسین نادرپور<sup>۱\*</sup>، محمد کاظم شربتدار<sup>۲</sup>، فاطمه خادمیان<sup>۳</sup>

۱- دانشیار، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

۲- دانشیار، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

### چکیده

پایش سلامت سازه عمرانی در مفهوم کلی، یک رویه‌ای به جهت تامین اطلاعات دقیق و بدون اتلاف وقت در مورد شرایط و کارایی سازه می‌باشد. وجود عوامل متنوع آسیب از یک سو و از سوی دیگر غیرقابل پیش‌بینی بودن آینده، یک ضرورت برای بکارگیری پیش‌سازمان سازه می‌باشد. نظارت بر سلامت سازه‌ها و تشخیص آسیب آن در مراحل اولیه یکی از موضوعات مورد توجه همیشگی بوده است زیرا بیش‌تر آسیب‌ها را می‌توان با بررسی اولیه از وضعیت موجود سازه‌ها اصلاح و ترمیم نمود و بدین ترتیب از گسترش خرابی در سازه‌ها و فروریختن ساختمان و افزایش هزینه‌ها جلوگیری کرد. در این میان شناسایی زود هنگام آسیب دیوارهای برشی بتنی که برای مقابله با بارهای جانبی وارد بر سازه‌ها طراحی می‌شوند امری حیاتی است. زیرا خرابی و نقص در عملکرد سازه‌ای دیوارهای برشی می‌تواند منجر به بروز آسیب‌های جدی و یا حتی خرابی پیش‌رونده سازه‌های بتنی گردد. تغییر در سختی و فرکانس می‌تواند وقوع آسیب را به طور واضحی نشان دهد. استفاده از تبدیل‌های ریاضی نیز ابزاری جهت تشخیص آسیب می‌باشند. در این مقاله پس از بیان مبانی پیش‌سازمان سازه، با آنالیز تاریخیچه زمانی غیرخطی مدل اجزای محدود سازه دارای دیوار برشی بتنی به وسیله چهار زلزله وارد شده به آن، پاسخ‌های سازه‌ای استخراج شده و با استفاده از تبدیل ریاضی فوریه و موجک به شناسایی وجود و زمان وقوع آسیب در دیوار برشی پرداخته می‌شود.

کلمات کلیدی: پیش‌سازمان سازه، تشخیص آسیب، دیوار برشی بتنی، تبدیل‌های ریاضی.

\*نویسنده مسئول: حسین نادرپور

پست الکترونیکی: naderpour@semnan.ac.ir

DOI: 10.22065/jsce.2016.41239

http://dx.doi.org/10.22065/jsce.2016.41239

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۰۷/۱۷، تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۱۰/۰۶

پایش سلامتی سازه‌ها در دهه‌های اخیر به دلیل افزایش نیاز به پایش دایم سازه‌های بزرگ به زمینه تحقیقاتی مناسبی تبدیل شده است. شناسایی آسیب در یک سازه از اهمیت زیادی برخوردار است، زیرا کشف زود هنگام آسیب می‌تواند از خرابی فاجعه‌بار سازه جلوگیری کند. لفظ پایش سلامت سازه‌ها به فرآیند انجام عملیات شناسایی و تشخیص آسیب در سازه‌های مهندسی اطلاق می‌گردد. در این راستا، هرگونه تغییر در خواص مادی و یا هندسی یک سیستم سازه‌ای که اثری نامطلوب بر کارایی سیستم داشته باشد به عنوان آسیب تعریف می‌شود. در این تحقیق با توجه به لزوم مسئله پایش سلامت سازه‌ای، دیوارهای برشی به‌عنوان یکی از سازه‌های عمرانی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. دیوارهای برشی برای مقابله با بارهای جانبی وارد بر سازه‌ها طراحی می‌شوند. خرابی و نقص در عملکرد سازه‌ای دیوارهای برشی می‌تواند منجر به بروز آسیب‌های جدی و یا حتی خرابی پیش‌رونده سازه‌های بتنی گردد. در سال‌های اخیر مطالعات پژوهشی زیادی جهت بهبود دقت و قابلیت اطمینان روش‌های پایش سلامت سازه انجام شده است. روش‌هایی که به‌صورت خودکار اطلاعات سازه را برای تعیین وضعیت آن جمع‌آوری و تجزیه و تحلیل می‌کنند. در این روش‌ها، پایش سلامت سازه‌ها مبتنی بر این ایده اساسی هستند که خصوصیات دینامیکی یک سازه تابعی از خصوصیات فیزیکی آن می‌باشد بنابراین تغییر خصوصیات فیزیکی سازه ناشی از آسیب‌های وارد بر آن می‌تواند موجب تغییر خصوصیات دینامیکی آن شود. در نتیجه داده‌های ارتعاش سازه جمع‌آوری شده و برای شناسایی آسیب‌های سازه استفاده می‌شود. یکی از این روش‌ها استفاده از تبدیل‌های ریاضی در تشخیص آسیب است. در بسیاری موارد، اطلاعات سودمند سیگنال در محتوای فرکانسی آن نهفته اند که اصطلاحاً به آن، طیف سیگنال گفته می‌شود. به بیان ساده، طیف یک سیگنال نشان‌دهنده فرکانس‌های موجود در آن سیگنال است. با توجه به این موضوع می‌بایست ابزاری برای سنجش محتوای فرکانسی یک سیگنال داشت. این ابزار همان تبدیل‌های ریاضی است. محققان زیادی در زمینه روش‌های بررسی و وجود آسیب در سازه فعالیت داشته و هم‌چنین تحقیقاتی در زمینه وجود آسیب در دیواربرشی انجام شده است.

کاولی و آدامز جزء نخستین افرادی بودند که در سال ۱۹۷۹ تحقیقات در زمینه تکنیک شناسایی آسیب بر پایه فرکانس را آغاز کردند. در این تکنیک شناسایی آسیب با تغییر در فرکانس مرتبط می‌گردد و تغییر در فرکانس نیز به‌سبب تغییر در جرم و سختی و دیگر پارامترهای سازه رخ می‌دهد [۱].

کیم و ملهم در سال ۲۰۰۳ دو نمونه سازه بتنی را تحت بارگذاری خستگی و ضربه ناگهانی تکرار شونده مورد مطالعه قرار دادند. به‌کمک تبدیل فوریه و موجک، با محاسبه فرکانس طبیعی قبل و بعد از بارگذاری اقدام به شناسایی آسیب در سازه‌های بتنی نمودند [۲].

لویی و جی در سال ۲۰۰۵ روشی برپایه مدل اجزای محدود و با استفاده از خصوصیات دینامیکی سازه از قبیل فرکانس‌ها و اشکال مودی ارائه نمودند [۳].

رامان جین یولو در سال ۲۰۰۹، با ارائه روشی فرکانس طبیعی را از ماتریس انتقال استخراج کرده، و از آن جهت تشخیص وجود آسیب، نوع و مکان استفاده کردند. در این روش شناسایی، تشخیص وجود و محل آسیب در سازه با دقت قابل ملاحظه‌ای انجام گردید [۴].

شی و همکارانش در سال ۲۰۰۹ رویکردی مبتنی بر استفاده از سنگدانه‌های هوشمند برای پایش سلامت دیوارهای برشی بتنی پیشنهاد کردند. براساس کار ایشان، قبل از بتن ریزی دیوار، سنگدانه‌های پیزوالکتریک در موقعیت‌های مشخصی در درون دیوار قرار داده شده و از این طریق یک شبکه سنجش فعال به‌منظور پایش سلامت یک نمونه دیوار برشی شکل گرفت. نمونه تحت بارگذاری چرخه‌ای قرار گرفته و بطور تدریجی تا مرز خرابی کامل بارگذاری ادامه یافت. با اعمال میدان الکتریکی به یکی از سنگدانه‌ها یک موج تنش هدایت شده از محل سنگدانه مذکور به اطراف پراکنده و سایر سنگدانه‌ها در نقش سنسورهایی برای دریافت اطلاعات این امواج ظاهر شدند. سیگنال‌های رسیده به هر کدام از سنسورها (سنگدانه‌ها) با استفاده از بسته ویولت تجزیه شده و شاخص آسیبی براساس انرژی سیگنال‌ها در فرکانس‌های متفاوت تعریف شد [۵].

هی و ژو در سال ۲۰۱۱ روش شناسایی آسیب بر پایه ارتعاش جهت سازه‌های مختلف را مورد مطالعه قرار دادند. مدل‌سازی دقیق حالت آسیب دیده و آسیب ندیده سازه و گسترش الگوریتمی قوی روش‌هایی هستند برای شناسایی آسیب بر پایه ارتعاش که از فرکانس

طبیعی سازه جهت تشخیص آسیب استفاده می‌کنند. مکان دقیق آسیب به روش عددی و آزمایشگاهی شناسایی شده و محل آسیب با استفاده از الگوریتم پیشنهادی و بر پایه فرکانس طبیعی با کمترین درصد خطا شناسایی می‌گردد [۶].

باراد و شرما سال ۲۰۱۳ با استفاده از مدل نمودن ترک با یک فنر پیچشی، روشی سریع و کارا برای یافتن عمق و مکان ترک از طریق تغییر در فرکانس طبیعی سازه ارائه نمودند [۷].

فرهیدزاده و همکارانش در تحقیقی طی بررسی‌های آزمایشگاهی به پایش روند شکست در یک دیواربرشی بتن مسلح با مقیاس بزرگ پرداختند. یک نمونه آزمایشگاهی دیوار برشی تحت بارگذاری چرخه‌ای با کنترل تغییر مکان قرار داده شد و هم‌زمان، با تحلیل پیوسته انتشار امواج آکوستیک ناشی از شکست مصالح و یا وقوع تغییر شکل‌های پلاستیک، رفتار ترک‌خوردگی دیوار مورد ارزیابی قرار گرفت [۸].

