مهندسی عمران شریف، (بهار ۱۳۹۶)
دوره‌ی ۲-۳۳، شماره‌ی ۱/۲، ص. ۱۳۳-۱۴۶، (یادداشت فنّی)

Research Note

# ارزیابی پاسخ دینامیکی غیرخطی سیستم‌های سازه‌یی قاب محیطی با مهاربندی بزرگ تحت اثر جنبش‌های نیرومند زمین

**فرشاد براتی (کارشناس ارشد)**
**افشین مشکوه‌الدینی * (استادیار)**
**دانشکده‌ی فنی و مهندسی، دانشگاه خوارزمی**

یکی از مباحث مهم مهندسی زلزله در دهه‌ی اخیر، موضوع تحلیل فرایند گسلش پیشرو در چگونگی گسترش و انتشار جبهه‌ی گسیختگی گسل بوده است. همچنین موضوع بررسی و مطالعه‌ی ویژگی‌های فیزیکی و لرزه‌شناسی رکوردهای زلزله‌ی ثبت‌شده در حوزه‌ی نزدیک گسل نیز ارتباط ساختاری با پدیده‌ی گسلش و فرایند شکست پیش‌رونده‌ی گسل دارد. مطالعات نشان می‌دهد که پارامترهای پاسخ دینامیکی ساختمان‌های میان‌مرتبه تا بلند با سازه‌ی پایه‌ی قاب خمشی، تحت اثر جنبش‌های پر قدرت و نیرومند زمین در حوزه‌ی نزدیک گسل، با شدت زیادی وارد حوزه‌ی رفتار غیرخطی می‌شوند. یکی از راهکارهای مناسب برای کاهش خسارت‌های ناشی از زلزله در ساختمان‌های میان‌مرتبه تا بلند، کاربرد سیستم سازه‌یی قاب محیطی با مهاربندی بزرگ است. کاربرد مهاربندهای بزرگ در سیستم‌های قاب محیطی، باعث ایجاد مؤلفه‌ی سختی مناسب در برابر بارهای جانبی ناشی از زلزله‌های نیرومند خواهد شد. همچنین ضمن افزایش پتانسیل سیستم‌های ذکرشده برای استفاده در ساختمان‌های میان‌مرتبه تا بلند، یک توزیع یکنواخت‌تر از تنش‌های محوری را در ستون‌های محیطی پلان ایجاد می‌کند. ارزیابی پارامترهای پاسخ دینامیکی این‌گونه سازه‌ها نشان‌دهنده‌ی عملکرد لرزه‌یی بسیار خوب به‌ویژه تحت اثر رکوردهای نیرومند ثبت‌شده در حوزه‌ی نزدیک گسل‌هاست.

**واژگان کلیدی:** گسلش پیشرو، رکورد حوزه‌ی نزدیک، رفتار غیرخطی، عملکرد لرزه‌یی، قاب محیطی مهاربندی شده.

farshad7941@gmail.com
meshkat@khu.ac.ir

## ۱. مقدمه

خسارت شدید واردشده به مناطق پر جمعیت شهری در هنگام زلزله‌های بزرگ و نیرومند همانند امپریال ولی[۱] (۱۹۷۹)، لوما پریتا[۲] (۱۹۸۹)، و نورثریج[۳] (۱۹۹۴) که در کالیفرنیا رخ داده‌اند و نیز زلزله‌ی کوبه‌ی[۴] ژاپن (۱۹۹۵)، چی‌چی[۵] تایوان (۱۹۹۹) و بم (ایران)، روند پژوهش‌های این بخش از مهندسی عمران را به سوی جنبه‌های گوناگون ارزیابی دقیق نیاز لرزه‌یی سازه‌ها به‌ویژه در حوزه‌های نزدیک گسل‌های فعال سوق داده است. جنبش‌های نیرومند زمین ثبت‌شده در ایستگاه‌های لرزه‌نگاری نزدیک به گسل‌های فعال به دلیل داشتن ویژگی‌های خاص فیزیکی، قابلیت‌های شگرفی در ایجاد خرابی و صدمات گسترده‌ی سازه‌یی دارند. ارزیابی مقوله‌های ذکرشده، ضرورت پرداختن به موضوع لرزه‌شناسی حوزه‌ی نزدیک را هر چه بیشتر نمایان می‌سازد.[۱]

شایان ذکر است که در نزدیکی صفحه‌ی شکست یک گسل فعال، جنبش‌ها و لرزش‌های زمین به‌طور قابل توجهی تحت تأثیر مکانیزم گسلش،[۶] انتشار گسیختگی،[۷] و همچنین تغییرشکل‌های پر دامنه‌ی دینامیکی قرارگرفته است و در شرایط خاص نیز متأثر از حرکات پرتابی[۸] در ساختار شکست گسل‌ها به‌ویژه امتداد لغز[۹] و شیب لغز[۱۰] خواهند بود.[۱] تأثیرات ترکیبی فرایندهای یادشده سبب می‌شود که بیشتر انرژی جنبشی ارتعاشات زمین در بازه‌ی زمانی یک ساختار پالس سرعت[۱۱] پر دامنه و با دوره‌ی تناوب بلند پدیدارشده در تاریخچه‌ی زمانی رکورد زلزله آزاد شود. شایان ذکر است که ساختارهای پالس سرعت متناظر با دو مؤلفه‌ی موازی صفحه‌ی شکست گسل (LN) و نیز مؤلفه‌ی عمود بر آن (TR) یکسان و هم‌زمان نیستند. همچنین مطالعات نشان می‌دهند که به‌طور کلی ارتعاشات نیرومند زمین در حوزه‌ی نزدیک گسل با پالس‌های دارای دوره‌ی تناوب بیش از ۱ ثانیه و همچنین زلزله‌های پر قدرت با مدت دوام بیشتر از ۱۰ ثانیه، قابلیت ایجاد سیکل‌های ارتعاشی شدید در رفتار لرزه‌یی سازه، همراه با پدیدارشدن مکانیزم خمیری و نیز بروز ویژگی‌های غیرخطی را دارند. بدین ترتیب می‌توان استنباط کرد که روند احتمالی پیدایش و نیز افزایش

* نویسنده مسئول

*تاریخ: دریافت ۱۳۹۴/۲/۵، اصلاحیه ۱۳۹۴/۴/۲۴، پذیرش ۱۳۹۴/۶/۴.*

Archive of SID
www.SID.ir

ویژگی‌های رفتار غیرخطی در سیکل‌های پاسخ لرزه‌یی ساختمان‌های میان‌مرتبه تا بلند نسبت به رکوردهای نیرومند حوزه‌ی نزدیک، متفاوت از پارامترهای پاسخ سازه نسبت به رکوردهای حوزه‌ی دور باشد.[۲]

سازه‌های قاب محیطی خمشی یکی ازکارآمدترین فرم‌های سازه‌یی ساختمان‌های بلند هستند. همچنین تأثیرات پدیده‌ی لنگی برش نیز در رفتار سازه‌های مذکور به‌طور مشخص ملاحظه می‌شود، که اثرات آن نیز در توزیع غیریکنواخت نیروهای محوری در ستون‌های محیطی سازه به‌ویژه ستون‌هایی که در راستای عمود بر جهت بارگذاری جانبی قرار دارند، آشکار است. بدیهی است که این رفتار سبب خواهد شد تا از تمامی قابلیت مقاومتی سازه در مقابله با بارهای جانبی استفاده نشود. شایان ذکر است که با کاربرد مهاربندهای بزرگ در ساختارهای قاب محیطی می‌توان علاوه بر افزایش فاصله بین ستون‌ها و بالابردن پتانسیل آن برای استفاده در ساختمان‌های بلندتر، اثر این مشکل را نیز به مقدار زیادی کاهش داد. ساختار پیوسته‌ی مهاربندهای بزرگ علاوه بر افزایش کارایی قاب‌های محیطی در تحمل بارهای ثقلی، در برابر بارهای جانبی همانند یک تیر بزرگ طره عمل می‌کنند. بدین ترتیب ضمن کاهش اندازه‌ی تغییرشکل جانبی سازه، مقدار تنش محوری در ستون‌های پیرامونی پلان ساختمان بلند نیز به مقدار قابل توجهی کاهش می‌یابد. در پژوهش حاضر، ویژگی‌های رفتار لرزه‌یی سازه‌های بلندمرتبه با ساختار قاب محیطی با مهاربندهای بزرگ و نیز پارامترهای پاسخ آنها نسبت به رکوردهای حوزه‌ی دور و نزدیک تحلیل شده و ارزیابی توصیفی بر روی نتایج صورت گرفته است. توصیف شرایط بارگذاری، محاسبات بارهای جانبی ناشی از زلزله و پارامترهای مربوط نیز براساس آیین‌نامه‌های ایران صورت پذیرفته است. مجموعه‌ی رکوردهای انتخابی نیز دارای انواع اثرات پدیده‌ی گسلش و جهت‌داری هستند و براساس زلزله‌های معروف ایران و نیز زلزله‌ی نورثریج (۱۹۹۴) ایالات کالیفرنیای آمریکا انتخاب شده‌اند. شایان ذکر است که معیار اصلی در انتخاب رکوردهای مذکور برای انجام آنالیزهای غیرخطی تاریخچه‌ی زمانی، وجود پالس یا پالس‌های پر انرژی و بلندمدت در تاریخچه‌ی زمانی سرعت زمین بوده است. شناخت خصوصیات پالس‌های دوره‌ی تناوب بلند برای طراحی سازه‌ها در حوزه‌ی نزدیک گسل، اهمیت زیادی دارد. این نکته قابل ذکر است که برای مقایسه‌ی بهتر رفتار لرزه‌یی ۳ سازه‌ی مطالعاتی، محور قائم تمام نمودارهای پاسخ نسبت به ارتفاع نرمال شده است.[۳و۴]

## ۲. پیشینه‌ی پژوهش

شایان ذکر است که پس از وقوع زلزله‌های بزرگ سان‌فرناندو[۱۲] (۱۹۷۱)، امپریال ولی (۱۹۷۹)، لوما پریتا (۱۹۸۹)، و نورثریج (۱۹۹۴) توجه پژوهشگران به جنبش‌های نیرومند ثبت‌شده در محدوده‌ی نزدیک به منبع لرزه‌یی و مشخصه‌های متفاوت آنها جلب شده است. در یک مطالعه‌ی رفتار سازه‌ها تحت حرکت‌های پالس زمین (۱۹۸۷)، رفتار لرزه‌یی یک سازه‌ی فولادی ۱۰ طبقه و ۳ دهانه، تحت زلزله‌ی امپریال ولی (۱۹۷۹) بررسی و ملاحظه شده است که افزایش نسبت دوره‌ی تناوب حرکت زمین به دوره‌ی تناوب طبیعی سازه، همراه با افزایش دامنه‌ی اسپایک‌های پر انرژی شتاب رکوردشده‌ی زمین، موجب فزونی‌گرفتن دامنه‌ی پاسخ غیرخطی سازه می‌شود. براساس مطالعه‌ی اخیر، تمرکز تغییرشکل در طبقات پایین ساختمان، که ستون‌های آن بار محوری زیادی را تحمل می‌کنند، سبب شدت‌یافتن اثرات $P-\Delta$ در طبقات پایین می‌شود. بنابراین خسارت‌های ناشی از حرکت‌های ضربه‌یی زمین در طبقات پایین تمرکز و شدت بیشتری خواهد داشت. همچنین رکوردهای نیرومند حوزه‌ی نزدیک باعث افزایش چشم‌گیر پارامتر نیاز شکل‌پذیری می‌شوند.[۵] در طراحی سازه‌هایی براساس آیین‌نامه‌های رایج و بررسی رفتار آنها تحت زلزله‌های حوزه‌ی نزدیک (۱۹۹۵) ملاحظه شده است که پارامترهای نیاز شکل‌پذیری تحمیل‌شده به سازه‌های با دوره‌ی تناوب بلند و انعطاف‌پذیر، به‌طور قابل ملاحظه‌یی از حدود ظرفیت آنها تجاوز می‌کند. همچنین در سال ۱۹۹۷ در بررسی جامع پارامترهای رفتار لرزه‌یی دو ساختمان ۶ و ۲۰ طبقه، جنبه‌های تحلیلی پژوهش مذکور در برگیرنده‌ی مشخصات رفتار غیرخطی سازه‌ی حاوی انواع مکانیزم‌های اتصال و نیز تأثیر جنبش‌های پر قدرت زمین در حوزه‌ی نزدیک گسل بوده و در روند تحلیل‌های غیرخطی، با درنظرگرفتن $P-\Delta$ برای المان‌های ستون قاب‌های داخلی ملاحظه شده است که میزان و روند تغییرات پارامترهای پاسخ لرزه‌یی، ارتباط نزدیکی با بیشینه‌ی تغییرمکان زمین داشته است. نتایج پژوهش مذکور نشان داده است که ۳ پارامتر: ارتفاع سازه، سختی جانبی، و مکانیزم اتصالات المان‌ها در پاسخ لرزه‌یی سازه مؤثر هستند.[۶و۷]

