

چکیده

سیستم سازه‌ای قاب محیطی مهاربندی شده، یکی از ساختارهای بسیار مناسب برای مقاومت در برابر بارهای ناشی از زلزله است. این سیستم دارای ویژگی‌های عملکرد لرزه‌ای بسیار مناسبی بوده و قابلیت‌های مقاومتی اسکلت ساختمان‌های بلندمرتبه را نیز به صورت چشمگیری نسبت به کاربرد ساختارهای سه‌بعدی قاب خمشی افزایش می‌دهد. پژوهش حاضر، دربرگیرنده نتایج مطالعه ویژگی‌های رفتار لرزه‌ای حاصل از کاربرد چهار سیستم مقاوم قاب محیطی مهاربندی شده در ساختمان‌های بلند با پیکربندی ۲۰ طبقه تحت اثر رکوردهای نیرومند حوزه نزدیک است. دو سازه مطالعاتی دارای آرایش پانل‌های متمرکز مهاربندی شده و دو سازه دیگر نیز دارای سیستم مهاربندهای بزرگ مقیاس می‌باشند. به منظور تعیین پارامترهای پاسخ سازه‌های مطالعاتی، تعداد زیادی تحلیل دینامیکی غیرخطی تاریخچه زمانی صورت پذیرفت. بررسی تحلیلی پارامترهای پاسخ حاصله، نشان‌گر عملکرد لرزه‌ای خوب اسکلت‌های مهاربندی شده تحت اثر رکوردهای حوزه نزدیک است. ملاحظه شد که به کارگیری آرایش‌های متمرکز مهاربندی در یک تعداد محدود و هم‌راستا از پانل‌های سیستم مقاوم قاب محیطی در اسکلت ساختمان‌های بلند، چندان مناسب نیست. همچنین دانسته شد که پارامترهای پاسخ لرزه‌ای غیرخطی مربوط به مدل ۲۰ طبقه با آرایش متمرکز پانل‌های مهاربندی شده، نسبت به مدل متناظر ۲۰ طبقه دارای مهاربندهای بزرگ، دچار تغییرات گسترده‌تری می‌شود. کاربرد المان‌های منفرد و نیز همگرای مهاربندی در پانل‌های پیرامونی یک سازه قاب محیطی مهاربندی شده، به تنهایی نمی‌تواند در کنترل حداکثر تغییر مکان جانبی و دریافت طبقات مؤثر باشد. سیستم قاب محیطی با مهاربندهای بزرگ مقیاس، دارای عملکرد بهتری از نظر کنترل آسیب‌پذیری و بهبود پارامترهای پاسخ لرزه‌ای نسبت به سیستم‌های مهاربندی شده منظم در ارتفاع سازه، است.

واژگان کلیدی: قاب محیطی مهاربندی شده، اسکلت مقاوم پیرامونی، مهاربندهای بزرگ مقیاس، رفتار غیرخطی، رکورد حوزه نزدیک، پالس سرعت.

بررسی پاسخ لرزه‌ای ساختمان‌های بلندمرتبه فولادی دارای اسکلت پیرامونی متشکل از پانل‌های پیوسته مهاربندی شده تحت اثر رکوردهای حوزه نزدیک

فرشاد براتی

دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی زلزله، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران

مرضیه حیدری

دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی زلزله، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران

افشین مشکوه‌الدینی (نویسنده مسئول)

استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران، meshkat@khu.ac.ir

عبدالرضا سروقد مقدم

دانشیار، پژوهشکده مهندسی سازه، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران

۱- مقدمه

نزدیک گسل در فاصله تا ۲۰ کیلومتری از صفحه شکست^۲ تعریف می‌گردد. در این مناطق، حرکات زمین به شدت تحت تأثیر مکانیسم گسلش، جهت انتشار گسیختگی و جابه‌جایی‌های ماندگار ناشی از لغزش است. این عوامل منجر به اثراتی تحت عنوان جهت‌پذیری شکست^۳ و حرکت پرتابی^۴ زمین می‌گردد. همچنین به دلیل اثرات ناشی از فرایند جهت‌پذیری، تاریخچه زمانی سرعت زمین مربوط

با افزایش تجربه رخدادهای لرزه‌ای به‌ویژه در حوزه نزدیک گسل^۱ و همچنین بررسی رفتار ساختمان‌ها و آسیب‌های وارده تحت این گونه رکوردها بر سازه، اثرات جنبش‌های نیرومند در حوزه نزدیک گسل، بیش‌ازپیش مورد توجه قرار گرفته است. حرکات شدید زمین در نزدیکی گسل به‌طور قابل‌توجهی نسبت به جنبش‌های دور از گسل، متفاوت است. به‌طور معمول، حوزه

ارتعاشات عمود بر راستای گسل، به‌طور عمومی نیرومندتر از ارتعاشات متناظر با راستای موازی صفحه شکست می‌باشند. همچنین، ماهیت پالس عمود بر صفحه شکست گسل به‌صورت دینامیکی (رفت و برگشتی) بوده و ساختار فیزیکی پالس‌های موازی با صفحه شکست نیز می‌تواند تأثیر پذیرفته از دو نوع حرکت دینامیکی و استاتیکی پیش‌رونده باشند [۵-۹].

رفتار عمومی یک سازه بلندمرتبه قاب محیطی مهاربندی شده تحت اثر بارهای جانبی، به‌صورت خمش یک کنسول بزرگ است. صفحات قاب‌های مستوی در هر دو جهت محورهای اصلی پلان سازه، دارای رفتار هماهنگ و یکپارچه هستند. در رفتار لرزه‌ای سازه‌های دارای پانل‌های مهاربندی شده، میزان ظرفیت شکل‌پذیری المان‌های مهاربند، وضعیت احتمالی مدهای کمانش و ناپایداری پانل‌های مقاوم از اهمیت خاصی برخوردار است. همچنین باید محدودیت‌های طراحی مربوط به مقاومت فشاری مهاربندها بعد از کمانش و ظرفیت مقاومت برشی پانل‌های مقاوم نیز در نظر گرفته شوند. نکته دیگر آنکه پس از تشکیل مفاصل پلاستیک در دهانه آزاد تیرهای لینک و وقوع وضعیت احتمالی تعادل ناپایدار در حالت نزدیک به کمانش المان‌های مهاربند، ظرفیت کششی این اعضا متغیر بوده و همراه با آن، مقاومت فشاری نیز کاهش خواهد یافت [۱۰-۱۴].

طرح لرزه‌ای سازه دارای پانل‌های مهاربندی شده می‌بایست به نحوی صورت گیرد که پس از وقوع کمانش احتمالی المان‌های مهاربند، تیرهای لینک در صفحات قابی پیرامون پلان، همچنان مقاومت و پایداری دینامیکی اسکلت مقاوم را حفظ نمایند. عملکرد یکپارچه این سیستم سازه‌ای در تحمل بارهای وزنی و جانبی، تحت اندرکنش رفتاری میان ستون‌های محیطی و پانل‌های مهاربندی شده، صورت می‌گیرد. همچنین روند افزایشی بار محوری ستون‌های گوشه‌ای، ناشی از اثرات اندرکنشی فوق نیز کاهش می‌یابد. با توجه به مقادیر بزرگ انرژی آزاد شده در بازه زمانی پالس بزرگ سرعت در تاریخچه زمانی یک رکورد نیرومند حوزه نزدیک و همچنین ایجاد وضعیت احتمالی متناظر با حالت کمانش جانبی - پیچشی در

به بسیاری از رکوردهای حوزه نزدیک دارای یک ساختار بزرگ موجی شکل یا مجموعه‌ای از موجک‌های پدامنه و پالس مانند می‌باشد. فرایند گسیختگی همراه با اثرات جهت‌پذیری پیش‌رونده^۵ در شرایطی به وقوع می‌پیوندد که جهت انتشار شکست گسل و نیز جهت لغزش آن به‌صورت هم‌راستا باشند. همچنین، دوم آنکه سرعت شکست ساختار زمین نیز در حدود سرعت امواج برشی زلزله باشد. در چنین شرایطی، نمایش رفتار زمین در قالب یک پالس بزرگ منفرد همراه با جنبش ضربه‌ای خواهد بود. مدت و دوام این گونه پالس‌ها، به جهت انتشار شکست گسل و نیز میزان شدت انرژی جنبشی آزاد شده، وابسته است. همچنین اگر فرایند شکست ساختار گسل در جهت دور شدن از ساختگاه باشد، اثرات جهت‌پذیری پس‌رونده^۶ حاصل شده و ساختارهای به‌مراتب کوچک‌تر موجی شکل با دامنه و پریود کمتر در تاریخچه زمانی سرعت زمین دیده می‌شود [۱-۴].