وفائی و همکارانش در سال ۲۰۱۳ با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی برای شناسایی بلادرنگ آسیب لرزه ای ارائه دادند. در این روش دریافت طبقات میانی و چرخش مفصل پلاستیک دیوارهای برشی بتنی به ترتیب به عنوان ورودی و خروجی شبکه عصبی MLP در نظر گرفته شده است. برای نمایش کارایی و قدرت روش پیشنهادی، یک ساختمان ۵ طبقه با دیوار برشی بکار برده شده است. ۹ زلزله متفاوت رکورد شده برای این مطالعه در نظر گرفته می‌شود. در همه حالات به غیر از ۴ مورد شبکه شناسایی آسیب دیوار برشی را درست انجام داده است [۹].

کیم و تون در سال ۲۰۱۴ با در نظر گرفتن ترمهای غیرخطی مربوط به شدت ترک، روش جدیدی برای تشخیص تعداد نامشخصی از ترک در سازه، با استفاده از محاسبه فرکانس طبیعی، پیشنهاد دادند [۱۰].

لین در سال ۲۰۱۵ طی پژوهشی نشان دادند چطور ترک‌های خمشی خواص ارتعاشی مانند تابع پاسخ فرکانس را تغییر داده و چطور می‌توان از این خواص جهت شناسایی آسیب استفاده کرد. در این تحقیق ترک مانند فنر چرخشی مدل شده و خواص ارتعاشی مانند فرکانس طبیعی و مودشیپ مورد محاسبه قرار داده شده و جهت شناسایی آسیب مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱۱].

عزالدین و همکارانش طی تحقیقی در سال ۱۳۹۳ روش ساده‌ای بر مبنای تحلیل موجک برای تشخیص محل و میزان آسیب در تیرها ارائه دادند. بدین صورت که پاسخ تغییر شکل قائم تیر تحت بار استاتیکی ثابت با استفاده از تبدیل موجک گسسته تجزیه شده و در نمودارهای تجزیه شده برای سناریوهای مختلف آسیب در تیر بحث و بررسی به عمل آمده و در نهایت کارایی روش برای حالات مختلف ترک‌خوردگی مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است [۱۲].

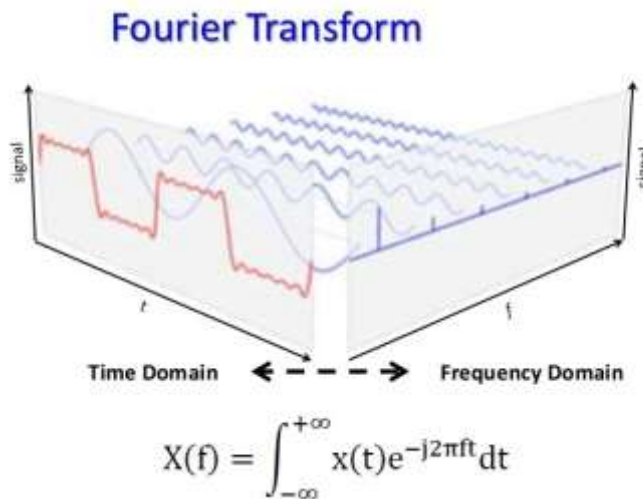
طاهرزاده و همکارانش در سال ۱۳۹۵ طی تحقیقی روش شناسایی ترک‌های چندگانه در تیر طره بتن مسلح بر پایه تبدیل موجک را ارائه دادند. با در نظرگیری سناریوهای مختلف خرابی در تیر بتنی، شکل‌های مودی چهار مود اول تیر در حالت سالم و آسیب دیده با استفاده از نرم افزار ABAQUS استخراج گردیده و برای شناسایی آسیب‌های در نظر گرفته شده، تحت تبدیل موجک پیوسته و گسسته قرار گرفتند. مشاهده شد که موجک گسسته به موقعیت آسیب برای تیر بتنی تعریف شده در این مطالعه، نسبت به موجک پیوسته حساس‌تر می‌باشد. همچنین اثر مرتبه مودها و تاثیر فاصله آسیب از تکیه‌گاه در شناسایی آسیب ارزیابی شد. ملاحظه شد که فاصله ترک‌ها از یکدیگر تاثیری در شناسایی موقعیت آن‌ها ندارد [۱۳ و ۱۴ و ۱۵].

در این مقاله هدف به کار بردن تبدیل فوریه جهت شناسایی وقوع آسیب و تبدیل موجک جهت شناسایی زمان آسیب در دیواربرشی سازه است. برای این منظور ابتدا مدل اجزای محدود سازه در برنامه SeismoStruct ساخته شده و به وسیله چهار زلزله وارد شده بر آن تحت آنالیز تاریخیچه زمانی غیرخطی قرار می‌گیرد. سپس با استفاده از تبدیل فوریه فرکانس طبیعی سازه استخراج شده و وقوع آسیب محرز می‌گردد و در آخر با استفاده از تبدیل موجک زمان وقوع آسیب شناسایی می‌شود.

## ۲- پردازش سیگنال

هدف از اعمال یک تبدیل ریاضی بر یک سیگنال، بدست آوردن اطلاعات اضافه ای است که در سیگنال خام اولیه قابل دسترس نمی‌باشند.

در بسیاری موارد، اطلاعات سودمند سیگنال در محتوای فرکانسی آن نهفته اند که اصطلاحاً به آن، طیف سیگنال گفته می‌شود. به بیان ساده، طیف یک سیگنال نشان‌دهنده فرکانس‌های موجود در آن سیگنال است. می‌بایست ابزاری جهت سنجش محتوای فرکانسی یک سیگنال داشت. این ابزار همان تبدیل فوریه است که در ادامه به شرح آن می‌پردازیم.



شکل ۱: تبدیل فوریه.

تبدیل فوریه، یک سیگنال را به مجموعی از نامتناهی تابع نمایی مختلط افراز می‌کند که هر کدام از آنها دارای فرکانس‌های مختلفی می‌باشند. طبق تعریف، تبدیل فوریه سیگنال پیوسته در زمان  $x(t)$  از رابطه (۱) به‌دست می‌آید:

$$X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)e^{-j2\pi ft} dt \quad (1)$$

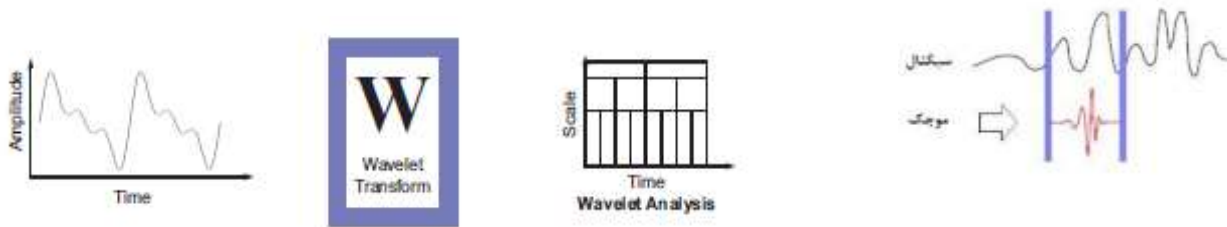
که در آن  $t$  زمان و  $f$  فرکانس است. رابطه (۱) تبدیل فوریه سیگنال  $x(t)$  را نشان می‌دهد.

با دقت در رابطه (۱) می‌توان دید که سیگنال  $x(t)$  در یک جمله نمایی با فرکانس معین  $f$  ضرب شده است و سپس بر تمام زمان‌ها انتگرال گرفته شده است. باید دقت نمود که جمله نمایی را می‌توان به صورت رابطه (۲) نوشت:

$$e^{j2\pi ft} = \cos(j2\pi ft) + j \sin(j2\pi ft) \quad (2)$$

عبارت بالا شامل یک جمله حقیقی کسینوسی با فرکانس  $f$  و یک جمله موهومی سینوسی با فرکانس  $f$  می‌باشد. بنابراین آن‌چه در تبدیل فوریه صورت می‌پذیرد در حقیقت ضرب نمودن سیگنال زمانی در یک تابع نمایی مختلط است که در واقع ترکیبی از دو تابع تناوبی با فرکانس  $f$  می‌باشد. در گام بعد، از این حاصل ضرب انتگرال گیری زمانی می‌شود. به بیان بهتر، تمام نقاط این حاصل ضرب با یکدیگر جمع می‌شوند. در نهایت اگر حاصل این انتگرال گیری (که چیزی جز نوعی جمع نامتناهی نیست) عددی بزرگ باشد، آنگاه می‌گوییم سیگنال  $x(t)$  یک مؤلفه فرکانسی برجسته در فرکانس  $f$  دارد. اگر حاصل مقداری کوچک باشد، گوئیم مؤلفه فرکانسی  $f$  در این سیگنال غالب نیست.

بودن حاصل انتگرال نیز به معنای عدم وجود چنین فرکانسی در سیگنال است. تبدیل فوریه تنها بیان کننده این است که فرکانس  $f$  در سیگنال مورد نظر وجود دارد یا خیر، اما هیچ نوع اطلاعاتی در مورد بازه زمانی متناظر با پدیداری آن فرکانس در اختیار نمی‌گذارد. تبدیل موجک تجزیه یک تابع بر مبنای توابع موجک می‌باشد. موجک‌ها نمونه‌های انتقال یافته و مقیاس شده یک تابع (موجک مادر) با طول متناهی و نوسانی شدیداً میرا هستند. تبدیل موجک به طور جداگانه بر روی قطعه‌های زمانی مختلف سیگنال انجام می‌شود و عرض پنجره به موازات تغییر مؤلفه‌های فرکانسی تغییر می‌کند که به‌طور حتم مهم‌ترین ویژگی تبدیل موجک است.