در پی بررسی‌ها و مطالعات دیگری این نتیجه به‌دست آمده است که وقتی سازه به‌طور نسبی سختی جانبی زیادی دارد، تقاضای شکل‌پذیری در سطح پایین‌تری قرار می‌گیرد و تقاضای بزرگ‌تر در طبقات بالاتر سازه اتفاق می‌افتد. همچنین وقتی که مقاومت سازه کاهش می‌یابد، تقاضای شکل‌پذیری در بخش‌های بالاتر در محدوده‌ی مقادیر ۳ تا ۵ باقی می‌ماند و همچنین تقاضای شکل‌پذیری بیشینه نیز به طبقات پایین منتقل می‌شود.[۸] بر پایه‌ی نتایج مطالعات دیگری (۲۰۰۶) بیان شده است که توصیف پتانسیل خرابی رکوردهای حوزه‌ی نزدیک به‌صورت تابعی از شتاب‌نگاشت، چندان مناسب نیست. همچنین لازم است که گروه‌بندی جدیدی برای توصیف رکوردهای زلزله براساس تابعی از نوع مکانیزم گسل، مشخصات فیزیکی و توجه به پارامتر تقاضای لرزه‌یی متناظر، در نگرش تحلیلی و رویکرد طراحی آیین نامه‌های طرح لرزه‌یی لحاظ شود.[۹و۱۰] همچنین نتایج پژوهشی (۲۰۰۶) نشان داده است که تحت اثر رکوردهای پر قدرت حوزه‌ی نزدیک، سازه‌ها باید بخش بزرگی از انرژی جنبشی اعمالی را در ۱ یا ۲ سیکل ارتعاشی با دامنه‌ی بزرگ، مستهلک کنند. افزون بر آن، نسبت دوره‌ی تناوب پالس به دوره‌ی تناوب سازه در تعیین پارامترهای نیاز اهمیت اساسی دارد.[۱۱]

بر پایه‌ی چند مطالعه‌ی موردی دیگر (۲۰۰۷)، برای اسکلت‌های قاب خمشی ۱۹ طبقه ملاحظه شده است که رکوردهای نیرومند ثبت‌شده در زلزله‌هایی به بزرگای ۶٫۷ تا ۷٫۳ در مقیاس ریشتر، تقاضای دریفت در حدود ۵٪ و همچنین تقاضای دوران خمیری حدود ۴ تا ۵ درصد رادیان را در اتصالات تیر به ستون ایجاد می‌کنند. حصول این نتیجه در حالی بوده است که آزمایش‌های صورت‌گرفته بر روی اتصالات مرسوم قبل از زلزله‌ی نورثریج (۱۹۹۴)، دوران خمیری کمتر از ۳٪ رادیان را نشان می‌داده‌اند.[۱۲] همچنین در مجموعه‌ی مطالعات دیگر چنین نتیجه شده است که سازه‌های با ارتفاع متوسط تا بلند تحت اثر رکوردهای پر انرژی حوزه‌ی نزدیک باید قادر باشند که ضمن تحمل دامنه‌های بزرگ برای پارامتر دریفت در رفتار لرزه‌یی سه‌بعدی، مقادیر بزرگ انرژی جنبشی حاصل از حرکات پر قدرت زمین را در تعداد محدودی سیکل ارتعاشی میرا کنند.[۱۳و۱۴]

## ۳. قاب‌های محیطی با مهاربندی بزرگ[۱۳]

مقاومت جانبی سازه‌های با ساختار قاب محیطی خمشی به وسیله‌ی قاب‌های بسیار سخت، که در محیط ساختمان قرارگرفته‌اند و تشکیل جدار بسته‌یی را می‌دهند، تأمین می‌شود. قاب‌های محیطی خمشی شامل ستون‌هایی به فواصل ۲ تا ۴ متر هستند،



Archive of SID
www.SID.ir

که توسط شاه‌تیرهایی عمیق به یکدیگر متصل می‌شوند. هنگامی که سازه تحت اثر بار جانبی قرار می‌گیرد، قاب‌های صلب محیطی در جهت بارگذاری، به‌صورت جان‌ها و قاب‌های خمشی عمود بر جهت بارگذاری به‌صورت بال‌های یک ساختار مقاوم طره‌یی حجیم محیطی، عمل خواهند کرد. مطالعات نشان می‌دهند که بازدهی و کارایی سازه‌یی ساختارهای قاب محیطی خمشی، بسیار خوب است. با وجود این، موضوع کاهش اثرات لنگی برش[۱۴] به‌ویژه در رفتار استاتیکی و دینامیکی المان‌های ستون مربوط به یک سازه‌ی قاب محیطی خمشی، یک مبحث جامع مطالعاتی است. وجود پدیده‌ی لنگی برش سبب می‌شود که ستون‌های وسط قاب‌های خمشی هر دو بال نسبت به ستون‌های گوشه‌یی، تحت اثر تنش کمتری قرار گیرند. بدین لحاظ از تمام قابلیت مقاومتی آنها در رفتار لرزه‌یی کل ساختمان بلند استفاده نمی‌شود.[۱۵و۱۶]

یکی از راه‌های افزایش بازدهی سازه‌یی قاب‌های محیطی خمشی براساس بیشترکردن فاصله‌ی بین ستون‌ها و بالابردن قابلیت هندسی این سیستم‌ها برای استفاده در اسکلت ساختمان‌های بلندتر از ۴۰ طبقه، تدوین شده است. فرایند اضافه‌کردن مهاربندهای قطری در پانل‌های قابی پیرامون سازه، در شکل برپایی یک آرایش هندسی المان‌های بزرگ مورب انجام می‌گیرد. کاربرد این نوع مهاربندهای بزرگ در واقع تضمین می‌کند که ستون‌های محیطی به‌صورت یک‌پارچه در تحمل بار ثقلی و جانبی عمل کنند. همچنین تشکیل یک ساختار لوله‌یی خرپایی، احتمال افزایش نامتناسب بار محوری در ستون‌های گوشه‌یی را کاهش می‌دهد. ساختار سازه‌یی قاب محیطی با مهاربندی بزرگ را می‌توان برای ساختمان‌های تا ۱۰۰ طبقه به‌کار برد.[۱۶-۱۸]

مطالعه‌ی مشخصات رفتاری و چگونگی پاسخ لرزه‌یی مهاربندهای بزرگ تحت اثر رکوردهای نیرومند حوزه‌ی نزدیک، یکی از موضوعات مهم پژوهشی در راستای بهبود پارامترهای طراحی انواع سیستم‌های مهاربندی در ساختمان‌های بلندمرتبه محسوب می‌شود.

## ۴. فرضیات مدل‌سازی

مدل‌های مطالعاتی سه‌گانه‌ی این پژوهش از نوع سازه‌های قاب محیطی مهاربندی شده‌ی ۲۰ و ۳۰ طبقه با ارتفاع طبقه‌ی ۳/۵ متر هستند. پلان و ساختار هندسی قاب محیطی سازه‌یی در شکل ۱ نشان داده شده‌اند. سازه‌های مطالعاتی در هر دو جهت X و Y، ۶ دهانه با طول ۶ متر دارند. هندسه‌ی سازه‌های مذکور در هر ۴ صفحه‌ی قابی مهاربندی شده‌ی محیطی، ۴ دهانه‌ی آزاد دارد. بارگذاری محاسباتی مرده و زنده‌ی طراحی برای کل طبقات به ترتیب $0.5\ t/m^2$ و $0.2\ t/m^2$ و برای بام نیز برابر $0.5\ t/m^2$ و $0.15\ t/m^2$ است.[۱۹و۲۰]

سازه‌های مطالعاتی در تهران قرار داشته و خاک ساختگاه از نوع II است. مشخصات مقاطع اعضاء سازه‌ها برای هر دو مدل ۲۰ طبقه، یکسان و براساس استاندارد ملی ساختمان ایران (مباحث ششم و دهم) و آیین‌نامه‌ی ۲۸۰۰ (ویرایش سوم) با استفاده از نرم‌افزار SAP2000 طراحی شده‌اند.[۲۰-۲۲] براساس این استانداردها در کنترل طرح لرزه‌یی، دو معیار محدودیت جابه‌جایی نسبی طبقات و رعایت اصل ستون قوی ـ تیر ضعیف در روند طراحی در نظر گرفته شده است. روند طراحی نیز بر پایه‌ی معیار شکل‌پذیری متوسط است. میرایی سازه به‌صورت کلاسیک متناسب با سختی و جرم لحاظ شده و مقدار ضریب میرایی برابر $\xi = 5\%$ است. مقاطع و نوع پروفیل عضوهای سازه‌های مطالعاتی در جدول ۱ و شکل ۲ نشان داده شده است.[۲۱-۲۳]

## ۵. ویژگی‌های حرکات زمین در حوزه‌ی نزدیک

ساختار پیوسته‌ی ارتعاشات موج‌گونه‌ی زمین در حوزه‌ی نزدیک گسل، تحت تأثیر ۳ پارامتر اصلی فاصله و میزان نزدیکی ناحیه‌ی موردنظر تا گسل لرزه‌زا، راستای لغزش در مکانیزم داخلی گسل و نیز راستای خط اصلی گسل نسبت به ساختگاه است. ساختار و چگونگی کنش و واکنش در مکانیزم داخلی گسل سبب انتشار امواج زلزله خواهد شد. پالس‌های ثبت‌شده‌ی ناشی از این فعالیت داخلی گسل، معمولاً در بازه‌های زمانی ابتدای رکورد زلزله آشکار می‌شوند. این فرایند به گونه‌یی است که راستای بخشی از نیرومندترین و پرانرژی‌ترین پرتوهای امواج برشی زلزله در جهت لغزش گسل بوده و نیز به طور نسبی منطبق با راستای انتشار شکست در مکانیزم داخلی گسل است. بر همین اساس شرایط ایجاد پالس‌های بسیار نیرومند و پر دامنه‌ی تغییرمکان مهیا خواهد شد.[۲۴و۲۵]