افزون بر موارد فوق، فرایند جهت‌پذیری خنثی (ساکن)^۷ اثر مشخصی بر روی تاریخچه زمانی یک رکورد حوزه نزدیک ندارد و همچنین دور یا نزدیک شدن انتشار گسلش نیز چندان قابل تشخیص نخواهد بود. فرایند حرکت پرتابی به تغییر مکان‌های ماندگار زمین اطلاق می‌شود که به‌صورت یک پالس استاتیکی یک‌سویه که در یک بازه زمانی مجزا و در طی لغزش گسل روی می‌دهد، پدیدار گردد. تغییر مکان‌های ناشی از حرکت پرتابی، با نمود بزرگ‌تر در جهت لغزش گسل هستند. بدین ترتیب در رفتار گسل‌های امتداد لغز^۸، پالس جهت‌پذیری در تاریخچه زمانی مؤلفه عمود بر صفحه شکست گسل (مؤلفه TR) و پالس حرکت پرتابی (احتمالی) نیز در تاریخچه زمانی مؤلفه موازی (مؤلفه LN) با صفحه مذکور پدیدار می‌شوند. همچنین در فرایند گسلش شیب‌لغز^۹، نمود فیزیکی پالس جهت‌پذیری و حرکت پرتابی (احتمالی) می‌تواند در تاریخچه زمانی مؤلفه عمود بر صفحه شکست نیز روی دهد. تفاوت فیزیکی بین مؤلفه‌های عمود و موازی صفحه شکست گسل در تاریخچه زمانی رکوردهای نیرومند زلزله، در نتیجه اثرات فرایند جهت‌پذیری پیش‌رونده است. نتایج مطالعات نشان می‌دهند که

پرانرژی (کمتر از ۱۰هرتز) در طیف فوریه، نسبت به رکوردهای حوزه دور می‌باشند. پیش‌بینی میزان خسارت وارده تحت جنبش‌های نیرومند زمین، می‌تواند بر اساس آرایش قرارگیری مدهای اول انتقالی و نیز مد اول پیچشی سازه در باند فرکانس‌های متناظر با موجک اصلی یا موجک‌های تشکیل دهنده‌ی پالس پرورد بلند و پردامنه سرعت انجام شود. ساختارهای متفاوتی از پالس پردامنه و بلندمدت سرعت در تاریخچه زمانی رکوردهای مربوط به زلزله‌های نورث‌ریج ۱۹۹۴، بم ۲۰۰۳ و طبس ۱۹۷۸ وجود دارد. نتایج و ملاحظات تحلیلی نشان می‌دهد که رکوردهای نیرومند حوزه نزدیک در حالت میدان آزاد^۱، واقعی‌ترین نمایش از ساختار بارگذاری جانبی برای ارزیابی رفتار دینامیکی سازه‌ها هستند [۲۳-۲۷].

رکوردهای نیرومند ثبت شده در حوزه نزدیک گسل، نمود واقعی رفتار زمین هستند و با لحاظ نمودن هر دو مؤلفه افقی شتاب‌نگاشت مربوطه، همراه با در نظر گرفتن اثر مؤلفه قائم تعریف می‌شوند. در این پژوهش، تمام رکوردها به صورت طبیعی و سه مؤلفه‌ای به مدل‌های مطالعاتی اعمال گردید. مؤلفه موازی با صفحه شکست گسل (مؤلفه LN) در راستای X پلان، مؤلفه نیرومندتر عمود بر صفحه شکست (مؤلفه TR) در راستای Y پلان و مؤلفه قائم نیز در جهت Z به سازه‌های مطالعاتی وارد شده است. تاریخچه زمانی سرعت، طیف دامنه فوریه^{۱۱} و همچنین طیف سه‌جانبه^{۱۲} مربوط به چهار رکورد انتخابی در این پژوهش در شکل‌های (۱) و (۲) نمایش داده شده‌اند. طیف فوریه هر دو مؤلفه افقی LN و TR مربوط به رکوردهای نیرومند حوزه نزدیک، دارای باند باریک‌تر فرکانس‌های پرانرژی در بازه کمتر از ۱۰هرتز است. این ویژگی با نمود بسیار کوچک‌تر برای برخی رکوردهای نیرومندتر حوزه دور نیز ملاحظه می‌شود.

رکورد ARL (شکل ۱- الف)، حاوی اثرات جهت‌پذیری خنثی (گسلش ساکن) می‌باشد. توضیح آنکه با وجود واقع شدن ایستگاه لرزه‌نگاری مربوطه در فاصله نزدیک به صفحه شکست گسل، ساختار پالس مشخص و پردامنه در تاریخچه زمانی سرعت این رکورد وجود ندارد. همچنین، موجک‌های

تعدادی از مهاربندها، ظرفیت مقاومتی و قابلیت جذب انرژی برای اسکلت مقاوم، به‌ویژه در بخش‌های پایینی سازه کاهش یافته و آثار رفتار غیرخطی با دامنه بزرگ پدیدار خواهد شد [۱۵-۱۹].

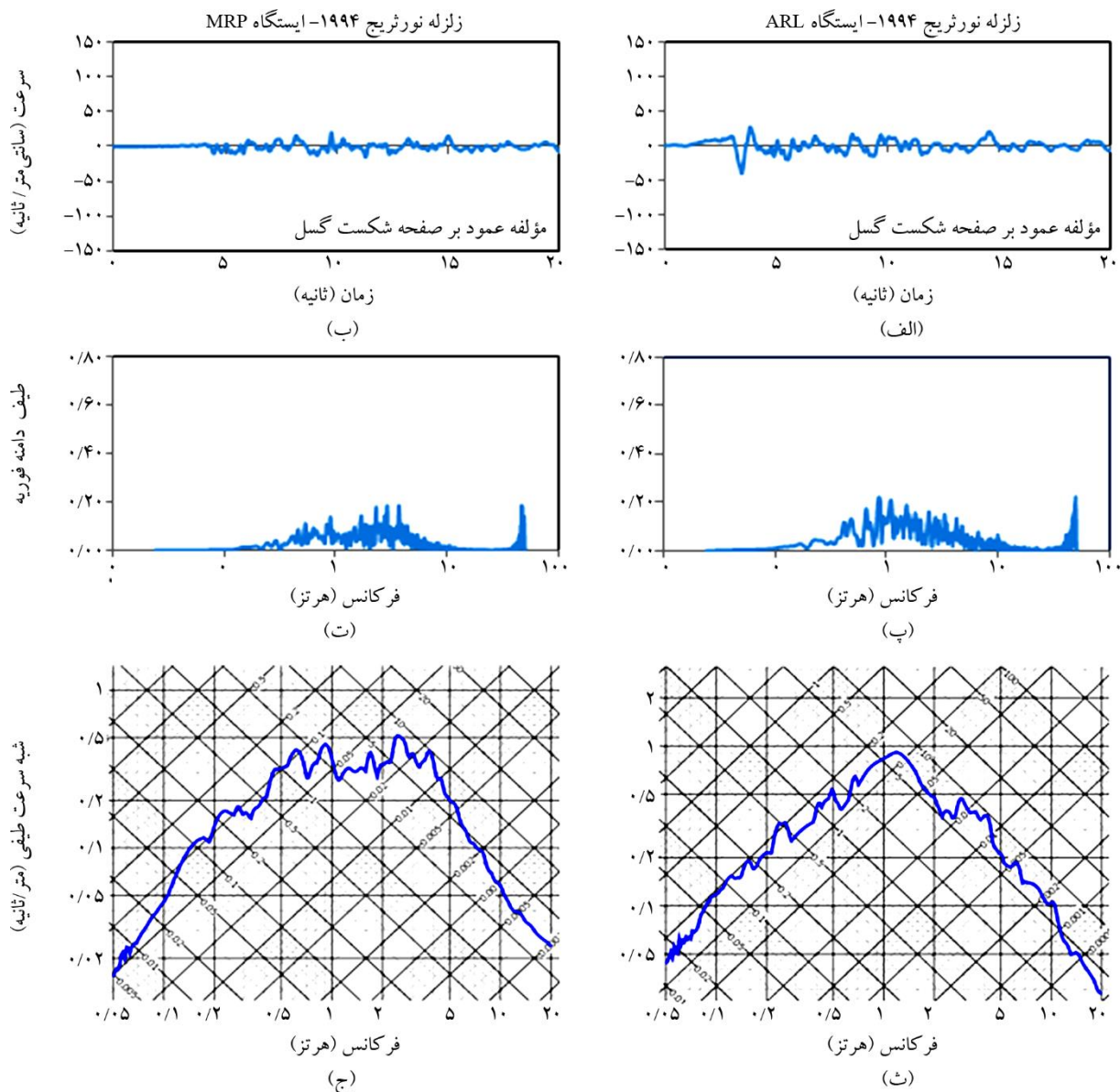
هدف از این پژوهش، ارزیابی عملکرد لرزه‌ای سازه‌های بلندمرتبه دارای چندین نوع اسکلت قاب محیطی مهاربندی‌شده تحت اثر رکوردهای نیرومند زلزله است. شناخت ماهیت و مشخصات رفتار غیرخطی سازه‌های مطالعاتی، تحت اثر جنبش‌های شدید و نیرومند زمین صورت گرفته است. مجموعه تحلیل‌های غیرخطی تاریخچه زمانی نیز تحت رکوردهای حوزه نزدیک حاوی اثرات نیرومند جهت‌پذیری و همچنین رکوردهای حوزه دور انجام شده است. دانسته شده که با افزایش ارتفاع سازه، کنترل پارامتر تغییر مکان نسبی جانبی (دریفت) از اهمیت بالایی برخوردار است. پارامترهای پاسخ مطالعاتی در این پژوهش شامل برش پایه، تغییر مکان نسبی، بیشینه تغییر مکان جانبی، شتاب مطلق و سرعت نسبی طبقات و همچنین مکانیسم مفاصل پلاستیک است.