شکل ۲: تبدیل موجک [۱۶].

$$CWT_x^\psi = \Psi_x^\psi(\tau, s) = \frac{1}{\sqrt{|s|}} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \psi^* \left( \frac{t-\tau}{s} \right) dt \quad (3)$$

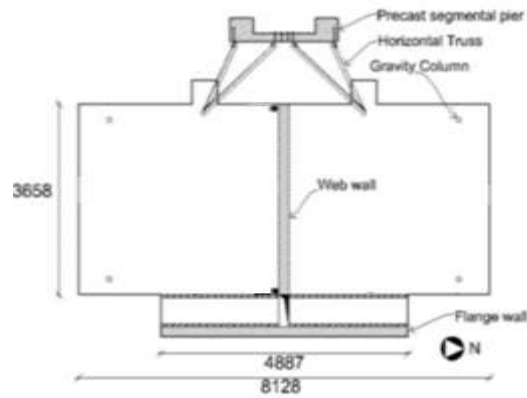
که در آن  $\tau$  و  $s$  به ترتیب پارامترهای انتقال و مقیاس می‌باشند. مفهوم انتقال میزان جابجایی پنجره را معلوم می‌کند و به‌وضوح، اطلاعات زمانی تبدیل را دربردارد.

### ۳- مدلسازی و آنالیز تاریخچه زمانی

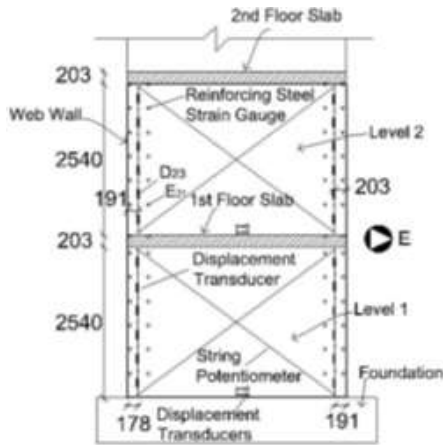
در این قسمت به شرح مدلسازی ساختمان هفت طبقه با دیواربرشی مستطیلی با مقیاس کامل که در سال ۲۰۰۶ با چهار زلزله مختلف، تحت آزمایش میز لرزان شبکه شبیه‌سازی مهندسی زلزله در دانشگاه کالیفرنیا در سن‌دیگو (NEES-UCSD) قرار گرفته است، توسط برنامه SeismoStruct می‌پردازیم [۱۷].



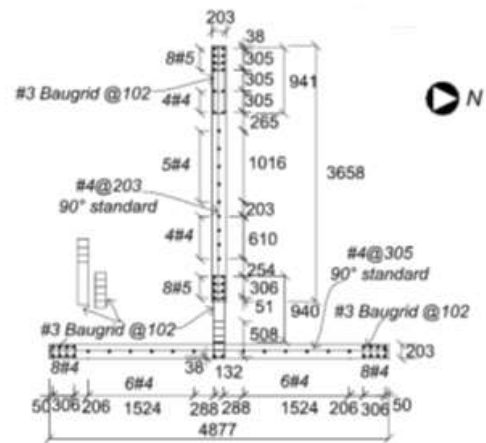
الف: نمایی از آزمایش نمونه



ب: نمایی از پلان طبقات



ج: نمایی از دیواربرشی میانی طبقات اول و دوم



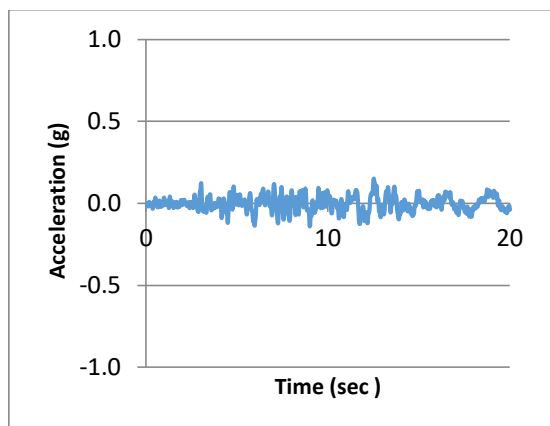
د: دیواربرشی طبقات اول و هفتم (کلیه ابعاد براساس میلی متر)

شکل ۳: سازه مورد بررسی [۱۷].

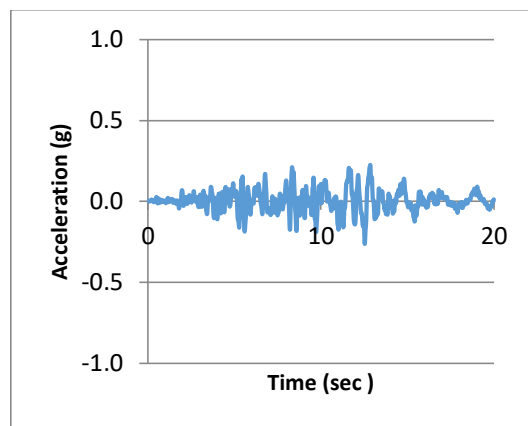
چهار زلزله واقعی به نحوی مطابق شکل ۴ به دنبال هم اعمال شده‌اند که اولاً توسط یک نوبه کم دامنه از هم جدا شده و ثانیاً نحوه اعمال زلزله‌ها طوری است که زلزله اول با شدت کم EQ1 و دو زلزله بعد EQ2 و EQ3 با شدت متوسط و زلزله آخر EQ4 با شدت بالا می‌باشد. جدول ۱ جزئیات این زلزله‌ها را نشان می‌دهد.

جدول ۱: مشخصات زلزله‌های مورد استفاده [۱۷]

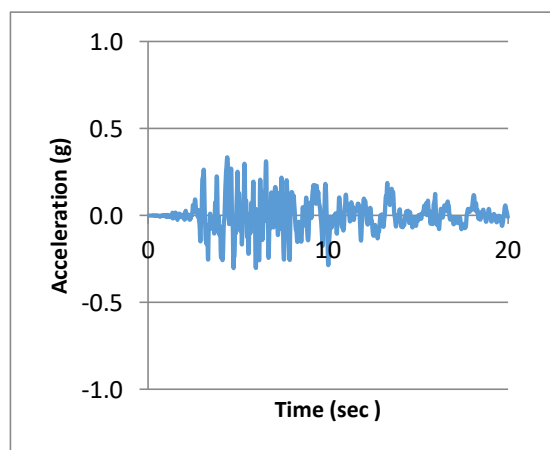
زلزله	محل وقوع	ایستگاه	سال	PGA
EQ1	San Fernando	Van Nuys (مولفه طولی)	1971	0.15g
EQ2	San Fernando	Van Nuys (مولفه عرضی)	1971	0.27g
EQ3	Northridge	Oxnard Boulevard Woodland Hill	1994	0.35g
EQ4	Northridge	Sylmar Olive View Medical Center	1994	0.91g