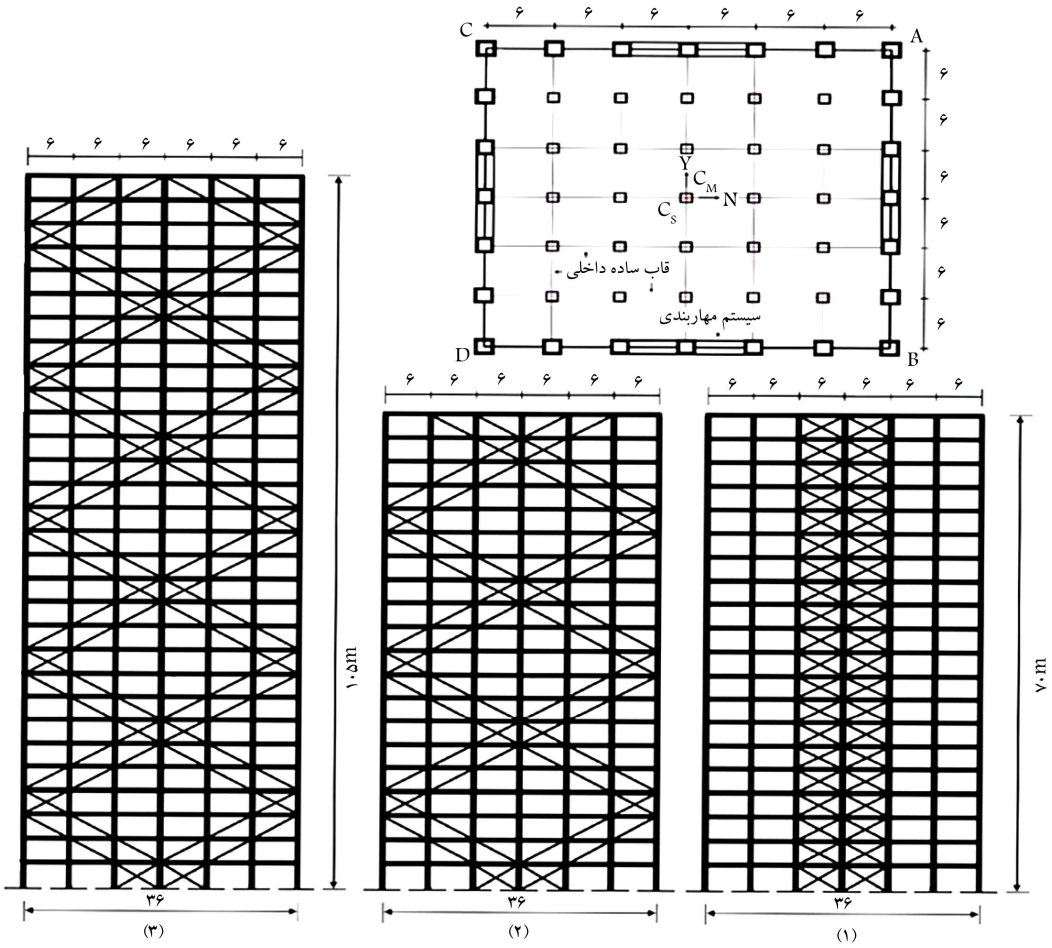
نتایج مطالعات لرزه‌شناسی نشان می‌دهند که رکوردهای نیرومند حوزه‌ی نزدیک، حاوی انواع ساختارهای پالس‌گونه در رکورد شتاب و نیز تاریخچه‌ی زمانی سرعت و تغییرمکان زمین هستند. پدیدارشدن این ساختارهای موج‌گونه که دوره‌ی تناوب بلند نیز دارند، تداعی‌کننده‌ی تحریکات دینامیکی به‌صورت ضربه است. دامنه‌ی این پالس‌ها و مدت دوام حرکات نیرومند زمین نیز بستگی به جهت اصلی انتشار امواج زلزله دارد. همچنین ملاحظه شده است که اگر ساختار شکست گسل به سمت ساختگاه انتشار یابد، چون سرعت گسترش گسیختگی در حدود سرعت انتشار امواج برشی است، بدین لحاظ امواج نیرومند لرزه‌یی در یک بازه‌ی زمانی کوتاه به ساختگاه خواهند رسید. این فرایند باعث ایجاد یک ساختار پالس ترکیبی پر دامنه و با دوره‌ی تناوب بلند شده و توضیح‌دهنده‌ی گسترش مکانیزم شکست گسل با اثرات جهت‌داری پیش‌رونده (گسلش پیشرو) است. چنانچه راستای گسترش گسیختگی در مکانیزم گسل در جهت دورشدن از ساختگاه باشد، آنگاه امواج نه چندان نیرومند لرزه‌یی در یک وضعیت پراکنده به محل مذکور خواهند رسید. نمود فیزیکی این روند به‌صورت پدیدارشدن اسپایک‌های دامنه‌ی کوتاه در تاریخچه‌ی زمانی شتاب رکورد زلزله همراه با ظهور ساختارهای پیوسته‌ی شبه سینوسی کوچک‌دامنه و کم انرژی در نمودار سرعت زمین خواهد بود. بدین لحاظ ضمن ایجاد شبه پالس‌های کم‌دامنه در تاریخچه‌ی زمانی رکورد، بازه‌ی زمانی ارتعاشات به نسبت نیرومند زمین نیز در مقایسه با حالت جهت‌داری پیش‌رونده بیشتر خواهد شد. این ساختار فیزیکی در واقع توصیف‌کننده‌ی انتشار شکست گسل با اثرات جهت‌داری پس‌رونده (گسلش پسرو) است. سومین حالت ملاحظه‌شده نیز با نام وضعیت جهت‌داری خنثی شناخته شده و نمود فیزیکی آن در رکورد شتاب و تاریخچه‌ی زمانی سرعت زمین به‌صورت بروز یک مجموعه اسپایک‌های با دامنه‌ی کوتاه و کم‌انرژی است. نتایج مطالعات پیشین نشان می‌دهند که تعداد کمی از رکوردهای حوزه‌ی نزدیک، اثرات جهت‌داری خنثی (گسلش ساکن) دارند. مشاهده شده است که رکوردهای حاوی اثرات جهت‌داری خنثی به مراتب ضعیف‌تر از رکوردهای دارنده‌ی مشخصات جهت‌داری پس‌رونده هستند و نیز انرژی جنبشی آنها بسیار کمتر از رکوردهای با اثرات جهت‌داری پیش‌رونده است.[۲۵و۲۶]

## ۶. ماهیت رکوردهای مورد استفاده

وقوع زمین‌لرزه‌های بزرگ در نزدیکی مناطقی که در مجاورت گسل‌های فعال واقع شده‌اند، امری اجتناب‌ناپذیر است. بدین لحاظ ارزیابی و شناخت ویژگی‌های حرکات نیرومند زمین در حوزه‌ی نزدیک گسل و تأثیر آن در عملکرد سازه‌ها امری ضروری



Archive of SID
www.SID.ir




شکل ۱. پلان و نمای سازه‌های مطالعاتی ($C_M$ و $C_S$ به ترتیب مراکز جرم و برش طبقه هستند (ابعاد به متر)).

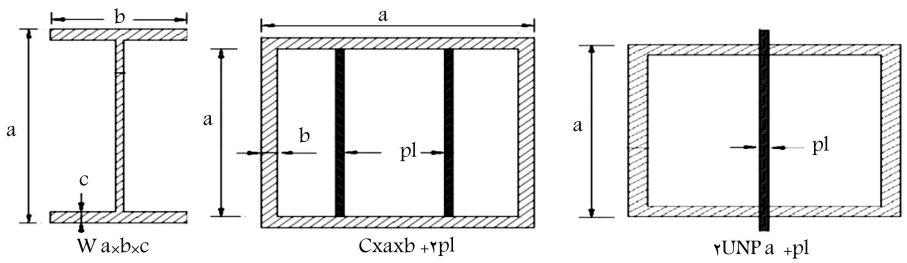
جدول ۱. مقاطع استفاده‌شده در سازه‌های مطالعاتی (ابعاد به cm).

| | طبقه | ستون‌های محیطی پلان | ستون‌های داخلی پلان | تیرها | مهاربندها |
|---|---|---|---|---|---|
| مدل یک | ۵ – ۱ | C۸۰ × ۳/۵ + ۲PL(۷۳ × ۳) | C۷۰ × ۲/۵ | W۴۰ × ۲۰ × ۱/۵ | ۲UNP۳۸ + PL(۴۱ × ۱) |
| | ۱۰ – ۶ | C۷۰ × ۳ + ۲PL(۶۴ × ۲/۵) | C۶۵ × ۲ | W۴۰ × ۲۰ × ۱/۵ | ۲UNP۳۲ |
| | ۱۵ – ۱۱ | C۶۵ × ۲/۵ | C۶۰ × ۲ | W۴۰ × ۲۰ × ۱/۵ | ۲UNP۳۰ |
| | ۲۰ – ۱۶ | C۵۵ × ۱/۵ | C۵۰ × ۱/۵ | W۴۰ × ۲۰ × ۱/۵ | ۲UN۲۶ |
| مدل دو | ۵ – ۱ | C۵۰ × ۲/۵ | C۵۰ × ۲/۵ | W۴۰ × ۲۰ × ۱/۵ | ۲UN۳۸ |
| | ۱۰ – ۶ | C۴۵ × ۲ | C۴۵ × ۲ | W۴۰ × ۲۰ × ۱/۵ | ۲UNP۳۵ |
| | ۱۵ – ۱۱ | C۳۵ × ۱/۵ | C۳۵ × ۱/۵ | W۴۰ × ۲۰ × ۱/۵ | ۲UNP۳۲ |
| | ۲۰ – ۱۶ | C۳۰ × ۱/۵ | C۳۰ × ۱/۵ | W۴۰ × ۲۰ × ۱/۵ | ۲UNP۲۴ |
| مدل سه | ۵ – ۱ | C۶۵ × ۳ | C۶۵ × ۳ | W۴۰ × ۲۰ × ۱/۵ | ۲UNP۴۰ |
| | ۱۰ – ۶ | C۵۵ × ۲/۵ | C۵۵ × ۲/۵ | W۴۰ × ۲۰ × ۱/۵ | ۲UNP۴۰ |
| | ۱۵ – ۱۱ | C۵۰ × ۲/۵ | C۵۰ × ۲/۵ | W۴۰ × ۲۰ × ۱/۵ | ۲UNP۳۸ |
| | ۲۰ – ۱۶ | C۴۵ × ۲ | C۴۵ × ۲ | W۴۰ × ۲۰ × ۱/۵ | ۲UNP۳۵ |
| | ۲۵ – ۲۱ | C۴۰ × ۲ | C۴۰ × ۲ | W۴۰ × ۲۰ × ۱/۵ | ۲UNP۳۲ |
| | ۳۰ – ۲۶ | C۳۵ × ۱/۵ | C۳۵ × ۱/۵ | W۴۰ × ۲۰ × ۱/۵ | ۲UNP۲۸ |

Archive



www.SID.ir




شکل ۲. نوع پروفیل اعضاء سازه‌های مطالعاتی.

جدول ۲. مشخصات رکوردهای انتخابی.

| زلزله | ایستگاه | Mw | بیشینه‌ی شتاب زمین (g) | | | بیشینه‌ی سرعت زمین (cm/s) | | | بیشینه‌ی جابه‌جایی زمین (cm/s²) | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | مؤلفه‌ی موازی گسل | مؤلفه‌ی عمود گسل | مؤلفه‌ی قائم گسل | مؤلفه‌ی موازی گسل | مؤلفه‌ی عمود گسل | مؤلفه‌ی قائم گسل | مؤلفه‌ی موازی گسل | مؤلفه‌ی عمود گسل | مؤلفه‌ی قائم گسل |
| بم (۲۰۰۳) | Bam | ۶٫۶ | ۰٫۶۳۵ | ۰٫۷۹۳ | ۰٫۹۹۹ | ۵۹٫۶ | ۱۲۳٫۷ | ۳۷٫۶۶ | ۲۰٫۷ | ۳۷٫۴ | ۱۰٫۱۱ |
| طبس (۱۹۷۸) | Tabas | ۷٫۴ | ۰٫۸۳۶ | ۰٫۸۵۱ | ۰٫۶۸۸ | ۹۷٫۷ | ۱۲۱٫۳ | ۴۵٫۵ | ۳۹٫۹ | ۹۴٫۵ | ۱۷ |
| نورثریج (۱۹۹۴) | Sylmar(SCS) | ۶٫۷ | ۰٫۸۹۷ | ۰٫۶۱۲ | ۰٫۵۸۶ | ۱۰۲٫۸ | ۱۱۷٫۴ | ۳۴٫۶ | ۴۶٫۹۹ | ۵۳٫۴۴ | ۲۵٫۴۴ |
| | Jensen Filter Plant (JFP) | ۶٫۷ | ۰٫۵۹۳ | ۰٫۴۲۴ | ۰٫۴ | ۹۹٫۳ | ۱۰۶٫۲ | ۳۴٫۱ | ۲۴ | ۴۳٫۰۶ | ۸٫۸۹ |
| | Rinaldi (RRS) | ۶٫۷ | ۰٫۴۷۲ | ۰٫۸۳۸ | ۰٫۸۵۲ | ۷۳ | ۱۶۶٫۱ | ۵۰٫۷ | ۱۹٫۷۶ | ۲۸٫۸۷ | ۱۹٫۷۶ |
| | Newhall W.Pico (WP) | ۶٫۷ | ۰٫۳۲۵ | ۰٫۴۵۵ | ۰٫۵۵ | ۶۷٫۴ | ۹۲٫۸ | ۳۷٫۲ | ۱۶٫۱۱ | ۵۶٫۶۴ | ۱۳٫۲۹ |
| | Sepulveda (SPV) | ۶٫۷ | ۰٫۹۳۹ | ۰٫۷۵۳ | ۰٫۴۶۷ | ۷۶٫۶ | ۸۴٫۸ | ۳۳٫۲ | ۱۴٫۹۵ | ۱۸٫۶۸ | ۹٫۵۸ |
| | Saticoy (STC) | ۶٫۷ | ۰٫۳۶۸ | ۰٫۴۷۷ | ۰٫۱۵۳ | ۲۸٫۹ | ۶۱٫۵ | ۵٫۵۷ | ۸٫۴۴ | ۲۲٫۰۶ | ۳٫۳۲ |
| | Arleta (ARL) | ۶٫۷ | ۰٫۳۰۸ | ۰٫۳۴۴ | ۰٫۵۵۲ | ۲۳٫۲ | ۴۰٫۰۶ | ۱۸٫۰۴ | ۱۰٫۷۵ | ۱۵٫۰۴ | ۸٫۸۳ |
| | Moorpark (MRP) | ۶٫۷ | ۰٫۲۹۲ | ۰٫۱۹۳ | ۰٫۱۵۹ | ۲۰٫۷ | ۲۰٫۲ | ۷٫۹ | ۴٫۲۴ | ۴٫۷۹ | ۰٫۹ |