۲- ماهیت زمین لرزه‌های مورد استفاده

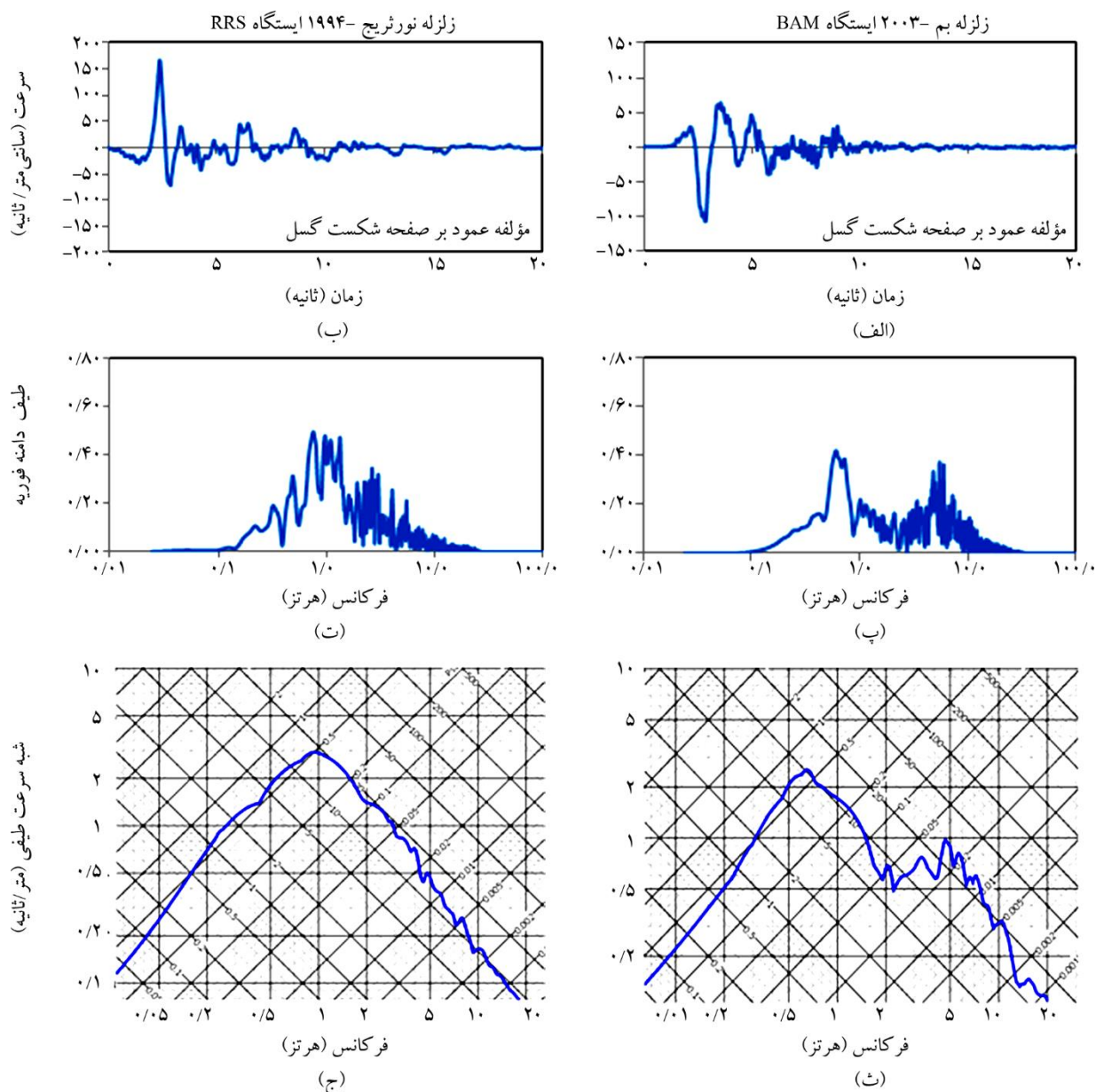
در این پژوهش، ملاک اصلی انتخاب رکوردهای نیرومند زلزله، حضور پالس پیوسته و بلندمدت در تاریخچه زمانی سرعت زمین است. وجود پالس‌های بزرگ و پیوسته در تاریخچه زمانی یک رکورد حوزه نزدیک، می‌تواند پارامترهای پاسخ سازه را به شدت تحت تأثیر قرار دهد. اهمیت این موضوع با افزایش یافتن مدت دوام حرکات نیرومند زمین در هنگام وقوع یک زلزله بزرگ، دوچندان خواهد شد. توضیح آنکه مقدار انرژی جنبشی اعمالی به سازه‌ها تحت این گونه رکوردها، به مراتب بیشتر از میزان متناظر آن تحت رکوردهای حوزه دور است [۲۰-۲۲]. جنبش‌های نیرومند انتخابی در این پژوهش، حاوی مجموعه‌ای از اسپایک‌های پرانرژی و کوتاه‌مدت در تاریخچه زمانی شتاب مربوطه، به همراه پالس‌های پردامنه در بازه ابتدایی تاریخچه زمانی سرعت است. جنبش‌های نیرومند زمین در حوزه نزدیک گسل، دارای مؤلفه سرعت طیفی بالاتر و نیز باند با پهنای باریک‌تر فرکانس‌های

فرکانسی بالاتر از یک هرتز قرار دارد. همچنین بر اساس شکل‌های (۱-ث) و (۱-ج) مشاهده می‌شود که محدوده حساس به سرعت مربوط به طیف سه‌جانبه رکورد حوزه دور MRP نسبت به رکورد حوزه نزدیک و نه‌چندان نیرومند ARL، بازه به نسبت پهن تری را پوشش می‌دهد. شایان ذکر است که کوچک و باریک شدن طیفی ناحیه حساس به شتاب، می‌تواند منجر به یک کاهش عمومی در برش پایه سازه و جابه‌جایی نسبی جانبی (دریفت جانبی) تحت اثر رکوردهای حوزه دور گردد [۲۸-۲۹].