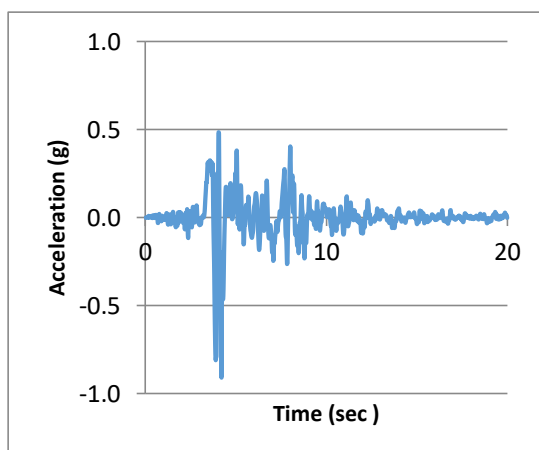
الف : EQ1



ب : EQ2



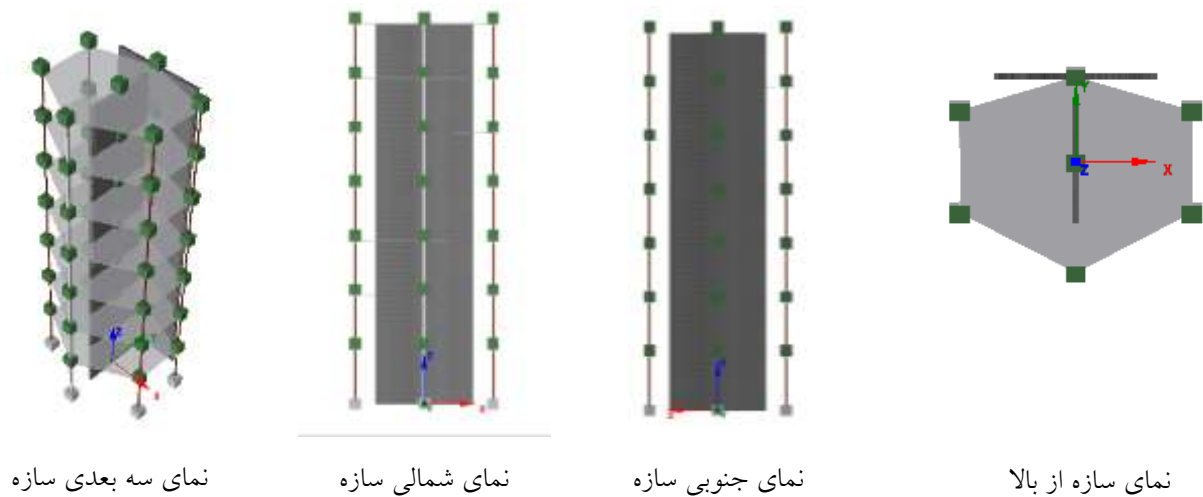
ج : EQ3



د : EQ4

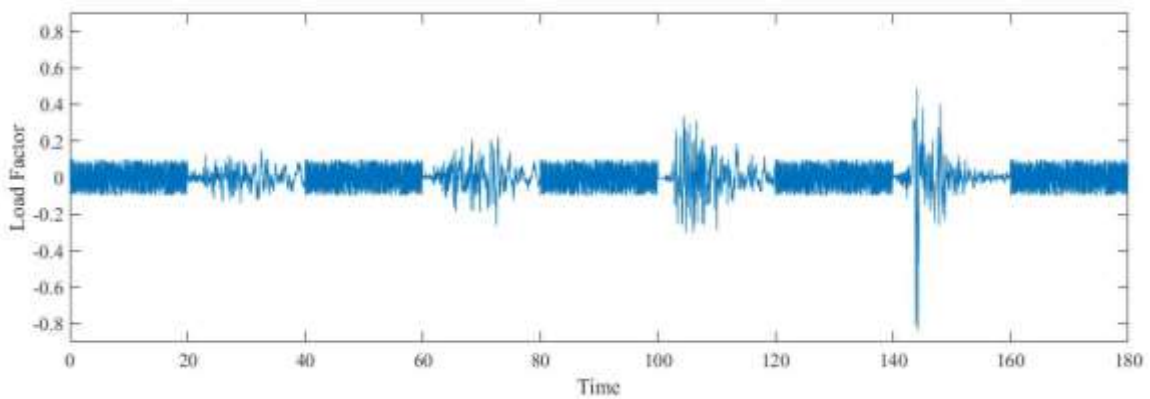
شکل ۴: زلزله های مورد استفاده [۱۷].

با توجه به کار آزمایشگاهی مدل سازی با ابعاد و خواص سازه اصلی انجام می گیرد.



شکل ۵: مدل اجزای محدود سازه در برنامه SeismoStruct.

زلزله‌های به کار برده شده به همراه نوفه سفید که در برنامه مورد استفاده قرار گرفته است در شکل ۶ نشان داده شده است:



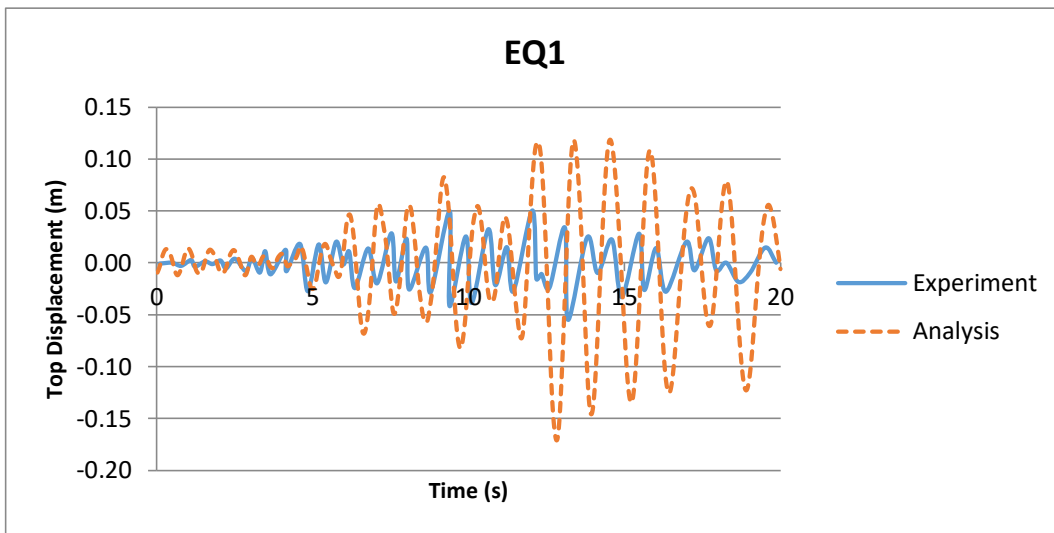
شکل ۶: منحنی شتاب نگاشت زلزله‌های وارد شده به سازه در برنامه SeismoStruct.

#### ۴- اعتبارسنجی مدل

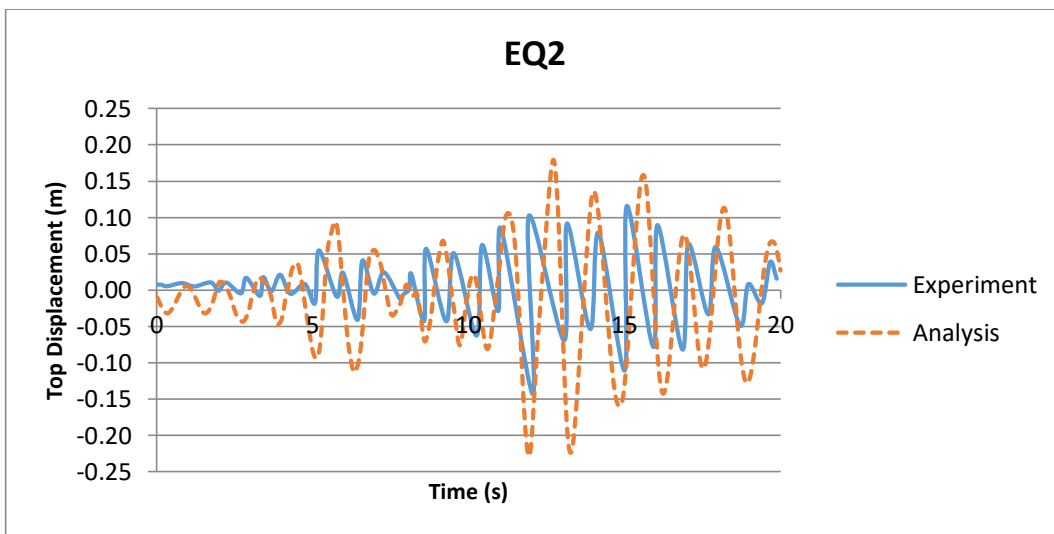
جهت استفاده از مدل ساخته شده در نرم افزار SeismoStruct باید به تطابق خوبی بین نتایج آزمایشگاهی و مدل ساخته شده

رسید.

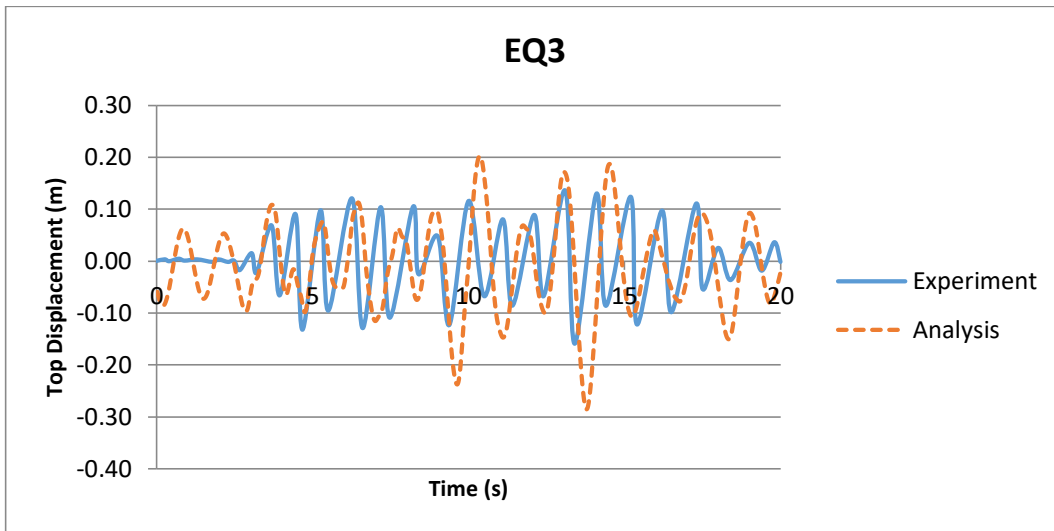




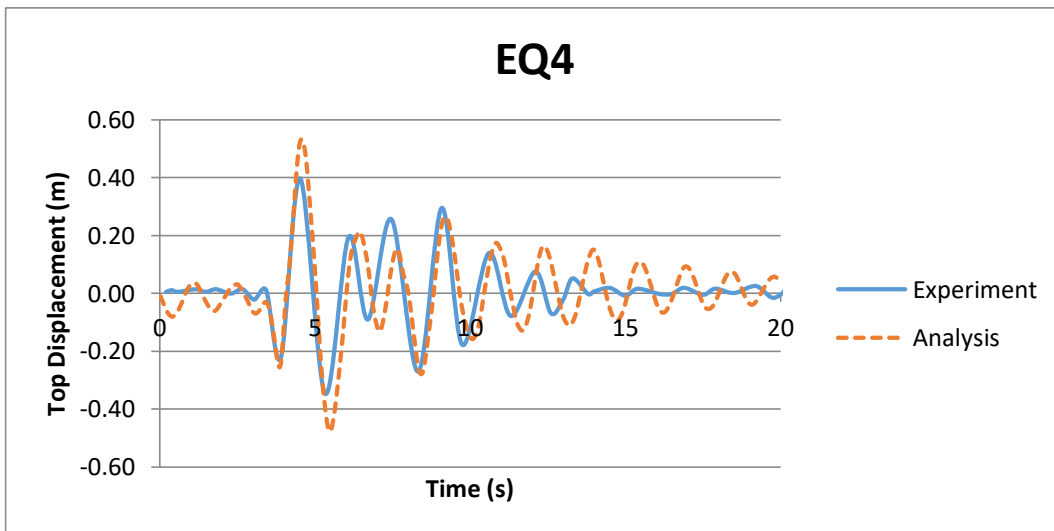
شکل ۷: مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی جابجایی به زمان (EQ1).