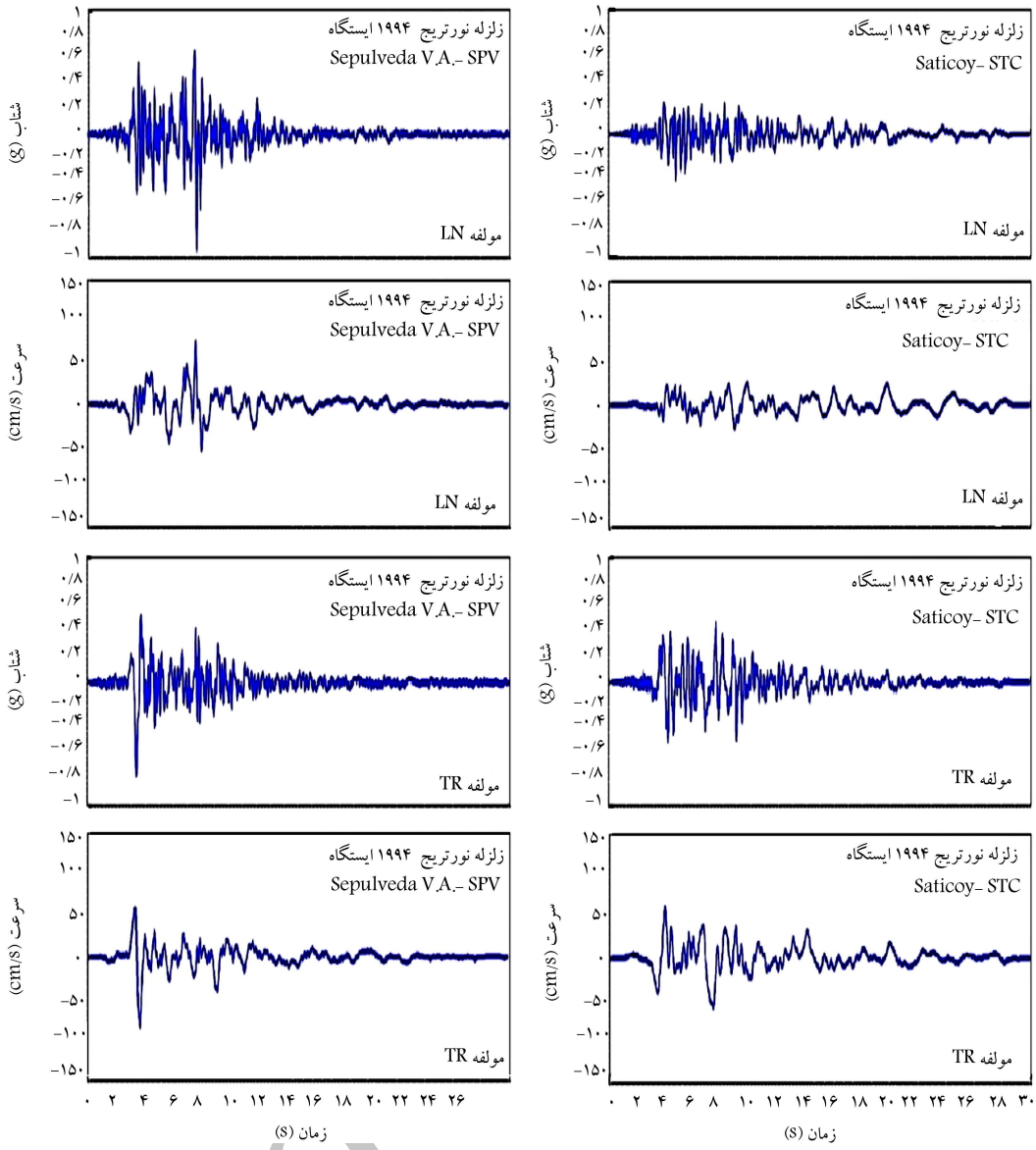
خواهد بود. شایان توجه است که گونه‌های مختلف اثرات پدیده‌ی گسلش و جهت‌داری، شامل فرایند شکست پیش‌رونده‌ی[15] گسل، مقوله‌ی اثرات جهت‌داری پس‌رونده[16] و نیز ساختار گسلش ساکن[17] در رکوردهای انتخابی پژوهش حاضر وجود دارند.[۲۷]

رکوردهای انتخابی در این پژوهش شامل دو مجموعه از جنبش‌های ثبت‌شده‌ی نیرومند زمین در نواحی نزدیک و دور از گسل هستند. این رکوردها در هنگام وقوع زلزله‌های بزرگ ایران و نیز زلزله‌ی نورثریج (۱۹۹۴) در ایالت کالیفرنیا ثبت شده‌اند. مطابق جدول ۲ و شکل ۳، رکوردهای ایرانی بم و طبس و نیز ۴ رکورد بسیار نیرومند و پر انرژی Newhall W.Pico (WPI)، Sylmar (SCS)، (RRS) Rinaldi و Jensen (JFP) ثبت‌شده در حوزه‌ی نورثریج، اثرات گسلش پیشرو همراه با جهت‌داری پیش‌رونده دارند. پالس‌های بزرگ و دوره‌ی تناوب بلند سرعت در تاریخچه‌ی زمانی رکوردهای مذکور، متناظر با هر دو مؤلفه‌ی موازی و عمود بر صفحه‌ی شکست گسل ملاحظه می‌شوند. یک مجموعه‌ی بزرگ و بلندمدت پالس‌ها و اسپایک‌های پر دامنه‌ی شتاب نیز در رکوردهای فوق مشاهده می‌شوند. بر پایه‌ی شکل ۳ می‌توان دریافت که ساختار تاریخچه‌ی زمانی رکوردهای حوزه‌ی نزدیک و نه چندان نیرومند Sepulveda (SPV) و Saticoy (STC)، نشان‌دهنده‌ی یک مجموعه‌ی پیوسته‌ی متشکل از چند پالس کوچک و کم دامنه‌ی سرعت همراه با اسپایک‌های به نسبت پر دامنه‌ی شتاب است. اثرات جهت‌داری در این دو رکورد به مراتب ضعیف‌تر از رکوردهای WPI، SCS، RRS و JFP است. رکورد (ARL) Arleta حاوی اثرات گسلش ساکن است و هر چند در فاصله‌ی نزدیک نسبت به مرکز سطحی زلزله ثبت شده است، در عین‌حال هیچ‌گونه ساختار پالس‌مانند در تاریخچه‌ی زمانی این رکورد مشاهده نمی‌شود. در بازه‌ی زمانی از حدود ۲ تا ۱۲ ثانیه از رکورد شتاب هر دو مؤلفه‌ی LN و TR مربوط به رکورد ARL، تعداد زیادی اسپایک‌های به نسبت کم‌دامنه مشاهده می‌شود. رکورد ایستگاه مورپارک[18] در هنگام زلزله‌ی نورثریج، از نوع حوزه‌ی دور است و هیچ‌گونه ساختار پالس سرعت در تاریخچه زمانی آن ملاحظه نمی‌شود.[۲۸و۲۹] همچنین با توجه به طیف‌های فوریه‌ی دو رکورد ARL و MRP، که نحوه‌ی توزیع دامنه‌ی حرکات زمین در بسامدهای مختلف را تشریح می‌کند، مشاهده می‌شود که محدوده‌ی دامنه‌های نسبی بیشینه، در بازه‌ی بسامدی بالاتر از ۱ هرتز قرار دارند (شکل ۴).

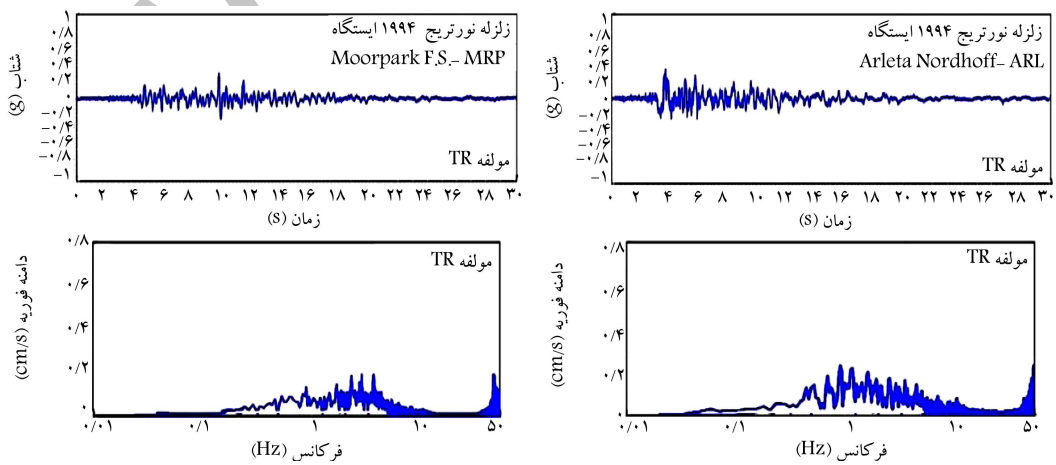
بیشتربودن مؤلفه‌ی ارتفاعی طیف فوریه، به‌ویژه در بازه‌ی بسامدهای ذکرشده، بیان‌گر افزایش نسبی سهم انرژی جنبشی متناظر با مودهای ارتعاشی با دوره‌ی تناوب



Archive of SID
www.SID.ir



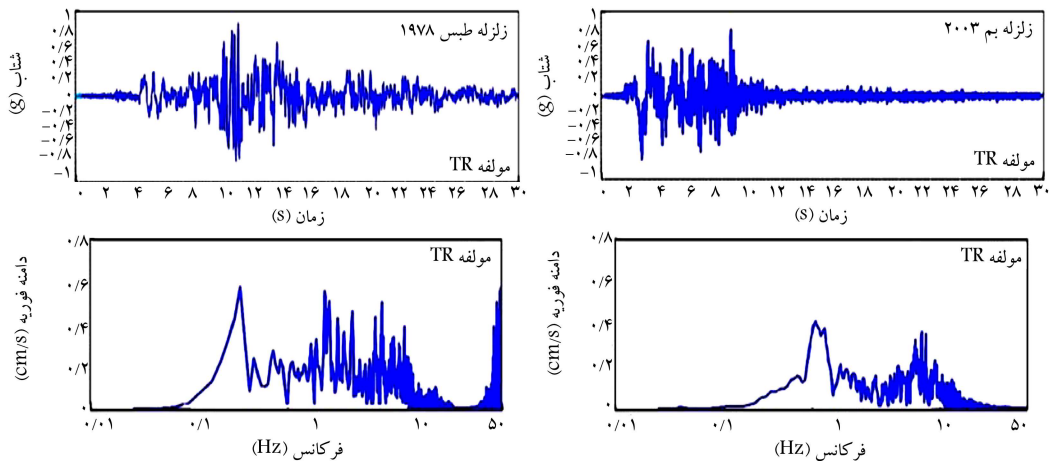

شکل ۳. تاریخچه‌ی زمانی شتاب و سرعت رکوردهای SPV و STC در دو مؤلفه‌ی LN و TR.