کم‌دامنه موجود نیز به مراتب از ساختارهای همانند خویش در تاریخچه زمانی یک رکورد حاوی اثرات جهت‌پذیری پس‌رونده (گسلش پس‌رو) کوچک‌تر هستند. بر اساس شکل (۱-ب)، رکورد ایستگاه MRP از نوع حوزه دور است و هیچ ساختار پالس‌شکل در تاریخچه زمانی آن مشاهده نمی‌شود. با توجه به شکل‌های (۱-پ) و (۱-ت)، در طیف دامنه فوریه هر دو رکورد که نشان‌دهنده ویژگی‌های جنبش زمین بر حسب محتوای فرکانسی می‌باشد، مؤلفه ارتفاعی بیشینه در بازه



شکل (۱): نمایش تاریخچه زمانی و پارامترهای طیفی رکوردهای حوزه نزدیک ARL 1994 و حوزه دور MRP 1994 متناظر با مؤلفه عمود بر صفحه شکست گسل (مؤلفه TR): (الف) تاریخچه زمانی سرعت رکورد ARL 1994، (ب) تاریخچه زمانی سرعت رکورد MRP 1994، (پ) طیف دامنه فوریه رکورد ARL 1994، (ت) طیف دامنه فوریه رکورد MRP 1994، (ث) طیف سه‌جانبه رکورد ARL 1994 و (ج) طیف سه‌جانبه رکورد MRP 1994.



شکل (۲): نمایش تاریخچه زمانی و پارامترهای طیفی متناظر با مؤلفه عمود بر صفحه شکست گسل رکوردهای نیرومند حوزه نزدیک؛ (الف) تاریخچه زمانی سرعت رکورد RRS 1994، (ب) تاریخچه زمانی سرعت رکورد BAM 2003، (پ) طیف دامنه فوریه رکورد BAM 2003، (ت) طیف دامنه فوریه رکورد RRS 1994، (ث) طیف سه‌جانبه رکورد BAM 2003 و (ج) طیف سه‌جانبه رکورد RRS 1994.

نزدیک حاوی اثرات جهت‌پذیری ساکن، در یک بازه گسترده تواتری و با مؤلفه‌های ارتفاعی کم‌ویش برابر و یا کمی متفاوت، در طیف فوریه ایجاد می‌شود. ساختار طیفی مذکور برای رکوردهای نه‌چندان نیرومند حوزه نزدیک و حاوی اثرات جهت‌پذیری پس‌رونده، به صورت مؤلفه‌های ارتفاعی بزرگ‌تر در طیف فوریه نسبت به حالت جهت‌پذیری ساکن است. با توجه به شکل‌های (۲-الف) و (۲-ب)، ساختار فیزیکی

بررسی شکل‌های (۱-ث) و (۱-ج) نشان می‌دهد که بخش حساس به سرعت طیف سه‌جانبه، مقادیر بالاتری را برای رکورد ARL نمایش می‌دهد. مؤلفه‌های ارتفاعی بزرگ‌تر (هم‌راستای محور عمودی) در طیف فوریه یک رکورد زلزله که می‌تواند متناظر با یک یا چند فرکانس باشد، نشانه تخصیص سهم بیشتر انرژی جنبشی متناظر با آن فرکانس (یا فرکانس‌ها) است. ویژگی فوق برای رکوردهای حوزه دور و نیز رکوردهای ضعیف حوزه

جدول (۱): مشخصات طیفی و فیزیکی رکوردهای انتخابی در این پژوهش.

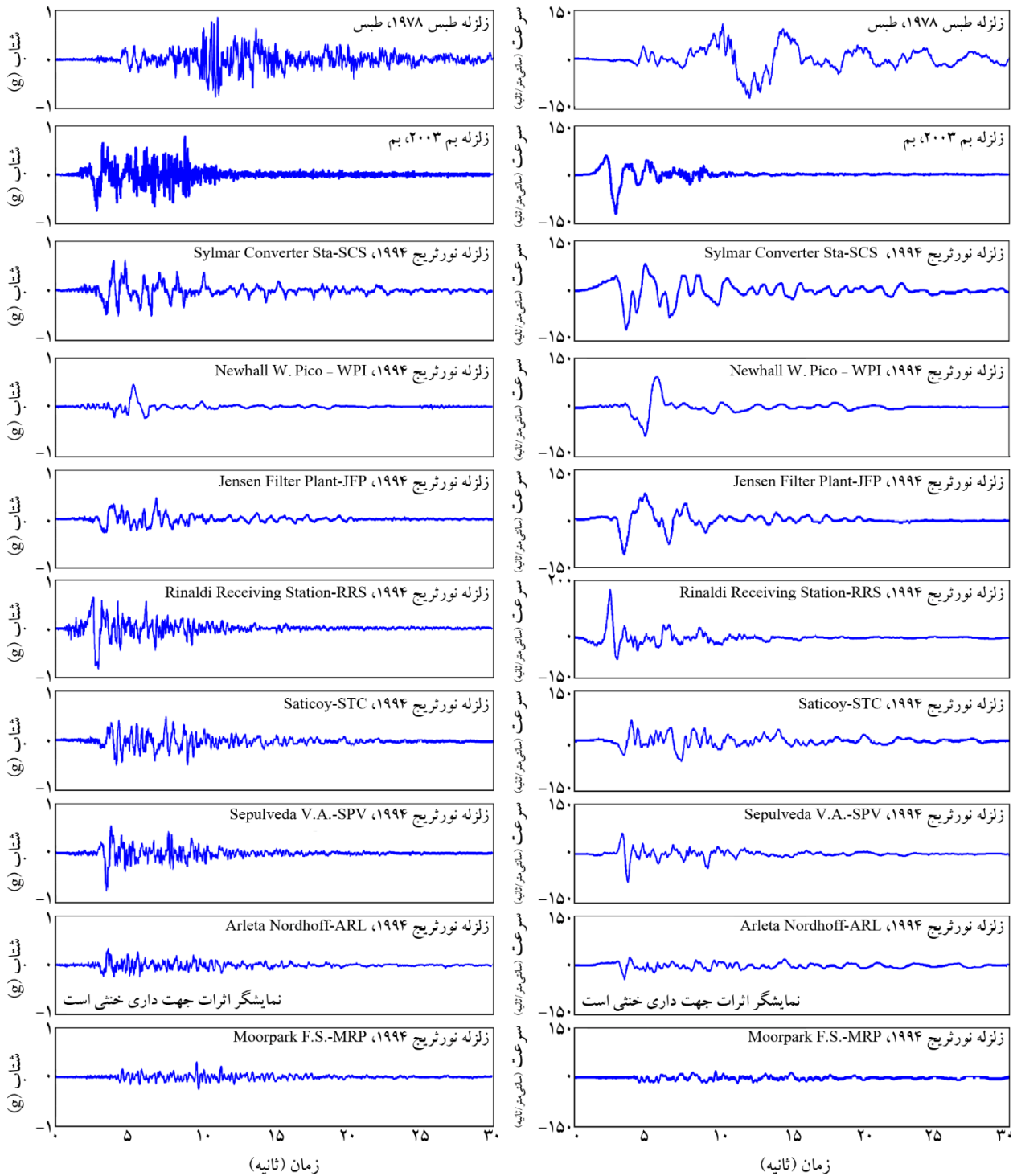
جنش زمین	مؤلفه	بیشینه شتاب (g)	بیشینه سرعت (متری بر ثانیه)	بیشینه جابه‌جایی (متری)	بزرگی (M _w)
طبس ۱۹۷۸ شهر طبس (TAB)	موازی با گسل	۰/۸۳۶	۹۷/۷	۳۹/۹	۷/۴
	عمود بر گسل	۰/۸۵۱	۱۲۱/۳	۹۴/۵	
	قائم	۰/۶۸۸	۴۵/۵	۱۷	
بم ۲۰۰۳ شهر بم (BAM)	موازی با گسل	۰/۶۳۵	۵۹/۶	۲۰/۷	۶/۶
	عمود بر گسل	۰/۷۹۳	۱۲۳/۷	۳۷/۴	
	قائم	۰/۹۹۹	۳۷/۶۶	۱۰/۱۱	
نورثریج ۱۹۹۴ Sylmar - (SCS)	موازی با گسل	۰/۸۹۷	۱۰۲/۸	۴۶/۹۹	۶/۷
	عمود بر گسل	۰/۶۱۲	۱۱۷/۴	۵۳/۴۷	
	قائم	۰/۵۸۶	۳۴/۶	۲۵/۴۴	
نورثریج ۱۹۹۴ W. Pico - (WPI)	موازی با گسل	۰/۳۲۵	۶۷/۴	۱۶/۱۱	۶/۷
	عمود بر گسل	۰/۴۵۴	۹۲/۸	۵۶/۶۴	
	قائم	۰/۲۹	۳۷/۲	۱۳/۲۹	
نورثریج ۱۹۹۴ Jensen Filter - (JFP)	موازی با گسل	۰/۵۹۳	۹۹/۳	۲۴	۶/۷
	عمود بر گسل	۰/۴۲۴	۱۰۶/۲	۴۳/۰۶	
	قائم	۰/۴	۳۴/۱	۸/۸۹	
نورثریج ۱۹۹۴ Rinaldi - (RRS)	موازی با گسل	۰/۴۷۲	۷۳	۱۹/۷۶	۶/۷
	عمود بر گسل	۰/۸۳۸	۱۶۶/۱	۲۸/۷۸	
	قائم	۰/۸۵۲	۵۰/۷	۱۹/۷۶	
نورثریج ۱۹۹۴ Saticoy - (STC)	موازی با گسل	۰/۳۶۸	۲۸/۹	۸/۴۴	۶/۷
	عمود بر گسل	۰/۴۷۷	۶۱/۵	۲۲/۰۶	
	قائم	۰/۱۵۳	۵/۵۱	۳/۳۲	
نورثریج ۱۹۹۴ Sepulveda - (SPV)	موازی با گسل	۰/۹۳۹	۷۶/۶	۱۴/۹۵	۶/۷
	عمود بر گسل	۰/۷۵۳	۸۴/۸	۱۸/۶۸	
	قائم	۰/۴۶۷	۳۳/۲	۹/۵۸	
نورثریج ۱۹۹۴ Arleta - (ARL)	موازی با گسل	۰/۳۰۸	۲۳/۲	۱۰/۷۵	۶/۷
	عمود بر گسل	۰/۳۴۴	۴۰/۶	۱۵/۰۴	
	قائم	۰/۵۵۲	۱۸/۴	۸/۸۳	
نورثریج ۱۹۹۴ More Park - (MRP)	موازی با گسل	۰/۲۹۲	۲۰/۷	۴/۲۴	۶/۷
	عمود بر گسل	۰/۱۹۳	۲۰/۲	۴/۷۹	
	قائم	۰/۱۵۹	۷/۹	۰/۹	