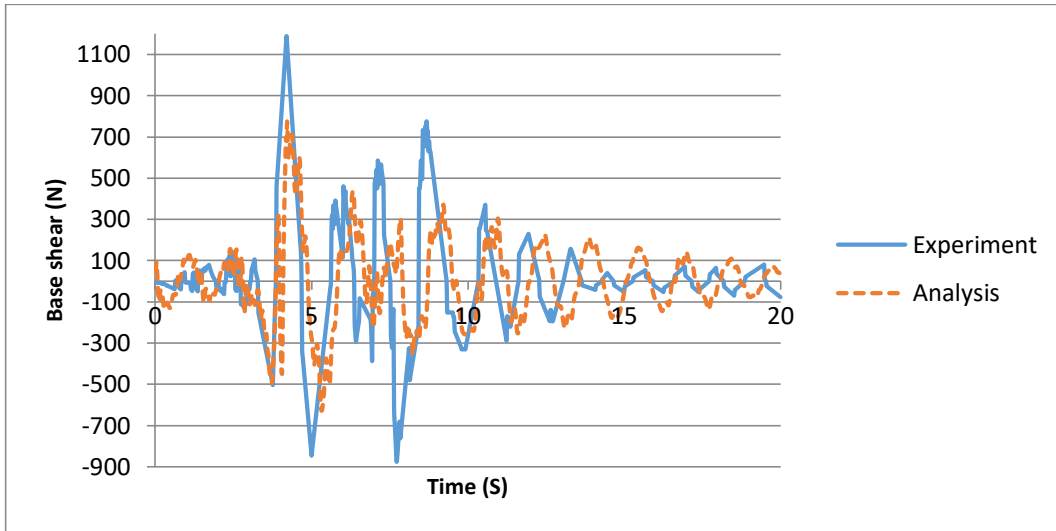
شکل ۸: مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی جابجایی به زمان (EQ2).



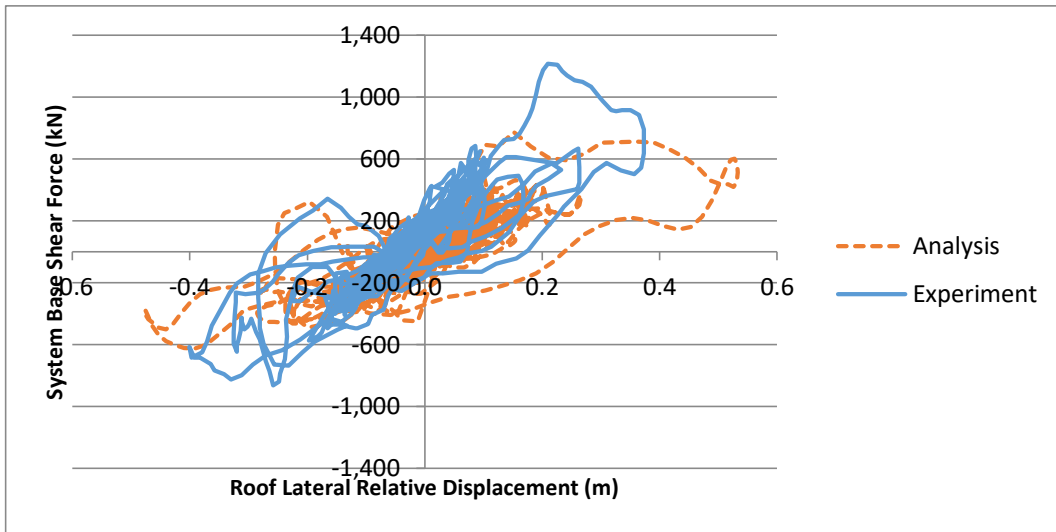
شکل ۹: مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی جابجایی به زمان (EQ3).



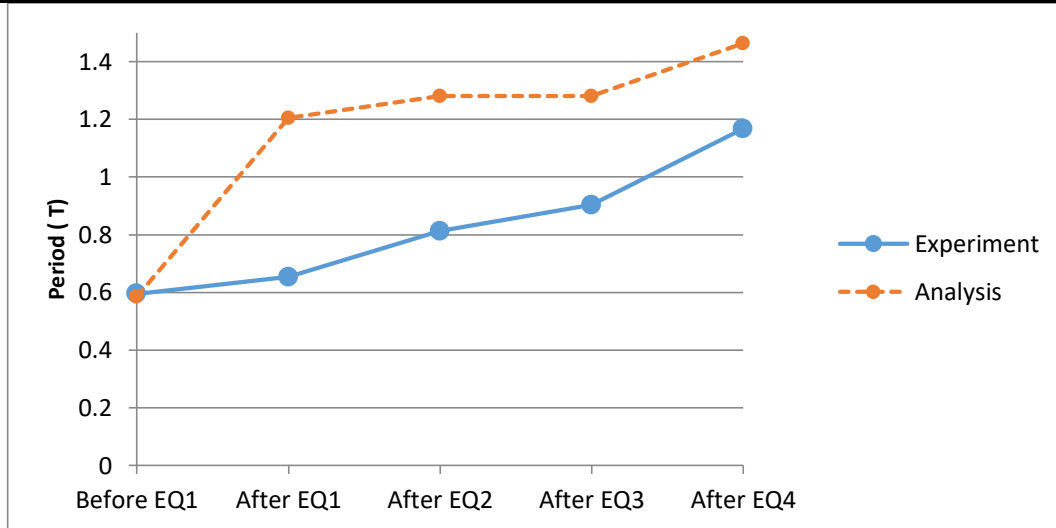
شکل ۱۰: مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی جابجایی به زمان (EQ4).



شکل ۱۱: مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی برش پایه به زمان (EQ4).



شکل ۱۲: مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی نمودار هیستریزیس سازه.

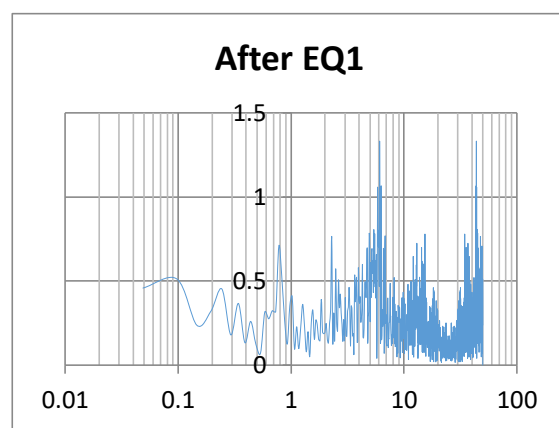
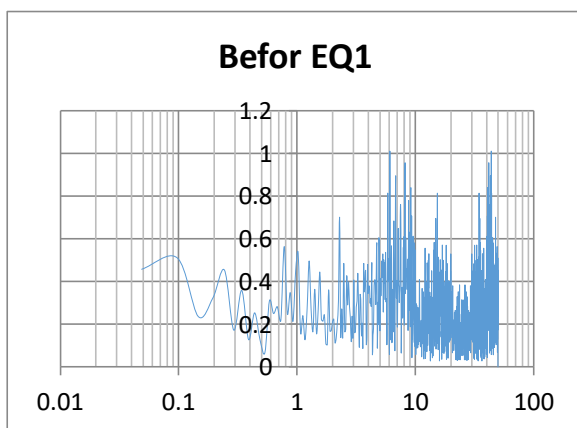


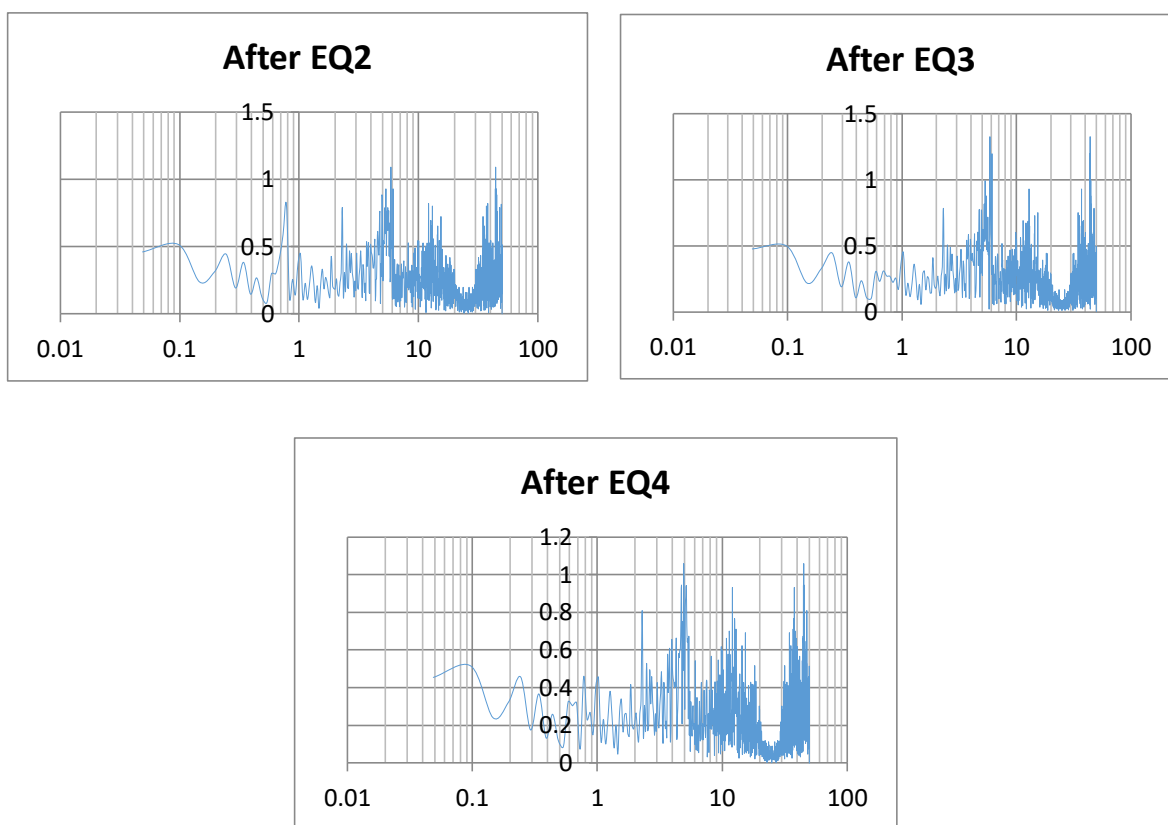
شکل ۱۳: مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی پریود سازه.