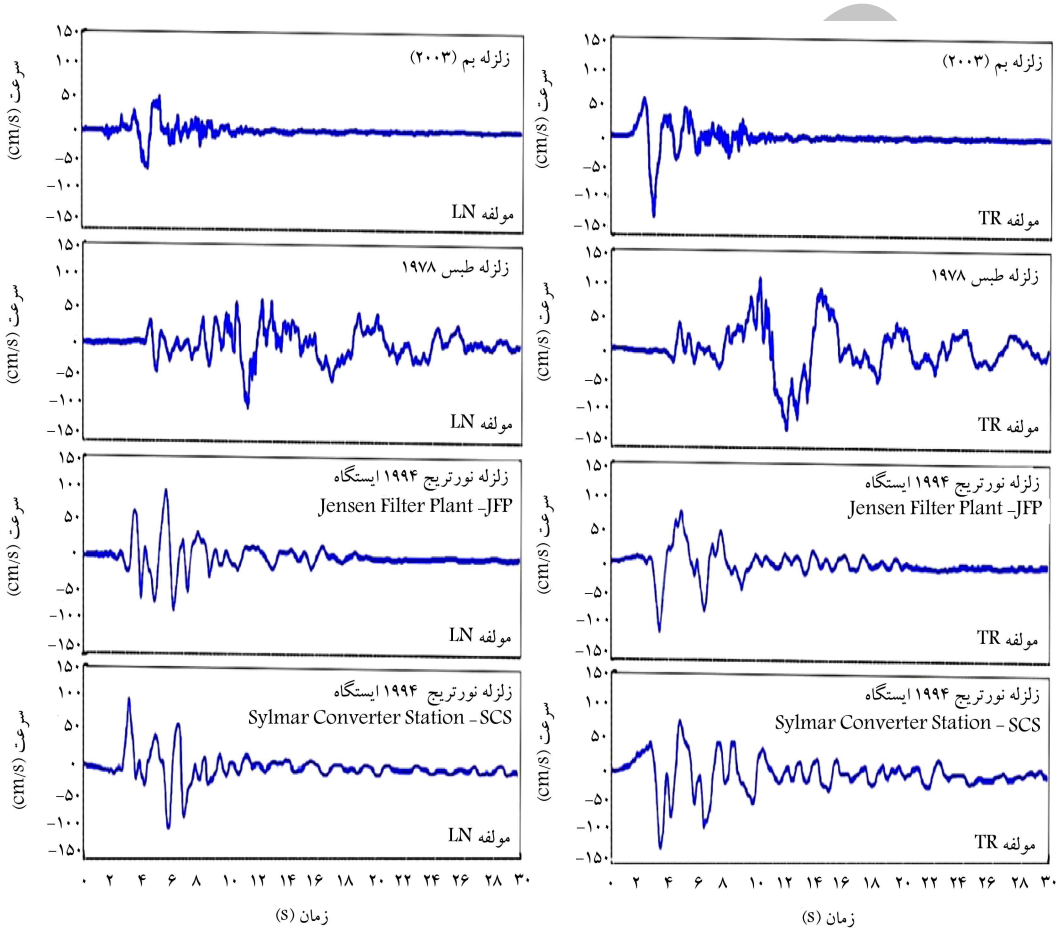

شکل ۴. تاریخچه‌ی زمانی شتاب و طیف فوریه‌ی رکوردهای ARL و MPR متناظر با مؤلفه‌ی TR.



www.SID.ir




شکل ۵. تاریخچه‌ی زمانی شتاب و طیف فوریه‌ی رکوردهای بم و طبس متناظر با مؤلفه‌ی TR.




شکل ۶. تاریخچه‌ی زمانی سرعت زمین در رکوردهای بم، طبس، و ایستگاه‌های SCS و JFP زلزله‌ی نورثریج، حاوی اثرات جهت‌داری پیش‌رونده.

پایین خواهد بود. طیف فوریه‌ی رکوردهای نیرومند حوزه‌ی نزدیک، که حاوی اثرات جهت‌داری پیش‌رونده هستند، در بخش‌های متناظر با بسامدهای پایین نیز به شکل قابل توجهی، مؤلفه‌های ارتفاعی بسیار بزرگ دارند. محدوده‌ی بسامدهای پایین در واقع متناظر با دوره‌ی تناوب ارتعاش طبیعی ساختمان‌های میان‌مرتبه تا بلند است. بدین لحاظ قرارگرفتن دوره‌ی تناوب مذکور در باند پرانرژی بسامدهای پایین طیف فوریه‌ی یک رکورد نیرومند حوزه‌ی نزدیک سبب وقوع پدیده‌ی تشدید با نمود بسیار بزرگ خواهد شد. وجود مؤلفه‌های ارتفاعی بزرگ در باند بسامدهای پایین طیف فوریه‌ی ۲ رکورد بم و طبس، یک نمود مشخص از موضوع ذکرشده است (شکل ۵).

مشخصات فیزیکی رکوردهای انتخابی این پژوهش در جدول ۲ و همچنین ساختارهای پردامنه و بلندمدت پالس شکل مربوط به ۴ رکورد بسیار نیرومند BAM، TAB، JEP و SCS در شکل ۶ نمایش داده شده‌اند. نتایج پژوهش‌های لرزه‌شناسی نشان می‌دهند که رکوردهای طبیعی زلزله بهترین نمایش از ساختار بارگذاری لرزه‌یی



www.SID.ir

برای ارزیابی و طراحی سازه‌ها هستند. ساختار فیزیکی زمین در حوزه‌ی نورثریج به خاک نوع II ایران نزدیک است و تمامی رکوردهای جدول ۲ به‌صورت طبیعی و ۳ مؤلفه‌یی به مدل‌های مطالعاتی پژوهش حاضر اعمال شده است. توضیح آنکه مؤلفه‌ی موازی با صفحه‌ی شکست گسل (مؤلفه‌ی LN) در راستای X، مؤلفه‌ی نیرومندتر عمود بر صفحه‌ی شکست (مؤلفه‌ی TR) در راستای Y پلان سازه و مؤلفه‌ی قائم نیز در جهت Z وارد شده است.[۳۰و۳۱]

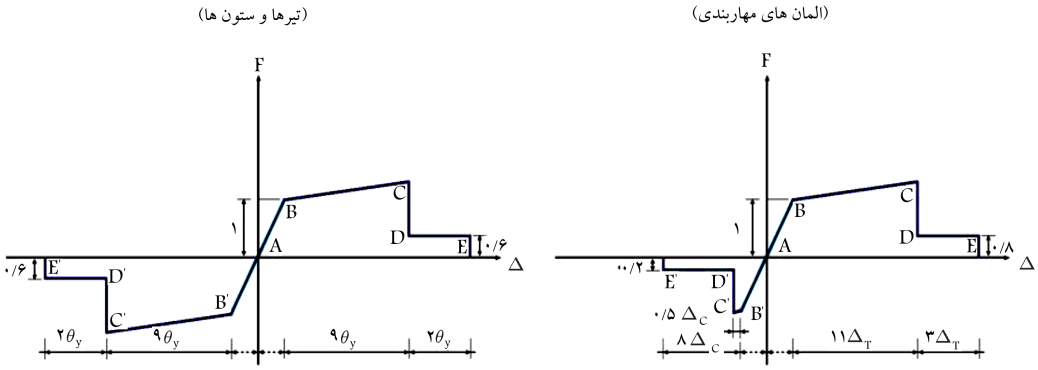
## ۷. پارامترهای پاسخ غیرخطی سازه‌ها

این پژوهش در برگیرنده‌ی نتایج تحلیل رفتار دینامیکی غیرخطی سازه‌های مطالعاتی شکل ۱ با دو سیستم مهاربندهای همگرا (مدل ۱) و نیز مهاربندهای بزرگ (مدل‌های ۲ و ۳) تحت مجموعه‌یی از رکوردهای انتخابی، با استفاده از نرم‌افزارهای SAP۲۰۰۰ و PERFORM-۳D است. رکوردهای انتخابی نیز با توجه به چگونگی اثرات جهت‌داری و همچنین وجود پالس یا پالس‌های ترکیبی شتاب و سرعت، بر طبق جدول ۲ و شکل‌های ۳ تا ۶ دسته‌بندی شده‌اند. پارامترهای پاسخ لرزه‌یی هر ۳ سازه‌ی مطالعاتی شامل بیشینه‌ی برش پایه، بیشینه‌ی ۲ پارامتر شتاب مطلق و سرعت نسبی طبقات در محل مرکز جرم $C_M$ و دریفت[۱۹] طبقات در نقطه‌ی A پلان است. همچنین پارامترهای تحلیلی مربوط به مدل‌سازی مفاصل خمیری و ویژگی‌های رفتار غیرخطی اعضا براساس ضوابط گزارش Fema ۳۵۶ تنظیم شده است. مفاصل خمیری با ساختار اندرکنشی P و نیز خمشی $M_3$ به ترتیب برای ستون‌ها و شاه‌تیرها لحاظ شده و ساختار رفتار لرزه‌یی در دو حالت کشش و فشار به‌صورت یکسان فرض شده است. قابلیت رفتار غیرخطی المان‌های مهاربند نیز براساس تعریف مفصل نامتقارن P با ویژگی‌های متفاوت عملکردی در کشش و فشار، برای سازه‌های مطالعاتی منظور شده است. مدل تحلیلی برای توصیف رفتار غیرخطی مفاصل در شکل ۷ نشان داده شده است. انجام ارزیابی جامع بر روی نتایج پژوهش حاضر، بیانگر تشکیل ۲ ساختار عمومی و متفاوت مکانیزم مفاصل خمیری در اسکلت مقاوم قاب محیطی هر ۳ مدل مطالعاتی است.[۳۲-۳۴]