۳- سازه‌های مطالعاتی و ملاحظات طراحی

سازه‌های مطالعاتی در این پژوهش از نوع قاب محیطی مهاربندی شده ۱۳ در ارتفاع ۲۰ طبقه بوده و بر اساس ضوابط لرزه‌ای استاندارد ۲۸۰۰ (ویرایش چهارم) و مباحث ششم و دهم مقررات ملی ساختمان طراحی شده‌اند [۳۴-۳۶].

رکوردهای نیرومند BAM و RRS حاوی پالس ترکیبی و نیز اسپایک‌های پرانرژی در تاریخچه زمانی شتاب و سرعت است. توضیح آنکه برای هر دو مؤلفه افقی LN و TR رکوردهای حاوی اثرات جهت‌پذیری پیش‌رونده، مقادیر مؤلفه ارتفاعی (با دیمانسیون سرعت) متناظر با محور عمودی در طیف دامنه فوری، به‌ویژه در بازه فرکانس‌های پایین (حدود کمتر از ۵ هرتز) اندازه بزرگی داشته و همچنین در دامنه فرکانسی بالا (حدود بیش از ۲۰ هرتز) نیز به نسبت قابل توجه می‌باشند. فرکانس هم‌ارز با بسیاری از این مؤلفه‌های بزرگ سرعتی در طیف فوری، متناظر با گام زمانی اسپایک‌های پر دامنه شتاب در هر دو مؤلفه افقی LN یا TR است. نمود این ویژگی در ساختار طیفی هر دو رکورد BAM و RRS مشهود است (شکل‌های ۲- پ و ت). موضوع فوق، بیان‌گر بزرگ و قابل توجه بودن سهم انرژی جنبشی زلزله هم‌ارز با فرکانس‌های کوچک (یا مقادیر ویژه) متناظر با چند ارتعاشی پایین‌تر مربوط به سازه‌های میان‌مرتبه تا بلند است. همچنین، همین موضوع می‌تواند برای تعدادی از مدهای ارتعاشی بالاتر یک سازه بلندمرتبه نیز برقرار باشد. روند آزاد شدن انرژی جنبشی رکوردهای نیرومند حوزه نزدیک در بازه زمانی پالس‌های سرعت و تغییر مکان، بسیار شدید بوده و دچار یک یا چند جهش بزرگ می‌شود. طیف فوری این‌گونه رکوردها در بازه متناظر با فرکانس‌های پایین نیز دارای مؤلفه ارتفاعی بزرگ و قابل توجه است. وجود این ویژگی، اثرات تشدید را در رفتار لرزه‌ای سازه‌های میان‌مرتبه تا بلند به صورت مشخصی پدیدار خواهد نمود. مقادیر بیشینه مؤلفه‌های ارتفاعی متناظر با بازه فرکانسی کمتر از یک هرتز در طیف سه‌جانبه رکورد BAM (شکل ۲)، یک نمود مشخص از موضوع فوق است [۳۰-۳۳]. مشخصات طیفی مربوط به رکوردهای انتخابی در جدول (۱) آورده شده‌اند. همچنین، تاریخچه زمانی سرعت و شتاب مربوط به رکوردهای انتخابی در شکل (۳) نشان داده شده است. رکوردهای SPV و STC دارای اثرات ضعیف جهت‌پذیری حوزه نزدیک بوده و رکوردهای BAM، TAB و نیز RRS، WPI، JFP (زلزله نورثریج ۱۹۹۴) دارای اثرات نیرومند جهت‌پذیری پیش‌رونده هستند.

مؤلفه گسل نرمال



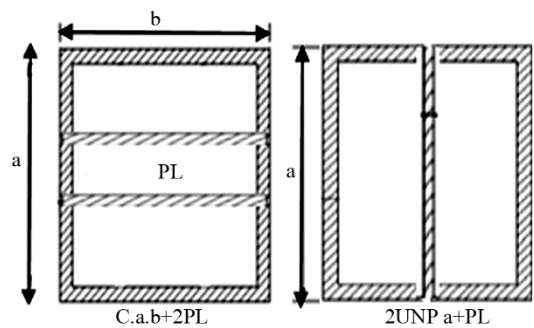
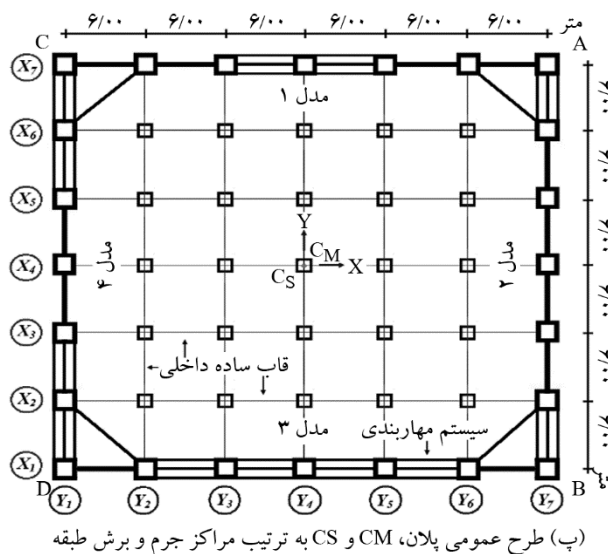
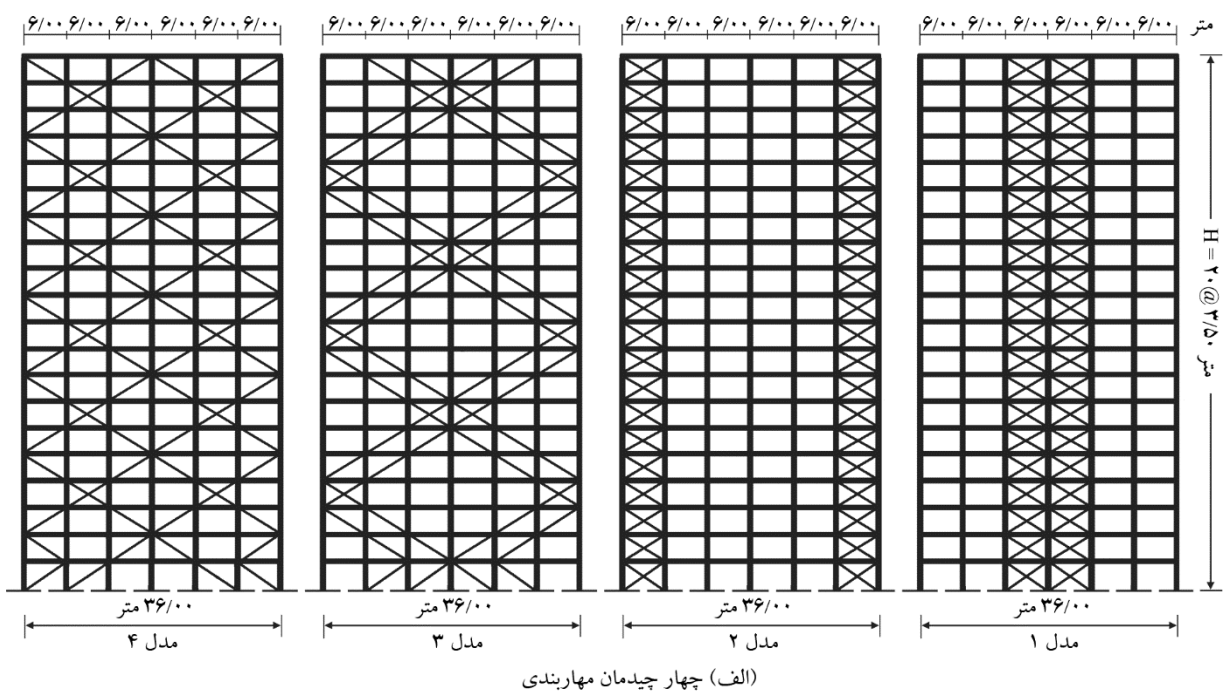
شکل (۳): نمایش تاریخچه زمانی شتاب و سرعت رکوردهای انتخابی.