نتایج سازه مدل‌سازی شده و مدل واقعی آزمایش شده در دانشگاه سن‌دیگو در برخی موارد دارای اختلاف بوده و در موارد زیادی به‌ویژه زلزله چهارم نتایج بسیار نزدیک می‌باشند.

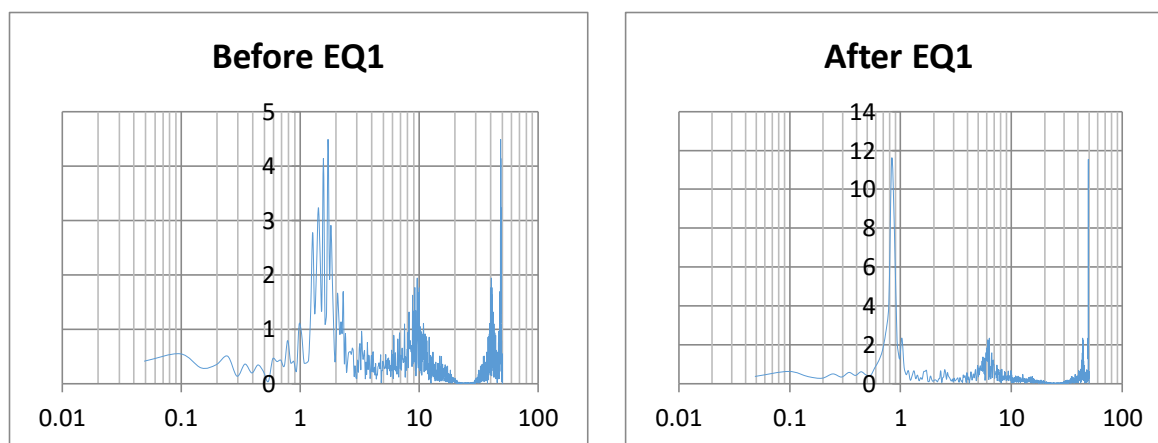
## ۵- شناسایی آسیب به وسیله پاسخ سازه

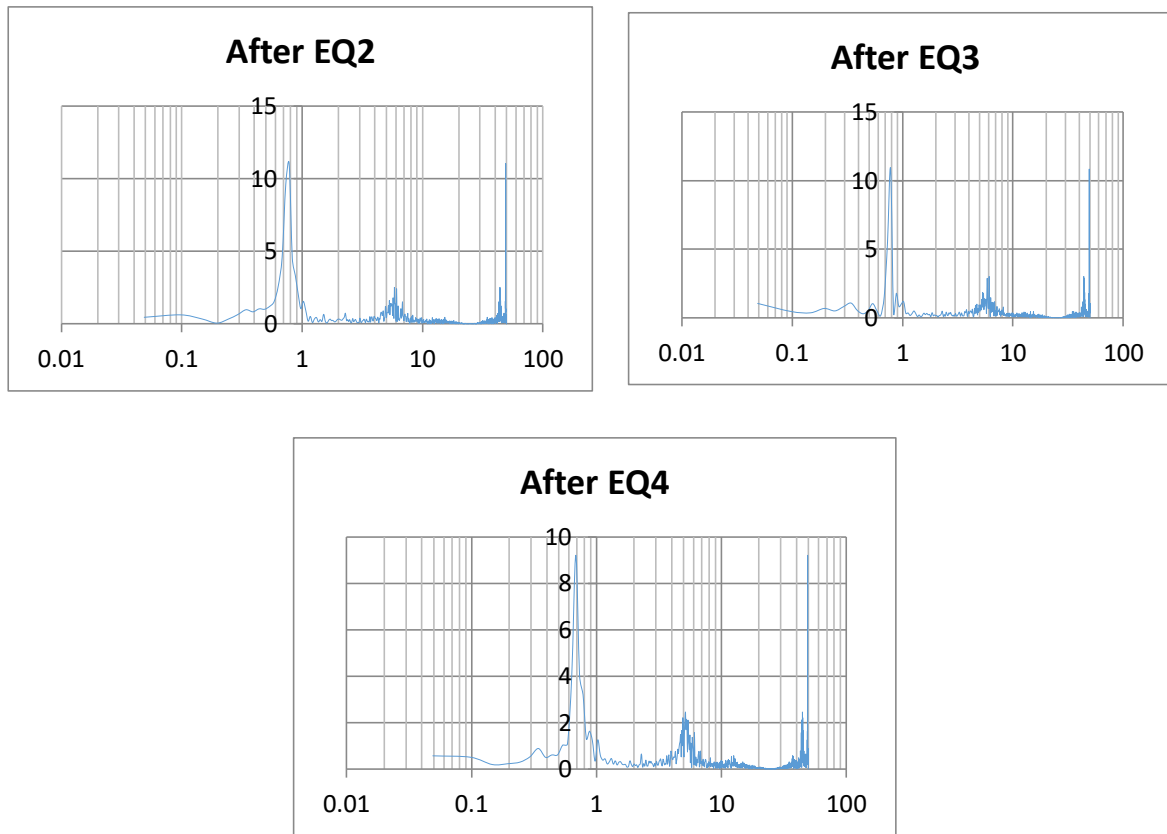
در این قسمت ابتدا پاسخ شتاب سازه تحت چهار زلزله به عنوان خروجی نرم افزار SeismoStruct گرفته شده و برای تشخیص آسیب در سازه مورد استفاده قرار می‌گیرد. جهت تشخیص خرابی قبل از اعمال تبدیل موجک به پاسخ‌های شتاب سازه ابتدا فرکانس پاسخ سازه به کمک تبدیل فوریه و به وسیله نرم‌افزار SeismoSignal از پاسخ ارتعاش تحت نوبه سفید قبل و بعد هر زلزله در تمامی دیوارها استخراج می‌شود که نتایج آن در برای نمونه در دیوار طبقه اول و هفتم در نمودارهای شکل ۱۴ و شکل ۱۵ ارائه شده است.