ویژگی‌های فیزیکی متفاوت گروه رکوردهای حوزه‌ی نزدیک حاوی اثرات نیرومند جهت‌داری پیش‌رونده نسبت به ۲ دسته‌ی رکوردهای نه چندان نیرومند حوزه‌ی دور و حوزه‌ی نزدیک متأثر از اثرات گسلش خنثی، سبب تشکیل و آرایش متمرکز مفاصل غیرخطی در بخش‌های میانی و پایین سازه‌ی مقاوم قاب محیطی دارای مهاربندی شده است. مکانیزم مفاصل غیرخطی حاصل‌شده از تأثیر ۲ دسته رکوردهای ذکرشده بدون اثرات جهت‌داری پیش‌رونده، در حوزه‌ی عملکردی بسیار پایین‌تری نسبت به رکوردهای حاوی پالس‌های پیوسته و بزرگ سرعت قرار می‌گیرد. در شکل ۸ پارامتر دریفت بیشینه یا همان بیشینه‌ی تغییرمکان جانبی نسبی طبقات به‌عنوان معیاری مهم برای بررسی عملکرد لرزه‌یی سازه در نظر گرفته شده است. شکل ۹، در برگیرنده‌ی مقادیر بیشینه‌ی تغییرمکان نسبی طبقات در نقطه‌ی A پلان مدل‌های مطالعاتی است. مطابق آنچه در نمودارهای این پارامتر پاسخ مشهود است، بیشینه‌ی تغییرمکان جانبی نسبی مدل‌های ۲ و ۳ با ساختار مهاربندهای بزرگ، برای همه‌ی رکوردها در محدوده‌ی ۰٫۴ تا ۰٫۶ ارتفاع سازه رخ داده و نیز روند تغییرات آن، یک سیر متناوب افزایشی ـ کاهشی دارد، به گونه‌یی که در بالای سازه به کمینه‌ی نسبی مقدار خود می‌رسد. ساختار نمودارهای شکل ۹، بیانگر بروز مقادیر به مراتب بزرگ‌تر دریفت تحت رکوردهای حاوی اثرات جهت‌داری پیش‌رونده همچون JFP و SCS است (شکل ۶). براساس طیف‌های پاسخ سرعت ترسیم‌شده در شکل ۸ و نیز مقادیر دوره‌های تناوب اولین ۳ مود ارتعاشی مدل‌های مطالعاتی این پژوهش متناظر با جهت TR در جدول ۳، آرایش‌های طیفی متفاوت متناظر با ۳ مود یادشده، عامل مهم تأثیرگذار در روند تغییرات نتایج به حساب می‌آید. چنانچه از نمودار تغییرات پارامتر دریفت در جهت محور Y ملاحظه می‌شود، برای مدل ۱ مقادیر بیشینه‌ی این پارامتر تحت رکوردهای BAM، SCS و JFP حاصل شده و برای مدل‌های ۲ و ۳ نیز تحت رکوردهای BAM، SCS و RRS به‌دست آمده است. نتایج دریفت بیشینه تحت ۲ رکورد حوزه‌ی دور MRP و نیز حوزه‌ی نزدیک بدون پالس سرعت ARL، بسیار کوچک‌تر از مقادیر متناظر مربوط به رکوردهای شکل ۱ است. این موضوع با توجه به دامنه‌های ارتفاعی پایین مربوط به طیف‌های پاسخ سرعت ۲ رکورد مذکور در شکل ۸ استنباط می‌شود. آرایش پانل‌های مهاربندی شده‌ی همگرا در مدل ۱، تعداد یکسانی المان‌های تیر، ستون، و بادبند با مدل ۲ دارد و مشخصات مقاطع اعضاء متناظر نیز مشابه است. نتایج ارائه‌شده در شکل ۹، نشان‌دهنده‌ی وجود ساختار تغییرات به‌کلی متفاوت دریفت برای مدل ۱ نسبت به مدل ۲ است. براساس

**جدول ۳. دوره‌ی تناوب ارتعاشی مود اول تا سوم در ۳ مدل مطالعاتی.**

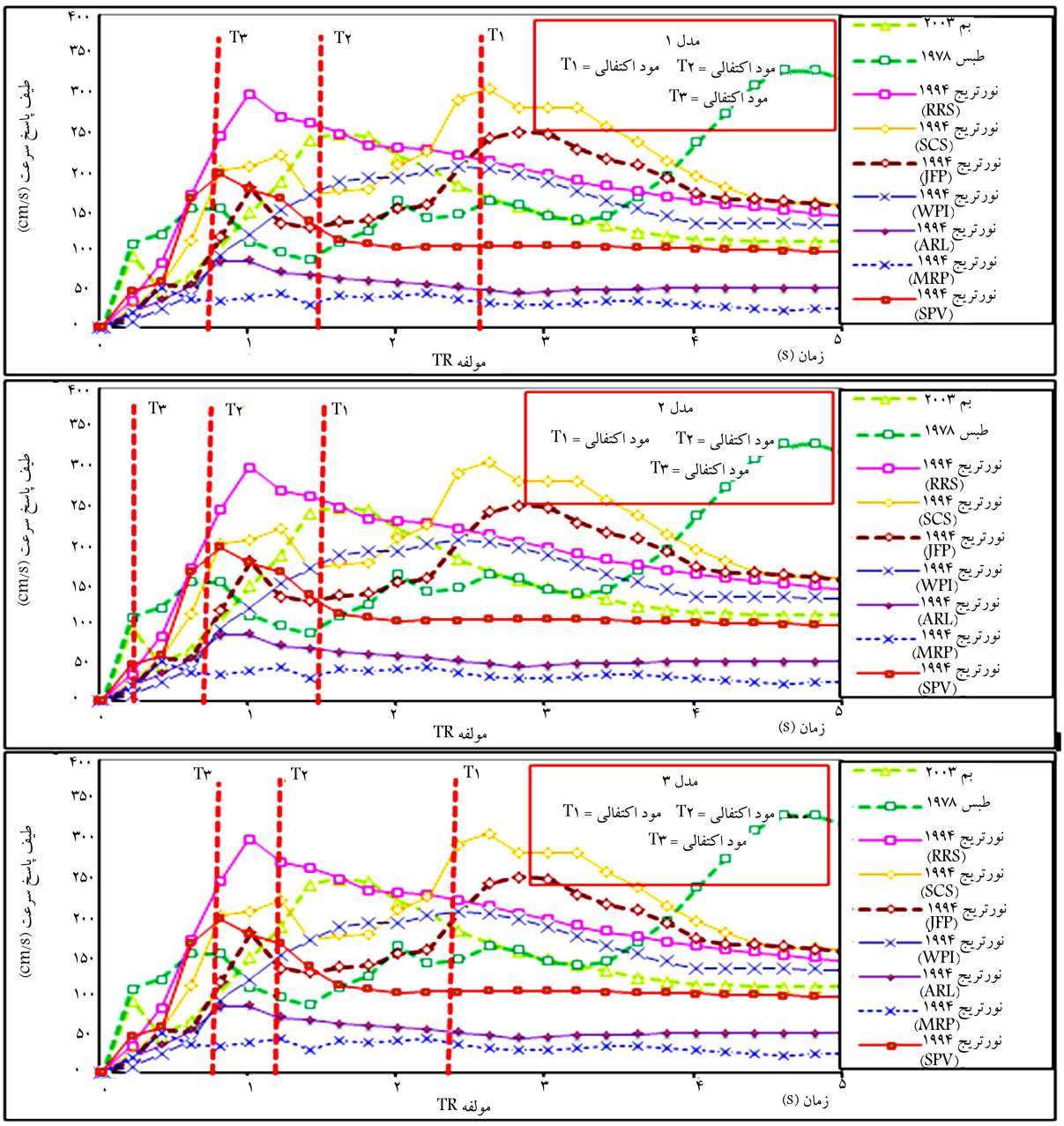
| مدل | دوره‌ی تناوب (ثانیه) | | |
|---|---|---|---|
| | مود اول | مود دوم | مود سوم |
| ۱ | ۲٫۵۸ | ۱٫۵۵ | ۰٫۷۱ |
| ۲ | ۱٫۵۲ | ۰٫۵۷ | ۰٫۳۵ |
| ۳ | ۲٫۴۲ | ۱٫۱۹ | ۰٫۸۲ |




**شکل ۷. مدل رفتار غیرخطی اعضا براساس FEMA ۳۵۶.**[۲۳]



Archive of SID
www.SID.ir




**شکل ۸.** آرایش طیفی ۳ مود اول ارتعاشی مدل‌های مطالعاتی در طیف پاسخ سرعت متناظر با مؤلفه‌ی TR رکوردهای انتخابی.

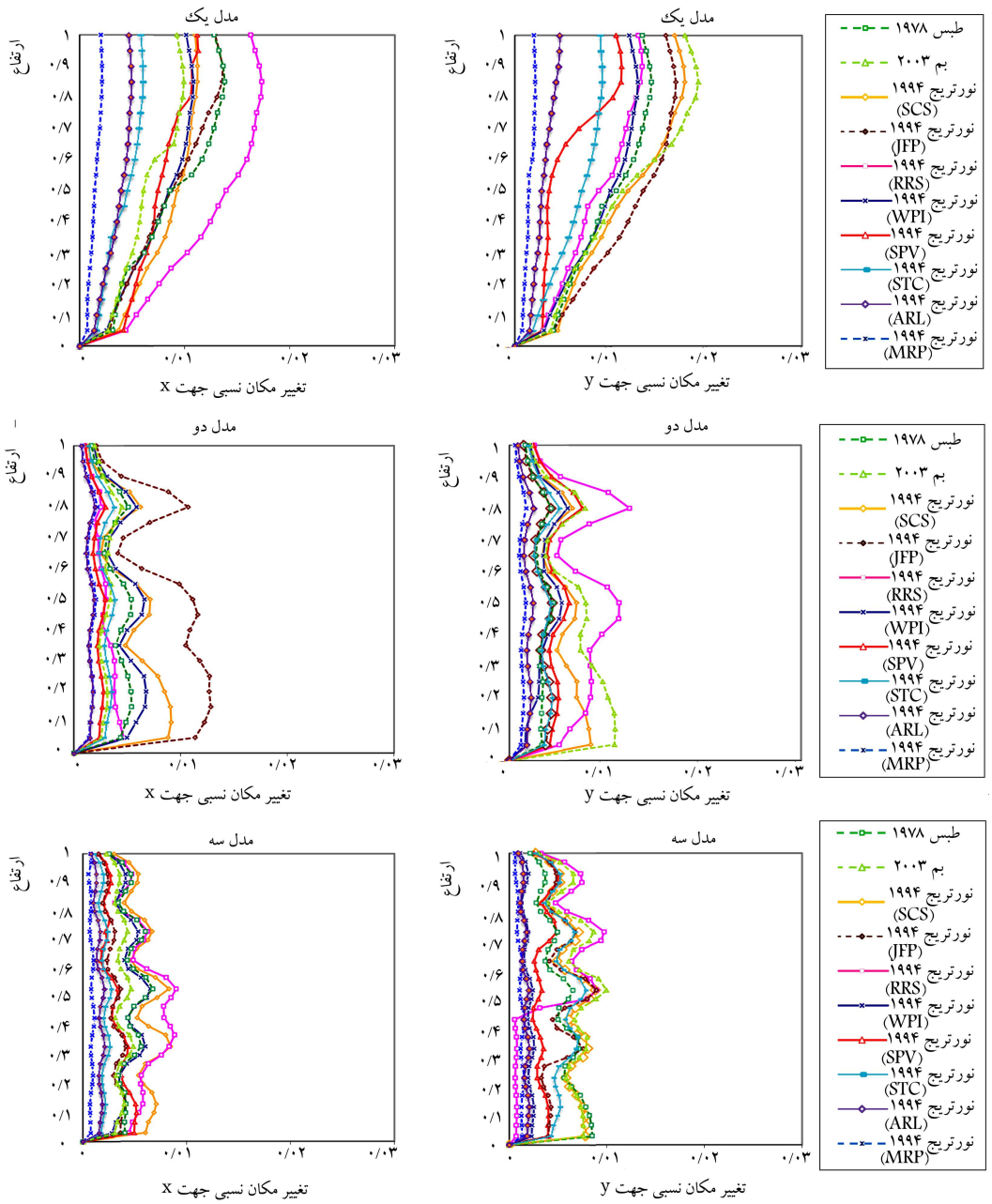
تغییرات بزرگ‌تر دامنه‌ی دریفت بیشینه برای مدل ۱ می‌توان دریافت که کارایی و قابلیت رفتار لرزه‌یی سیستم مهاربندهای بزرگ نسبت به مهاربندهای معمولی، به مراتب بهتر است. این برتری و قابلیت بسیار مناسب رفتاری سبب کاربرد سیستم مقاوم قاب محیطی با آرایش مهاربندی بزرگ در اسکلت مقاوم ساختمان‌های بلند خواهد بود. تغییرات تغییرمکان نسبی در مدل ۲ در طبقات ۲، ۱۰ و ۱۶ و برای مدل ۳ در طبقات ۲، ۱۰، ۱۶، ۲۲ و ۲۸ اتفاق می‌افتد. بیشینه‌ی مقدار دریفت در مدل‌های ۲ و ۳ در تراز پانل‌هایی که مهاربندها به‌صورت ضرب‌دری قرار دارند، مشاهده شده است. همچنین ملاحظه می‌شود که به خاطر عدم تمرکز و تأثیرگذاری برآیند نیروی محوری در یک راستای پانل‌های مهاربندی و تقسیم آن در بخش‌های مختلف اسکلت مقاوم محیطی ۲ سازه‌ی یادشده و نیز آرایش هندسی متفاوت المان‌های مهاربندی در ترازهای مختلف ارتفاعی، مقادیر دریفت به نسبت کمتر به‌دست آمده است.