دارای پیکربندی متمرکز پانل‌های مقاوم بوده و سازه‌های مطالعاتی ۳ و ۴ نیز دارای آرایش مهاربند‌های بزرگ مقیاس^{۱۴} هستند. بر اساس مبحث ششم مقررات ملی ساختمان، بارگذاری مرده و زنده اعمالی برای کل طبقات به ترتیب ۰/۵ و ۰/۲ تن بر مترمربع و

جزئیات پلان و قاب سازه‌ای آن در شکل (۴) نمایش داده شده است. هر چهار سازه دارای پلان مشابه هستند و پیکربندی آن در هر دو جهت شامل شش دهانه به طول ۶ متر، تعداد طبقات ۲۰ و ارتفاع تمام طبقات ۳/۵ متر می‌باشد. سازه‌های مطالعاتی ۱ و ۲

به صورت پیچشی است. برقراری ویژگی‌های رفتار پیچشی سخت نیز به دلیل بیشتر بودن پریرود مد اول انتقالی نسبت به اولین مد پیچشی تأیید می‌گردد (جدول ۳). همچنین به منظور مدل سازی ویژگی‌ها و عملکرد غیرخطی اعضا، مفاصل پلاستیک اندرکنشی خمشی - محوری P-M، خمشی M و غیرالاستیک محوری P بر اساس توصیه‌های FEMA به ترتیب برای المان‌های ستون و تیر در قاب‌های مستوی اسکلت مقاوم محیطی و نیز المان‌های مهاربند در شکل (۵) تعریف شده است [۳۸-۳۹].

همچنین برای تراز کف ۲۰-ام (تراز بام) نیز ۰/۵ و ۰/۱۵ تن بر مترمربع در نظر گرفته شد. مشخصات فولاد مصرفی و مقاطع اعضا برای هر چهار مدل مطالعاتی یکسان فرض شده و در ارزیابی طرح لرزه‌ای، دو معیار محدودیت جابه‌جایی نسبی طبقات و رعایت اصل ستون قوی - تیر ضعیف نیز در نظر گرفته شده است [۳۷]. مقاطع و پروفیل اعضای سازه‌های مطالعاتی در جدول (۲) نشان داده شده‌اند. مدهای ارتعاشی اول و دوم (هم‌راستا با جهات X و Y پلان) برای همگی سازه‌های مطالعاتی از نوع انتقالی بوده و مد سوم نیز



(ب) مقاطع المان‌های سازه

شکل (۴): سازه‌های مطالعاتی قاب محیطی مهاربندی شده [۳۷].

جدول (۲): مقاطع و نیمرخ‌های طرح شده در سازه‌های مطالعاتی [۳۷] (ابعاد به سانتی‌متر است).

تیر	مهاربند	ستون Y7	ستون Y6	ستون Y5	ستون Y4	ستون Y3	ستون Y2	ستون Y1	طبقات
W40x20x1.5	2UNP38+PL	C70x2.5	C70x2.5	C80x3.5+2PL	C80x3.5+2PL	C80x3.5+2PL	C70x2.5	C70x2.5	۵-۱
W40x20x1.5	2UNP32	C65x2	C65x2	C70x3+2PL	C70x3+2PL	C70x3+2PL	C65x2	C65x2	۱۰-۶
W40x20x1.5	2UNP30	C60x2	C60x2	C65x2.5	C65x2.5	C65x2.5	C60x2	C60x2	۱۵-۱۱
W40x20x1.5	2UNP26	C50x1.5	C50x1.5	C55x1.5	C55x1.5	C55x1.5	C50x1.5	C50x1.5	۲۰-۱۶

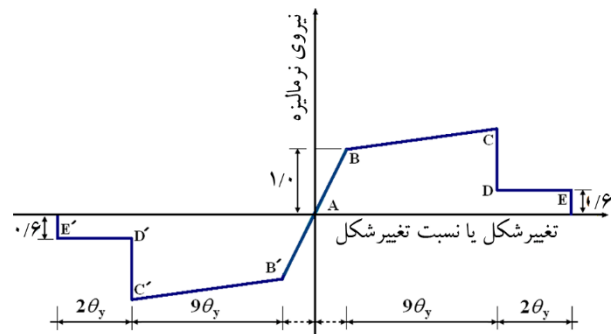
نیز بر اساس تعریف مفصل نامتقارن P با ویژگی‌های متفاوت عملکردی در کشش و فشار، منظور گردید. این تحقیق دربرگیرنده نتایج تحلیل رفتار دینامیکی غیرخطی سازه‌های مطالعاتی شکل (۴) با آرایش متمرکز پانل‌های مهاربندی همگرا (مدل‌های ۱ و ۲) و نیز پیکربندی مهاربندهای بزرگ مقیاس (مدل‌های ۳ و ۴) تحت یک مجموعه از رکوردهای نیرومند زلزله و با کاربرد نرم‌افزارهای مهندسی عمران می‌باشد [۴۰-۴۱].

۴- بررسی پاسخ لرزه‌ای سازه‌های مطالعاتی

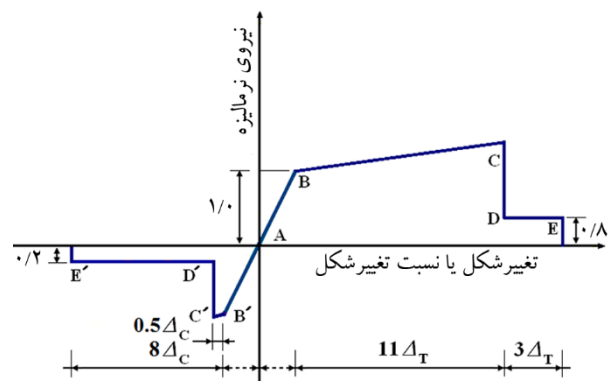
مجموعه نتایج حاصل از تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی چهار سازه مطالعاتی با اسکلت قاب محیطی مهاربندی شده (شکل ۴) به صورت نمودارهای پیشینه برش پایه، پیشینه پاسخ‌های تغییر مکان جانبی، تغییر مکان نسبی جانبی (دریفت جانبی)، شتاب مطلق و سرعت نسبی طبقات و همچنین مکانیسم مفاصل پلاستیک ارائه شده است. با توجه به ارزیابی نتایج، روند شکل‌گیری و گسترش حوزه‌های غیرخطی در سیکل‌های پاسخ لرزه‌ای مدل‌های مطالعاتی تحت رکوردهای حوزه نزدیک با شدت بالایی اتفاق می‌افتد. نمود این ویژگی تحت پالس‌های پردامنه و بلندمدت سرعت مشخص‌تر بوده، به گونه‌ای که تشکیل مکانیسم گسترده مفاصل پلاستیک در حین رفتار لرزه‌ای هر چهار سازه مطالعاتی شکل (۴) ملاحظه شد. شکل (۶) نمایشگر پیشینه برش پایه است. همچنین به دلیل وجود ساختارهای پالس‌گونه در تاریخچه زمانی سرعت مربوط به رکوردهای حوزه نزدیک، برش پایه سازه دارای مقادیر بزرگی می‌شود. روند افزایشی برش پایه تحت پالس‌های پرنرزی سرعت مؤلفه TR به مراتب بزرگ‌تر بوده و نمود این ویژگی نیز برای رکوردهای RRS، SCS و JFP مشهود است.