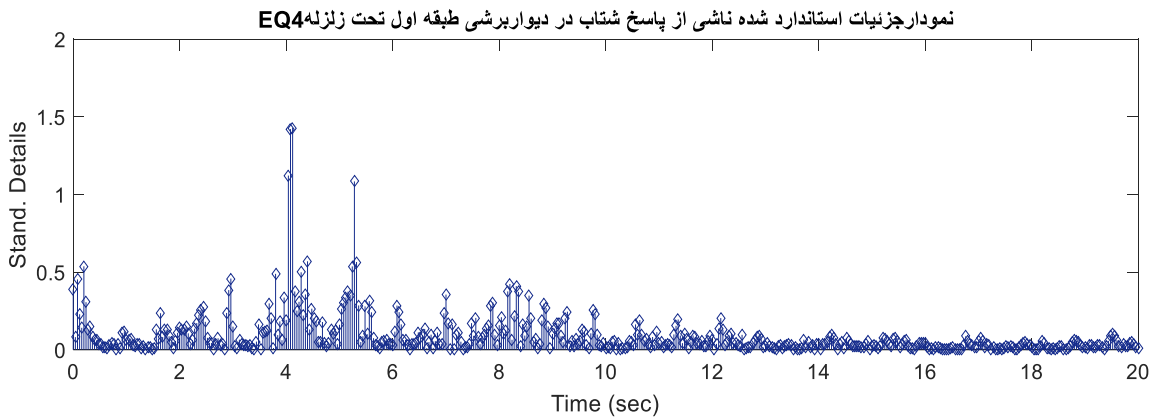
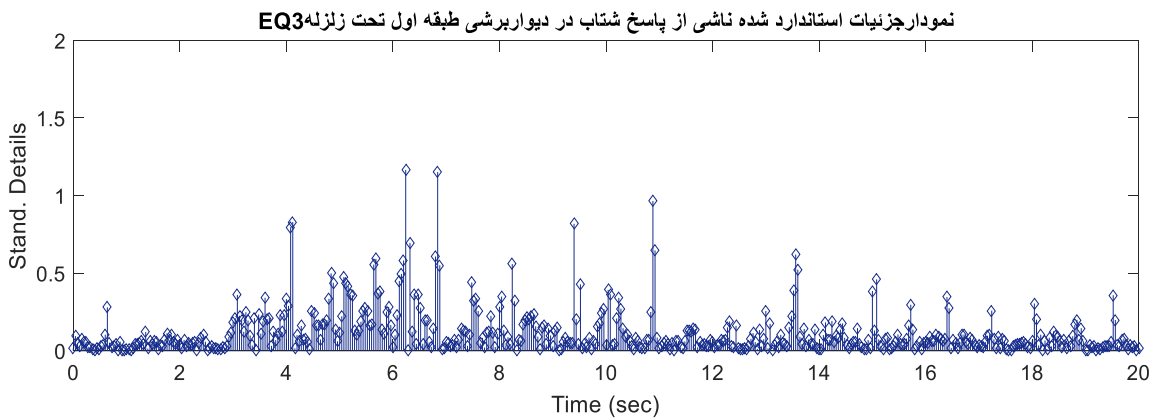
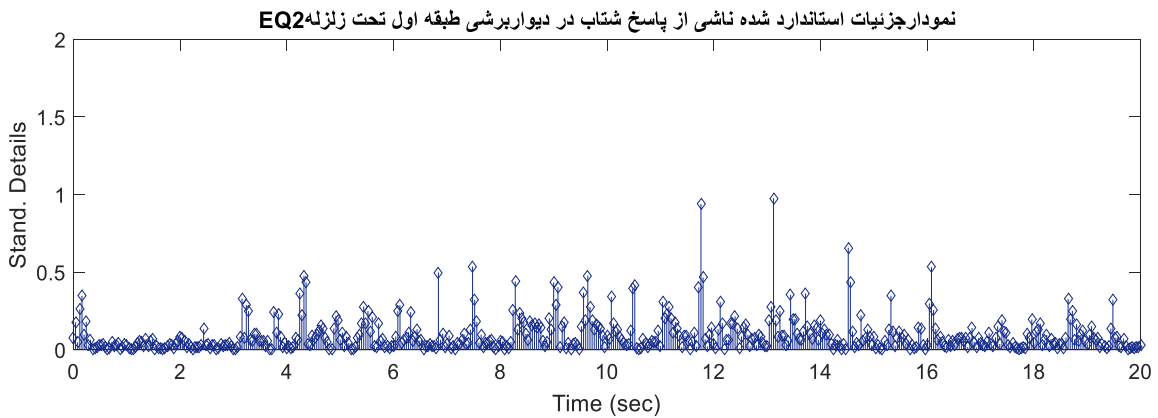
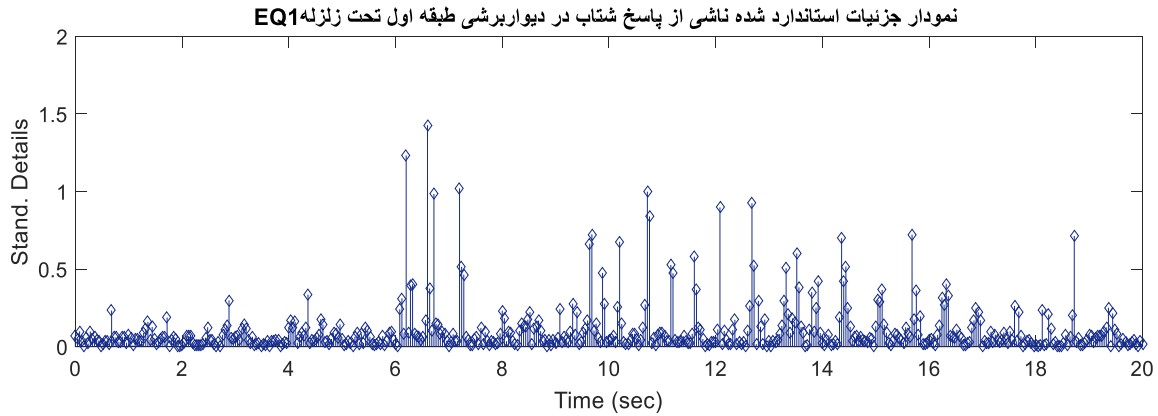
شکل ۱۴: طیف فوریه پاسخ شتاب دیواربرشی طبقه اول تحت تحریک نوفه سفید در قبل و بعد از اعمال هر زلزله.



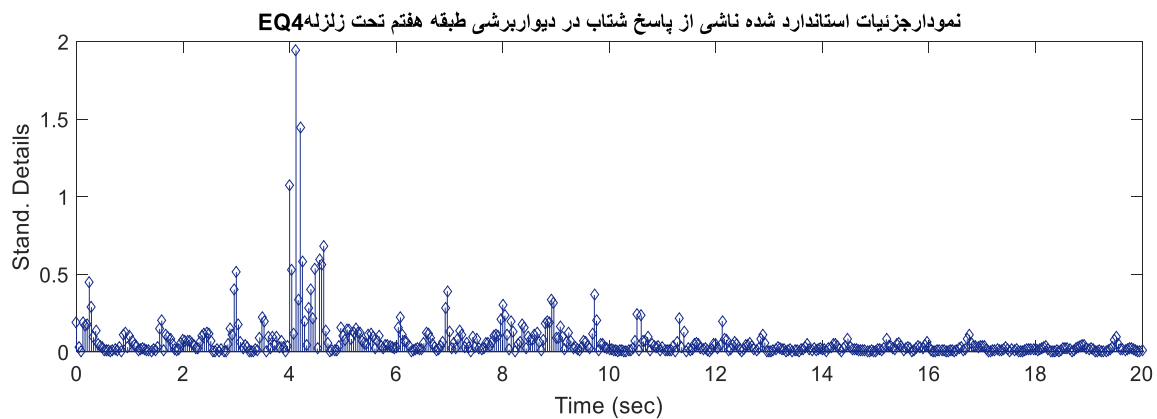
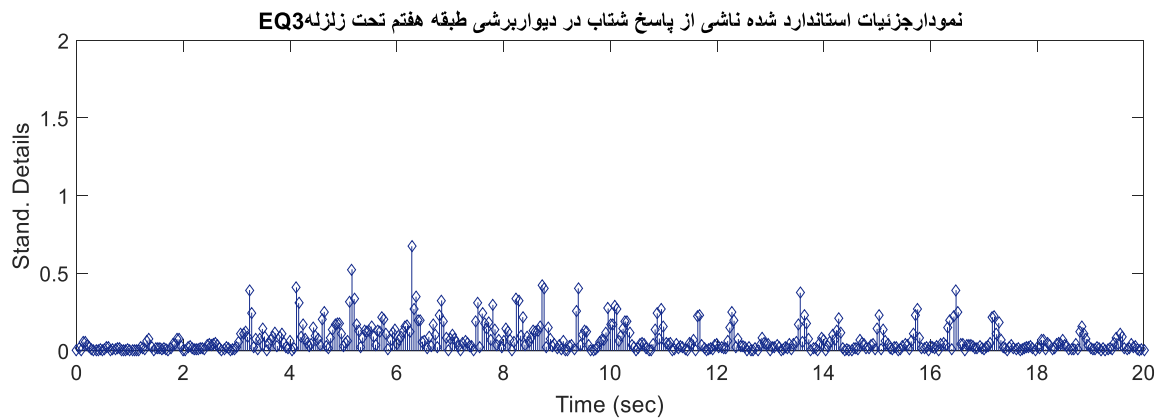
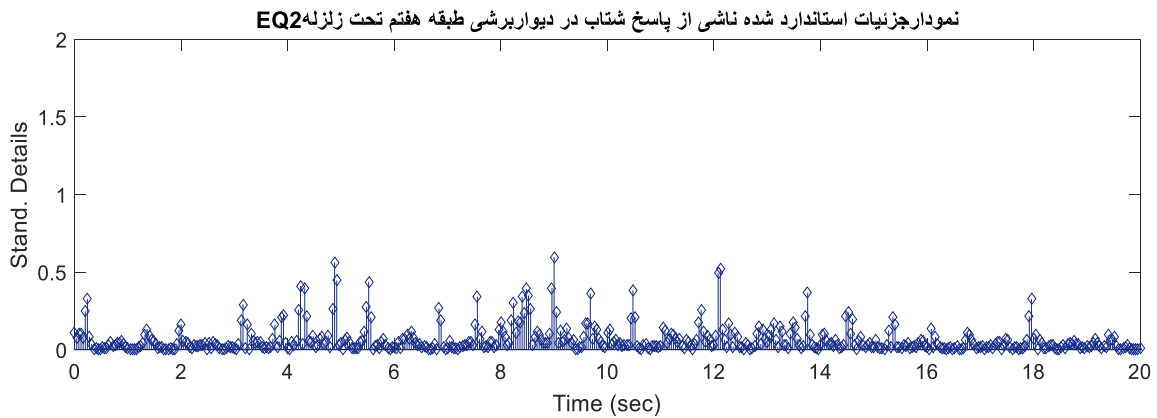
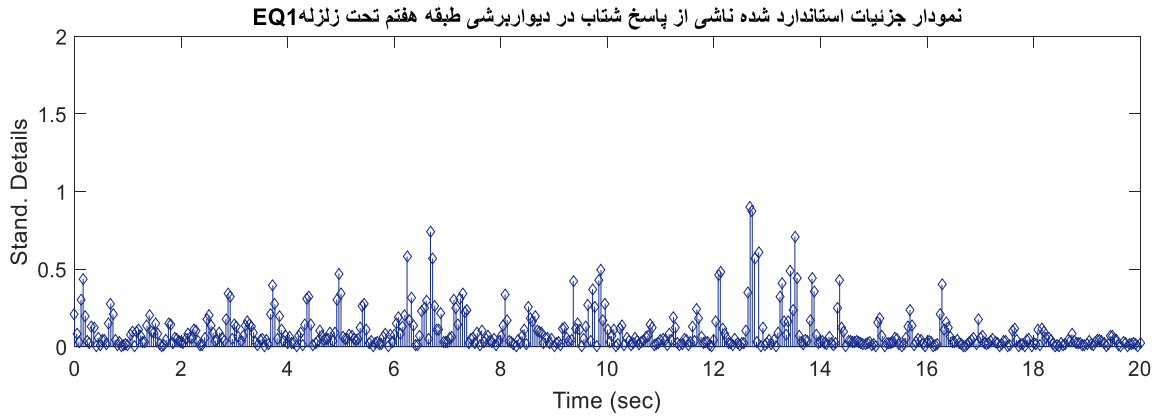


شکل ۱۵: طیف فوریه پاسخ شتاب دیواربرشی طبقه هفتم تحت تحریک نوفه سفید در قبل و بعد از اعمال هر زلزله.