براساس نتایج این پژوهش، بررسی مقادیر محاسباتی دریفت بیشینه برای هر دو راستای X و Y در مدل‌های قاب محیطی با مهاربندی بزرگ، نشان‌دهنده‌ی قرارگیری این پارامتر در محدوده‌ی قابل قبول طراحی لرزه‌یی است. همچنین حوزه‌ی عملکرد لرزه‌یی المان‌های اصلی سیستم مقاوم، در محدوده‌ی ایمنی جانی واقع شده است و شرایط مطلوب رفتار دینامیکی را تضمین می‌کند. افزون بر آن ملاحظه شده است که مدل‌های با مهاربندهای بزرگ نسبت به مدل با مهاربندی منظم، در راستای ارتفاع سازه با تغییرمکان جانبی و نیز دریفت به نسبت کمتری هستند.

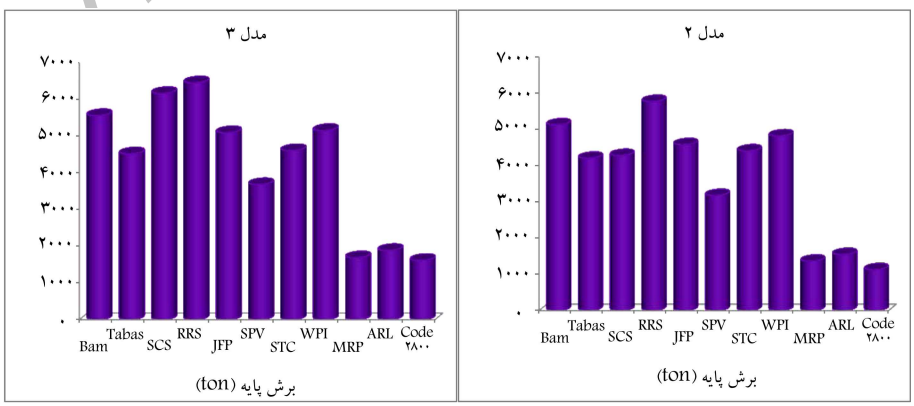
شکل ۱۰، نشان‌دهنده‌ی پارامتر بیشینه‌ی برش پایه‌ی دینامیکی سازه‌های



www.SID.ir



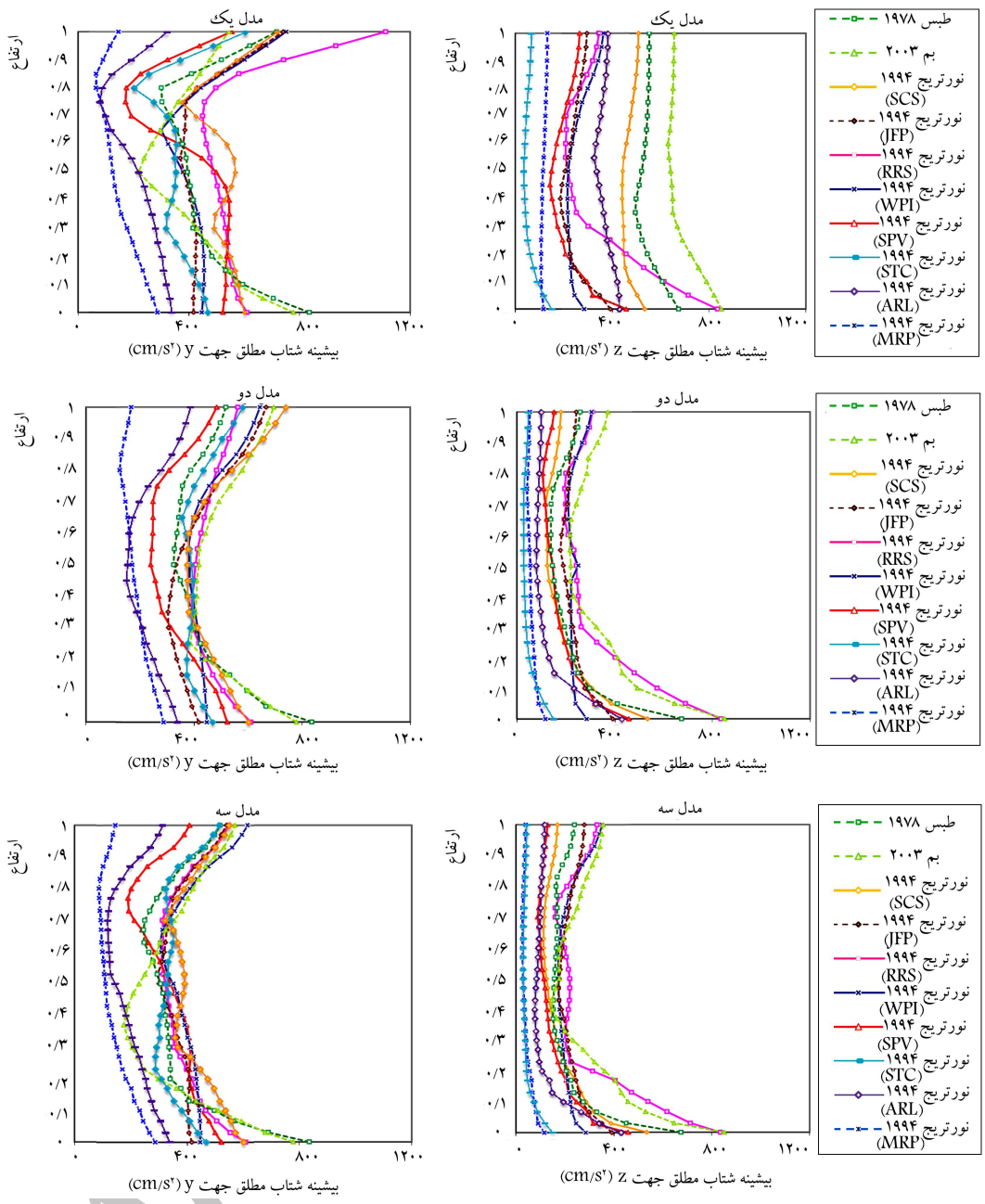

شکل ۹. بیشینه‌ی تغییرمکان نسبی طبقات در نقطه‌ی A پلان.




شکل ۱۰. مقادیر برش پایه‌ی استاتیکی و دینامیکی مدل‌های ۲ و ۳ (راستای Y).



www.SID.ir




شکل ۱۱. بیشینه‌ی شتاب مطلق طبقات در محل مرکز جرم $C_M$.

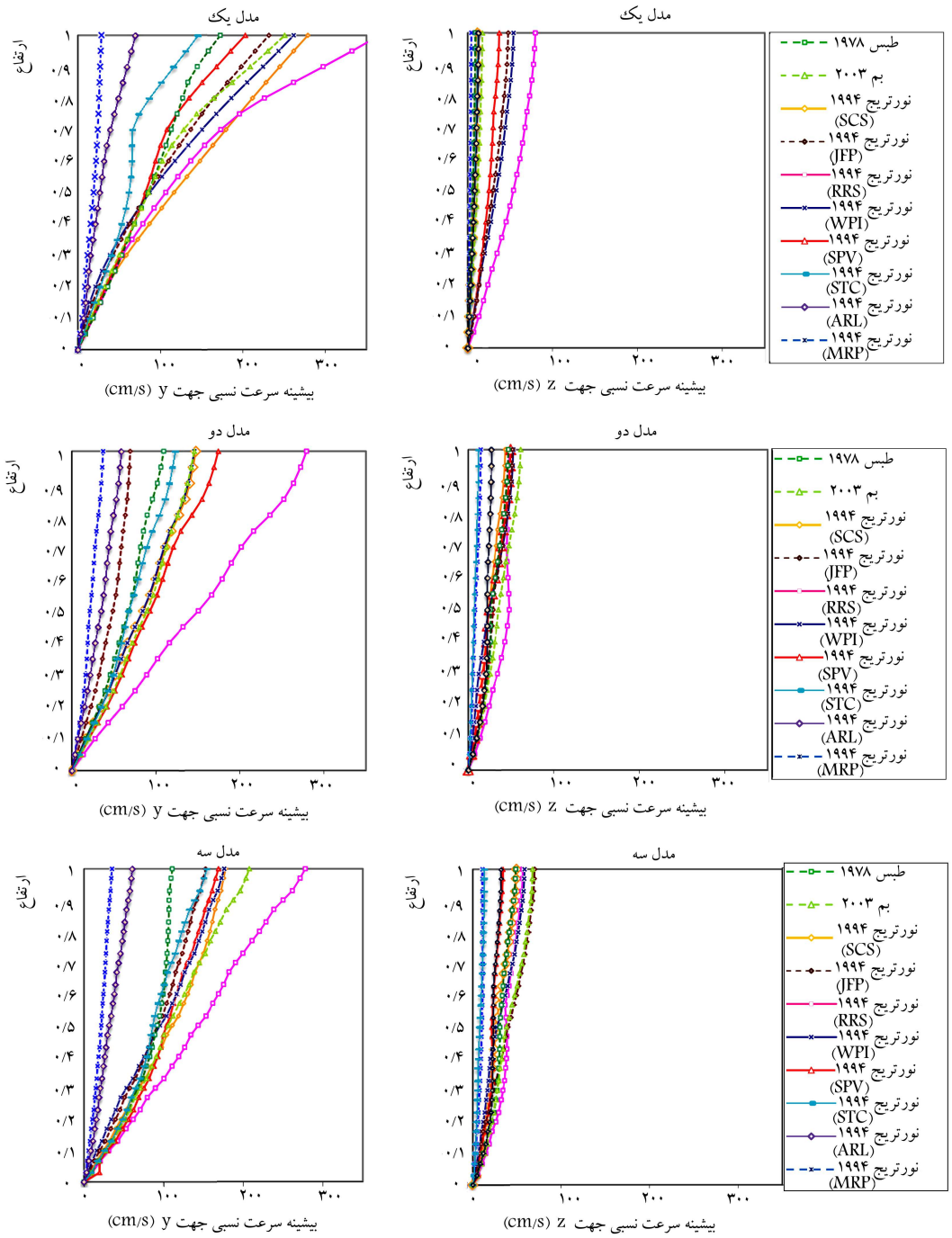
مطالعاتی متناظر با جهت TR و نیز میزان برش پایه‌ی استاتیکی محاسبه‌شده در روند طراحی است. بررسی نتایج پژوهش حاضر نشان می‌دهد که پارامتر برش پایه در مدل‌های مطالعاتی تحت تأثیر رکوردهای حوزه‌ی نزدیک حاوی پالس سرعت دوره‌ی تناوب بلند، به میزان قابل توجهی نسبت به مقدار حاصل از رکوردهای حوزه‌ی نزدیک بدون ساختارهای پالس‌گونه و نیز رکورد حوزه‌ی دور MRP، بزرگ‌تر است. بالابودن پارامتر پاسخ مذکور را می‌توان به حضور اسپایک‌های پردامنه‌ی شتاب و نیز پالس‌های پیوسته و بلندمدت سرعت در تاریخچه‌ی زمانی جنبش‌های نیرومند حوزه‌ی نزدیک نسبت داد. بخش بسیار بزرگی از انرژی جنبشی یک رکورد حوزه‌ی نزدیک حاوی اثرات جهت‌داری پیش‌رونده، در بازه‌ی زمانی برابر با دوره‌ی تناوب پالس بزرگ سرعت زمین به سازه اعمال می‌شود. ماهیت تصادفی رکوردهای نیرومند ۳ مؤلفه‌یی زلزله و تغییرات غیرقابل پیش‌بینی پارامترهای همبستگی منفرد و متقاطع برای هر جنبش پرقدرت حوزه‌ی نزدیک، دلیل عمده‌ی بروز تغییرات شگرف در پارامترهای پاسخ لرزه‌یی غیرخطی است.