جدول (۳): پیوند مدهای ارتعاشی اول تا سوم سازه‌های مطالعاتی (ثابته).

مدل	مد اول (انتقالی) محوره‌های Y و X	مد دوم (پیچشی) حول محور Z	مد سوم (انتقالی) محوره‌های Y و X
۱	۲/۵۸	۱/۵۵	۰/۷۱
۲	۲/۵۲	۱/۵۱	۰/۷۰
۳	۱/۵۲	۰/۵۷	۰/۳۵
۴	۱/۴۹	۰/۵۲	۰/۳۱



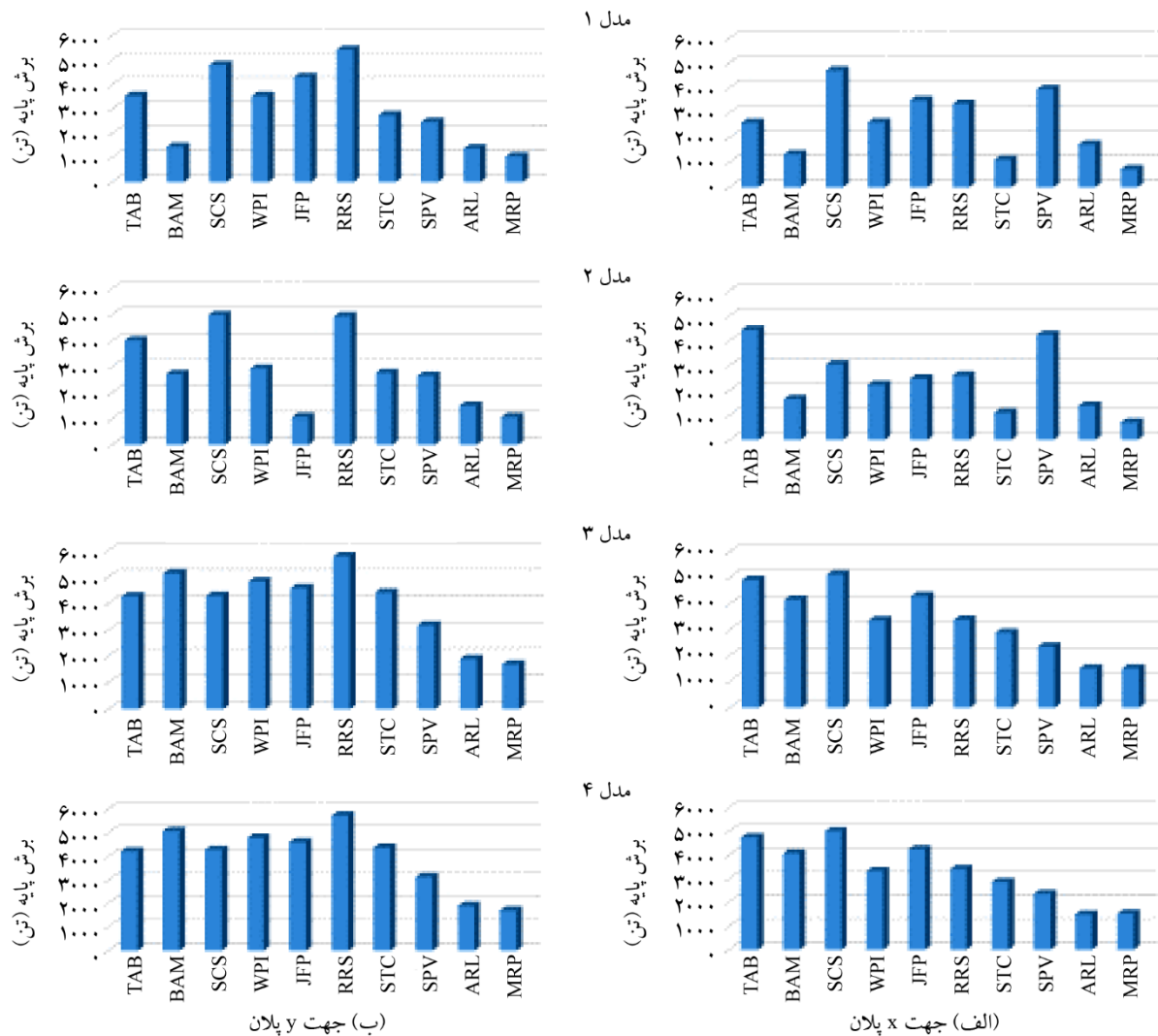
(الف) المان‌های تیر و ستون



(ب) المان‌های مهاربندی

شکل (۵): مدل رفتار غیرخطی اعضا بر اساس FEMA [۳۸-۳۹].

رفتار غیرخطی در دو حالت کشش و فشار برای مفاصل پلاستیک با ساختار اندرکنشی P-M و نیز خمشی M، به صورت یکسان فرض شده است. قابلیت رفتار غیرخطی المان‌های مهاربند

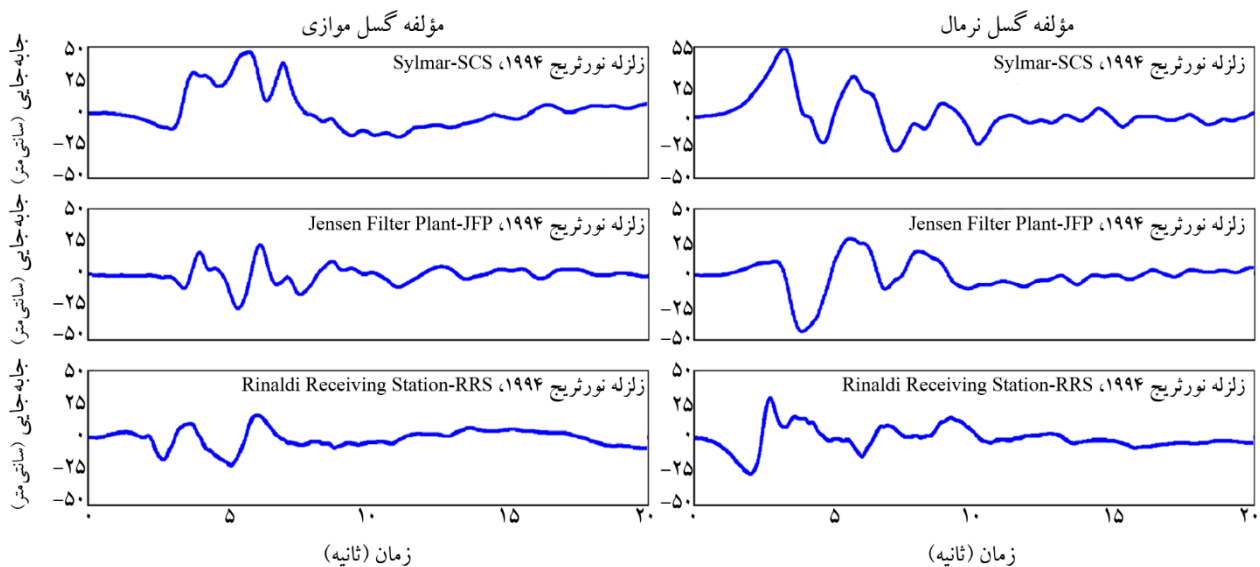


شکل (۶): مقادیر پیشینه برش پایه سازه‌های مطالعاتی شکل (۴).

ساختگاه، تحت اثر دو رکورد JFP و SCS منجر به افزایش شدید برش پایه و نیازهای شکل‌پذیری و جابه‌جایی نسبی جانبی طبقات سازه‌های مطالعاتی می‌شود (شکل ۷). با توجه به ارتباط میان پارامتر دریافت جانبی و تقاضای شکل‌پذیری در هر طبقه، پیشینه تغییر مکان نسبی به‌عنوان معیاری برای بررسی میزان آسیب وارد بر سازه و ارزیابی دامنه رفتار غیرخطی در نظر گرفته می‌شود.