مقدار تغییرات فرکانس در ابتدای بارگذاری و در زلزله اول زیاد می‌باشد و در دو زلزله بعدی تغییرات محسوسی ندارد و به این دلیل که در ابتدای تحلیل، سازه سالم بوده و با هر خرابی اندکی مانند ترک خوردن بتن سختی سازه به‌طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد ولی در انتهای کار به دلیل تسلیم شدن آرماتورها و بروز رفتار غیرخطی از سازه انرژی زلزله مستهلک شده و تاثیر آن بر ایجاد خرابی و تغییرات سختی کاهش می‌یابد. پاسخ شتاب سازه به وسیله تبدیل موجک مورد بررسی قرار می‌گیرد که در زیر جهت نمونه نمودارهای طبقات اول و هفتم ارائه شده است.



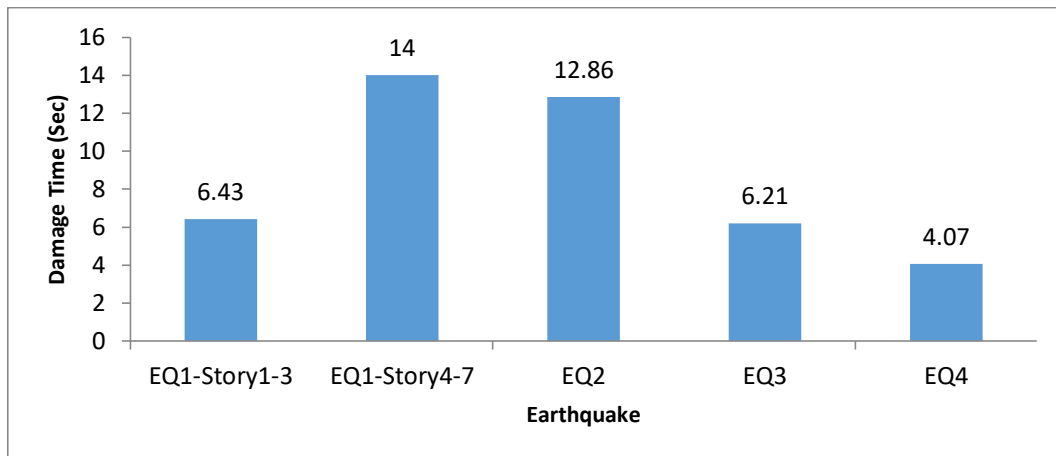
شکل ۱۶: تبدیل موجک ناشی از پاسخ شتاب سازه تحت زلزله در طبقه اول.



شکل ۱۷: تبدیل موجک ناشی از پاسخ شتاب سازه تحت زلزله در طبقه هفتم.



همان طور که از نمودارهای شکل ۱۶ و ۱۷ مشخص است جزئیات نشان دهنده خرابی است که زمان بیشترین اغتشاش نشان دهنده زمان موثرترین خرابی در سازه است که خلاصه آن در شکل ۱۸ آمده است.



شکل ۱۸: زمان موثرترین خرابی در هر زلزله در دیوار برشی.

زمان موثر زلزله‌های دوم تا چهارم در هفت طبقه حدوداً یکسان است. به دلیل افزایش قدرت زلزله و همچنین ایجاد آسیب ناشی از زلزله‌های اولیه زمان آسیب طی وقوع زلزله‌های بعدی کاهش می‌یابد. اما در زلزله اول زمان موثر خرابی در طبقات اول تا سوم نصف زمان موثر خرابی در طبقات چهارم تا هفتم می‌باشد. این کاهش زمان به دلیل وارد شدن زلزله به یک سازه سالم بوده و با توجه به مقدار کم کاهش فرکانس ناشی از زلزله اول فقط نشان دهنده آسیب‌های کوچک ایجاد شده است و با گذشت زمان، زمان موثر واقعی خرابی‌ها نمود پیدا می‌کند.

## ۶- نتیجه‌گیری

پایش سلامت سازه و شناسایی خسارت به معنی توانایی برای نمایش عملکرد سازه شناسایی و ارزیابی هر نوع خسارت در مراحل ابتدایی به منظور کاهش هزینه نگهداری سازه و بهبود ایمنی و قابلیت اطمینان به آن است. پایش سلامت سازه نیاز ضروری برای حفظ ایمنی سازه‌ها و تامین امنیت ساکنان آنها است. در این مقاله آنالیز تاریخیچه زمانی غیر خطی بر مدل سازه هفت طبقه دارای دیواربرشی به کار برده شد. چهار زلزله با PGA مختلف به همراه یک نوفه سفید، در ابتدا و پس از هر زلزله، بر مدل سازه وارد شد. نتیجه شامل پاسخ سازه ناشی از زلزله‌های رکورد شده و نوفه سفید می‌باشد. تبدیل فوریه بر پاسخ نوفه سفید اعمال می‌شود. نتیجه نشان دهنده وجود آسیب به دلیل کاهش فرکانس ناشی از کاهش سختی می‌باشد. سپس با اعمال تبدیل موجک بر پاسخ شتاب سازه ناشی از چهار زلزله می‌توان به زمان آسیب دست یافت. از حاصل این کار می‌توان این گونه استنتاج نمود که پردازش سیگنال تکنیکی قوی جهت پایش سلامت سازه می‌باشد.

## مراجع

- [1] Cawley, P. and Adams, R.D. (1979). The location of defects in structures from measurements of natural frequencies. *Journal of Strain Analysis*, Vol. 14, No. 2, 49-57.
- [2] Melhem, H. and Kim, H. (2003). Damage Detection in Concrete by Fourier and Wavelet Analyses. *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 129, No. 5, 571-577.
- [3] Ge, M. and Lui, E. M. (2005). Structural Damage Identification Using System Dynamic Properties. *Computers and Structures*, Vol. 83, 2185-2196.
- [4] Sasmal, S. and Ramanjanyulu, K. (2009). Detection and Quantification of Structural Damage of a Beam-Like Structure Using Natural Frequencies. *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 1, No. 3, 167-176.
- [5] Shi Yan, Wei Sun, Gangbing Song, Haichang Gu, Lin-Sheng Huo, Bo Liu and Yue-Guo Zhang. (2009). Health Monitoring of Reinforced Concrete Shear Walls Using Smart Aggregates. *Smart Materials and Structures*, Vol. 18, No. 4.
- [6] K. He and W.D. Zhu. (2011). Structural Damage Detection Using Changes in Natural Frequencies: Theory and Applications. *Journal of Physics*, Vol. 305, No. 1, 012054.

- [7] Barad, K. H. and Sharma, D. S., Vyas .V. (2013). Crack Detection in Cantilever Beam by Frequency based Method. *Procedia of Engineering*, Vol. 51, No. 3, 770-775.
- [8] Farhidzadeh, E. Dehghan-Niri, A. Salamone, S. Luna, B. and Whittaker, A. (2013). Monitoring Crack Propagation in Reinforced Concrete Shear Walls by Acoustic Emission. *Journal of Structural Engineering*, Vol. 139, No. 12.
- [9] Vafaei, M. Azlan bin Adnan. and Baharuddin, A. (2013). Real-time Seismic Damage Detection of Concrete Shear Walls Using Artificial Neural Networks. *Journal of Earthquake Engineering*, Vol. 17, No. 1, 137-154.
- [10] Khiem, N. T. and Toan, L. K. (2014). A novel method for crack detection in beam-like structures by measurements of natural frequencies. *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 333, No. 18, 4084-4103.
- [11] Lin, R. M. (2015). Modelling, detection and identification of flexural crack damages in beams using frequency response functions. *Springer Science+Business Media Dordrecht*, Vol. 51, No. 9, 2027-2044.
- [۱۲] عارفزاده طاهره، حسینی واعظ سید روح‌الله، نادرپور حسین، عزالدین امیر. شناسایی موقعیت و شدت ترک‌های چندگانه در تیر طره‌ی بتن‌آرمه با استفاده از تحلیل مودال و آنالیز موجک. مهندسی سازه و ساخت، دوره ۳، شماره ۱، بهار ۱۳۹۵، صفحه ۷۲-۸۳.
- [۱۳] عزالدین امیر، نادرپور حسین، خیرالدین علی، قدرتی‌امیری غلامرضا. تشخیص محل و میزان ترک در تیرها با استفاده از تبدیل موجک. مدل‌سازی در مهندسی. دوره ۱۲، شماره ۳۹، ۱۳۹۳، صفحه ۱-۱۱.
- [14] Naderpour, H. and Fakharian, P. (2016). A synthesis of peak picking method and wavelet packet transform for structural modal identification, *KSCE Journal of Civil Engineering*. 20 (7), 2859–2867. doi:10.1007/s12205-016-0523-4.
- [۱۵] خادمیان، فاطمه. (۱۳۹۵). تشخیص آسیب دیوارهای برشی بتن آرمه با استفاده از تبدیل‌های فوریه و موجک، پایان‌نامه کارشناسی ارشد. دانشگاه سمنان.
- [16] Misiti, M., Misiti, Y., Oppenheim, G. and Poggi, J. (2002). *Wavelet Toolbox for Use with MATLAB*. The Math Works, Inc, 2002.
- [17] Moaveni, B. (2007). *System and damage identification of civil structures*, Ph. D. University of California.