نمودارهای تغییرات ۲ پارامتر بیشینه‌ی شتاب مطلق و نیز بیشینه‌ی سرعت نسبی طبقات در هر دو راستای Y و Z به ترتیب در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ نمایش داده شده‌اند. همان‌طورکه در نمودار تغییرات بیشینه‌ی شتاب مطلق ملاحظه می‌شود، یک سیر کاهشی برای این پارامتر تا محدوده‌ی ۰٫۴ تا ۰٫۶ ارتفاع سازه در جهت Y و یک روند مشابه در بازه‌ی ۰٫۲ تا ۰٫۴ ارتفاع نیز برای جهت Z رخ داده است. همچنین ادامه‌ی روند تغییرات یادشده تا بالاترین تراز ارتفاعی مدل‌های مطالعاتی نیز یک سیر افزایشی داشته است.

دیگر نتایج پژوهش حاضر نشان می‌دهند که تغییرات پارامتر سرعت نسبی



www.SID.ir




**شکل ۱۲.** بیشینه‌ی سرعت نسبی طبقات در محل مرکز جرم $C_M$.

طبقات سازه‌های مطالعاتی، یک سیر صعودی برای هر ۳ راستای X، Y و Z دارند. ملاحظه می‌شود که مقادیر شتاب و سرعت برای ۲ مدل مطالعاتی ۲ و ۳ با ساختار مهاربندهای بزرگ نسبت به مدل ۱ با آرایش مهاربندهای همگرا به مراتب کمتر است. همچنین مشاهده شده است که میزان تغییرات ۲ پارامتر پاسخ مذکور نیز به‌صورت چشم‌گیری متأثر از وجود پالس‌های سرعت دوره‌ی تناوب بلند با دامنه‌ی بزرگ است و نیز تحت رکوردهای حوزه‌ی نزدیک دارای اثرات جهت‌داری پیش‌رونده به مراتب بزرگ‌تر از مقادیر مشابه حاصل از ۲ رکورد حوزه‌ی دور MRP و حوزه‌ی نزدیک با جهت‌داری خنثی ARL هستند.

## ۸. نتیجه‌گیری

نتایج پژوهش حاضر روشن‌گر ویژگی‌های رفتار لرزه‌یی ساختمان‌های بلند فولادی با سازه‌ی مقاوم قاب محیطی با مهاربندهای بزرگ است. ارزیابی و تحلیل عملکرد لرزه‌یی مدل‌های مطالعاتی نیز تحت اثر رکوردهای نیرومند حوزه‌ی نزدیک صورت گرفته است. معیار اصلی در انتخاب رکوردهای حوزه‌ی نزدیک، وجود پالس‌های پر انرژی و بلندمدت در تاریخچه‌ی زمانی سرعت هر رکورد است. پارامترهای مطالعه‌شده‌ی پاسخ لرزه‌یی شامل تغییرمکان نسبی، برش پایه، سرعت نسبی، و



www.SID.ir

شتاب مطلق طبقات است.

ملاحظه شده است که به کارگیری آرایش‌های متمرکز مهاربندی در یک تعداد محدود و هم‌راستا از پانل‌های سیستم مقاوم قاب محیطی در ساختمان‌های بلند، چندان مناسب نیست. بر پایه‌ی نتایج پژوهش حاضر مشاهده شده است که تغییرات پارامترهای پاسخ لرزه‌یی غیرخطی مربوط به مدل ۲۰ طبقه با آرایش متمرکز پانل‌های مهاربندی شده نسبت به مدل متناظر ۲۰ طبقه با مهاربندهای بزرگ دچار تغییرات گسترده‌تری شده است.

همچنین به علت واردآمدن مقادیر زیاد انرژی به سازه در بازه‌ی زمانی پالس‌های بزرگ سرعت، به‌ویژه در ابتدای رکورد زلزله، می‌توان ملاحظه کرد که این روند سبب توسعه‌ی سریع رفتار غیرخطی و گسترش مفاصل خمیری در سراسر ارتفاع سازه می‌شوند. این روند سریع جذب و استهلاک انرژی موجب ایجاد تغییرمکان‌های نسبی بزرگ طبقات خواهد شد. استفاده از المان‌های منفرد و نیز همگرای مهاربندی در سازه‌های بلند با سیستم قاب محیطی مهاربندی شده به تنهایی نمی‌تواند در کنترل بیشینه‌ی تغییرمکان جانبی و دریفت طبقات مؤثر باشد. سیستم قاب محیطی با مهاربندهای بزرگ، عملکرد بهتری از نظر کنترل شاخص آسیب‌پذیری و پارامترهای پاسخ لرزه‌یی نسبت به سیستم‌های مهاربندی شده‌ی منظم در ارتفاع دارند. شایان ذکر است که رکوردهای نیرومند زلزله حاوی اسپایک‌های پر دامنه‌ی شتاب و پالس‌های بلندمدت سرعت حاصل‌شده از فرایند گسلش با جهت‌داری پیش‌رو می‌توانند مقادیر بسیار بزرگ برش پایه، تغییرمکان نسبی، شتاب مطلق و سرعت نسبی طبقات را در رفتار لرزه‌یی ساختمان‌های بلندمرتبه ایجاد کنند. ملاحظه شده است که سازه‌های مطالعاتی ۲ و ۳ در پژوهش حاضر، که ساختار مقاوم قاب محیطی با مهاربندی بزرگ دارند، با رعایت معیارهای طرح لرزه‌یی «محدودیت جابه‌جایی نسبی طبقات» و «اصل ستون قوی ـ تیر ضعیف»، حتی تحت اثر رکوردهای پر انرژی و نیرومند زلزله نیز عملکرد لرزه‌یی بسیار مناسب دارند.

## پانوشت‌ها

1. Imperial Valley
2. Loma Prieta
3. Northridge
4. Kobe
5. ChiChi
6. fault mechanism
7. rupture propagation
8. fling step
9. strike slip fault
10. dip slip fault
11. velocity pulse
12. San Fernando
13. braced tube structure
14. shear lag
15. forward directivity
16. backward directivity
17. neutral directivity
18. Moorpark
19. drift

## منابع (References)


1. Bolt, B.A. "Seismic input motion for nonlinear structural analysis", *ISET Journal of Earthquake Technology,* **41**(2), pp. 223-232 (2004).

2. Elnashi, A.S., Mwafy, A., Sigbjörnsson, R. and Salama, A. "Significance of sever distance and moderate close earthquake on design and behavior of tall building", *The Structural Design of Tall and Special Building*, **15**(4), pp. 391-416 (2006).

3. Mollaioli, F. and Decanini, L.D. "Characterization of the dynamic response of Structures to damaging pulse type near fault ground motion", *Int. J. Theoretical Applied Mechanics*, **41**(10), pp. 23-46 (2006).

4. Krawinkler, H. and Gupta, A. "Story drift demands for steel moment frame structures in different seismic regions", *6th U.S. National Conference on Earthquake Engineering* (1998).

5. Anderson, J.C. and Bertero, V.B., *Amplifications of the Landers & Big Bear Earthquakes on Earthquake Resistant Design of Structures*, University of California, Report No. EERC 97/08, Berkeley, California (1997).

6. Hall, J.F., Heaton, T.H., Halling, M.W. and Wald, D.J. "Near-source ground motion and its effects on flexible buildings", *Earthquake Spectra,* **11**(4), pp. 569-605 (1995).

7. Hall, J.F., *Seismic Response of Steel Frame Buildings to Near-Fault Ground Motion*, California Institute of Technology, Report No, EERL 97/05, Pasadena, California (1997).

8. Kravinkler, H. and Alavi, B. "Development of improved design procedures for near-fault ground motions", SIMP 89 Seminar on Utilization of Strong Motion Date, pp. 21-42 (1998).

9. Gioncu, V. and Mazzolani, F.M. "Influence of earthquake types on the design of seismic-resistant steel structures Part 1: Challenges for new design approaches", *STESSA Conference,* London (2006).

10. Gioncu, V. and Mazzolani, F.M. "Influence of earthquake types on the design of seismic-resistant steel structures Part 2: Structural responses for different earthquake types", *STESSA Conference*, London (2006).

11. Kalkan, E. and Kunnath, S.K. "Effects of fling step and forward directivity on seismic response of buildings", *Earthquake Spectra*, **22**(2), pp. 367-390 (2006).

12. Krishnan, S. "Case studies of damage to 19-storey irregular steel moment-frame buildings under near –source ground motion", *Earthquake Engineering and Structural Dynamic*, **36**(7), pp. 861-885 (2007).




Archive of SID

www.SID.ir

13. Movahed, H., Meshkat-Dini, A. and Tehranizadeh, M. "Dynamic behavior of dual systems in tall buildings under influencing wavelike strong ground motions", *15th World Conference on Earthquake Engineering*, Paper No. 3889, Lisbon, Portugal (2012).

14. Tehranizadeh, M. and Movahed, H. "Evaluation of steel moment-resisting frames performance in tall buildings in near fault areas", *Journal of Civil and Surveying Engineering (JCSE),* **44**(2), pp. 621-633 (2011).

15. Taranah, B.S., *Wind and Earthquake Resistant Buildings: Structural Analysis and Design*, CRC Press, New York (2005).

16. Cook, J.A. "Structural steel framing option for mid and high rise building", MSc. Thesis, Massachusetts Instate of Technology (MIT) (2006).

17. Stafford Smith, B. and Coull, A., *Tall Building Structures: Analysis and Design*, New York, America (1991).

18. Hemmati, A. and Kheyroddin, A. "Behavior of large-scale bracing system in tall building subjected to earthquake loads", *Journal of Civil Engineering and Management,* **19**(2), pp. 206-216 (2013).

19. INBC (Iranian National Building Code), *Design Loads for Buildings*, Division 6, National Building Regulations Office, Tehran, Iran (2005).

20. Barati, F. "Study on the effect of physical characteristics of near field earthquake records on response parameters of mega-braced tube structural systems", MSc. Thesis, Kharazmi University (2015).

21. INBC (Iranian National Building Code), *Steel Structures*, Division 10, National Building Regulations Office, Tehran, Iran (2005).

22. BHRC, *Iranian Code of Practice for Seismic Resistant Design of Buildings*, Standard No. 2800-05. 3rd ed., Building and Housing Research Center, Tehran (2005).

23. Movahed, H., Meshkat-Dini, A. and Tehranizadeh, M. "Seismic behavior of steel special moment resisting frames affected by strong motions in near fault areas ", *15th Word Conference on Earthquake Engineering*, Paper No. 3887, Lisbon, Portugal (2012).

24. Abrahamson, N.A. "Attenuation of vertical peak ground acceleration", *Bulletin of the Seismic. Society of America*, **79**(3), pp. 549-580 (1998).

25. Somerville, P.G. and Graves, R. "Conditions that give rise to unusually large long period ground motion", *The Structural Design of Tall Building*, **2**(3), pp. 211-232 (1993).

26. Malhotra, P.K. "Response of buildings to near – field pulse like ground motion", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics,* **28**(11), pp. 1309-1326 (1999).

27. Alhan, C. and Surmeli, M. "Necessity and adequacy of near-source factors for not-so-tall fixed-base buildings", *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, **14**(1), pp. 13-26 (2015).

28. Movahed, H., Meshkat-Dini, A. and Tehranizadeh, M. "Seismic evaluation of steel special moment resisting frames affected by pulse type ground motions", *Asian Journal of Civil Engineering,* **15**(4), pp. 575-585 (2014).

29. Galasso, C., Zhong, P., Zareian F., Iervolino, I.G and Robert, W. "Validation of ground- motion simulations for historical events using MDOF systems", *Journal of International Association for Earthquake Engineering,* **42**(9), pp. 2727-2740 (2013).

30. Manfredi, G. "Evaluation of seismic energy demand", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics,* **30**(4), pp. 485-499 (2001).

31. Barati, F., Meshkat-Dini, A. and Sarvghad-Moghadam, A. "Seismic performance of mega braced tube structures subjected to pulse type near-field ground motions", *First National Conference on Structural Engineering* (2015).

32. FEMA 356, *Federal Emergency Management Agency* (1998).

33. SAP2000, Version 14.2.0, *A Computer Program for Integrated Finite Element Analysis and Design of Structures*, California, Berkeley (2010).

34. PERFORM-3D, Version 5.0.0, *The Program is Well Suited for Analyzing and Evaluating the Performance of Nonlinear Structures*, published by CSI Institute, University of California, Berkeley.


Archive of SID



www.SID.ir