تغییرات پارامتر دریافت در نقطه A پلان (شکل ۴) برای هر چهار سازه مطالعاتی در شکل (۸) نمایش داده شده است. آهنگ تغییرات دریافت برای مدل‌های ۱ و ۲ به‌صورت افزایشی بوده، به‌گونه‌ای که حداکثر آن در بالاترین طبقات اسکلت مقاوم رخ می‌دهد. همچنین برای مدل‌های ۳ و ۴ که دارای آرایش و

تاریخچه زمانی شتاب و سرعت مربوط به رکوردهای حوزه نزدیک JFP و SCS (شکل ۳) از زلزله نورث‌ریج ۱۹۹۴ نیز مانند رکورد RRS حاوی پالس پررود بلند و اسپایک‌های پر دامنه است. ساختارهای موجی شکل در تاریخچه زمانی تغییر مکان زمین نیز بر پایه تأثیرات پالس ترکیبی سرعت مربوطه ایجاد خواهند شد. مطابق شکل (۷)، نمود این اثرات به‌صورت یک جنبش بسیار پر قدرت ضربه‌ای زمین، متناظر با هر دو مؤلفه افقی شتاب یک رکورد نیرومند حوزه نزدیک پدیدار می‌شود. شکل‌گیری و گسترش سریع حوزه‌های غیرخطی همراه با افزایش شدید نیازهای لرزه‌ای اسکلت مقاوم، در بازه زمانی جنبش‌های هجومی فوق‌به‌وقوع خواهد پیوست. وقوع جنبش نیرومند ضربه‌ای زمین



(ب) نمودار مؤلفه موازی با صفحه شکست گسل (مؤلفه LN)

(الف) نمودار مؤلفه عمود بر صفحه شکست گسل (مؤلفه TR)

شکل (۷): تاریخچه زمانی تغییر مکان زمین مربوط به رکوردهای حوزه نزدیک JFP، SCS و RRS.

JFP، RRS، SCS و BAM بیان‌گر این موضوع هستند. بر پایه نتایج این پژوهش، استفاده از آرایش متمرکز پانل‌های مهاربندی شده در پیکربندی سازه، به‌تنهایی نمی‌تواند در کنترل بیشینه تغییر مکان جانبی و دریفت طبقات مؤثر واقع شود. بدین لحاظ، چیدمان ترکیبی اسکلت قاب محیطی با مهاربند‌های بزرگ مقیاس سبب عملکرد لرزه‌ای بهتر نسبت به سازه دارای پانل‌های مهاربندی شده منظم در ارتفاع خواهد شد. افزون بر آن، دامنه عددی پارامترهای پاسخ لرزه‌ای غیرخطی مربوط به مدل‌های پایه با آرایش متمرکز پانل‌های مهاربندی شده (مدل‌های ۱ و ۲) نسبت به مدل‌های دارای مهاربند‌های بزرگ مقیاس، دچار تغییرات گسترده‌تری می‌گردد. با کاربرد پیکربندی‌های مهاربند‌های بزرگ مقیاس در مدل‌های مطالعاتی ۳ و ۴، ضمن ایجاد کاهش بیش از ۳۰ درصدی در تغییر شکل جانبی سازه‌های مطالعاتی ۱ و ۲، یک افت قابل توجه نیز برای پارامتر دریفت جانبی ملاحظه می‌شود.

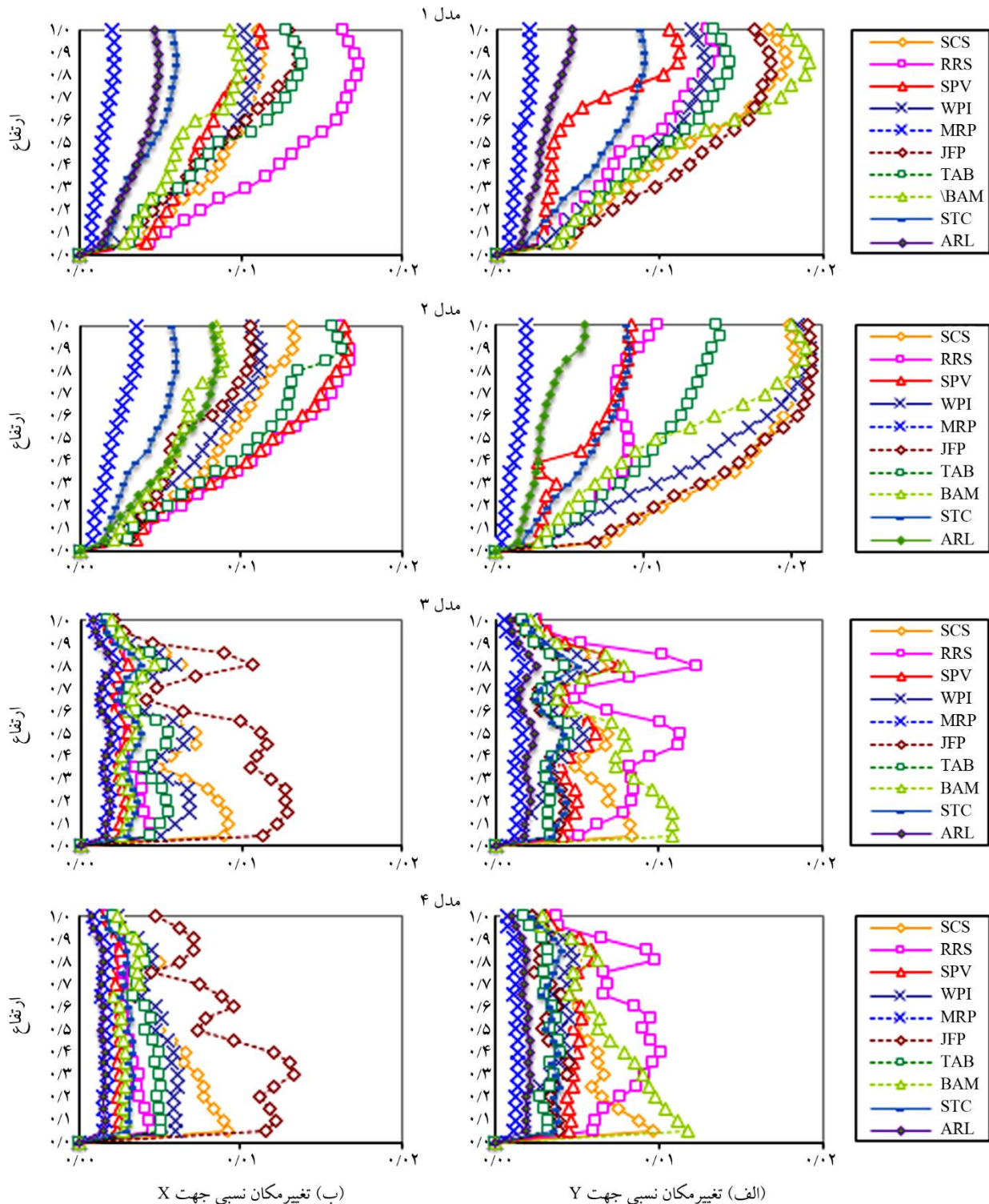
نکته دیگر آنکه تغییرات به نسبت زیاد این پارامترهای پاسخ را می‌توان ناشی از اثرات اسپایک‌های پدیده شتاب و پالس بزرگ سرعت موجود در تاریخچه زمانی هر دو مؤلفه افقی LN و TR از یک رکورد نیرومند دانست. همچنین، اثرات جنبش

پیکربندی مهاربند‌های بزرگ مقیاس می‌باشند، حداکثر پارامتر دریفت طبقات در ۰/۴ و ۰/۶ ارتفاع سازه واقع شده است. مقادیر این پارامتر برای مدل‌های دارای مهاربند‌های بزرگ مقیاس به مراتب کمتر بوده و مقادیر این پارامتر در طبقات بالایی به حداقل رسیده است. این موضوع نشان‌دهنده‌ی عملکرد لرزه‌ای و مشخصه رفتاری بسیار خوب سیستم مهاربند‌های بزرگ مقیاس نسبت به مدل‌های ۱ و ۲، به‌ویژه در نواحی نزدیک به گسل می‌باشد. نکته دیگر آنکه حداکثر پاسخ تغییر مکان نسبی جانبی طبقات در هر چهار مدل مطالعاتی از حد مجاز استاندارد ۲۸۰۰ تجاوز نموده است.

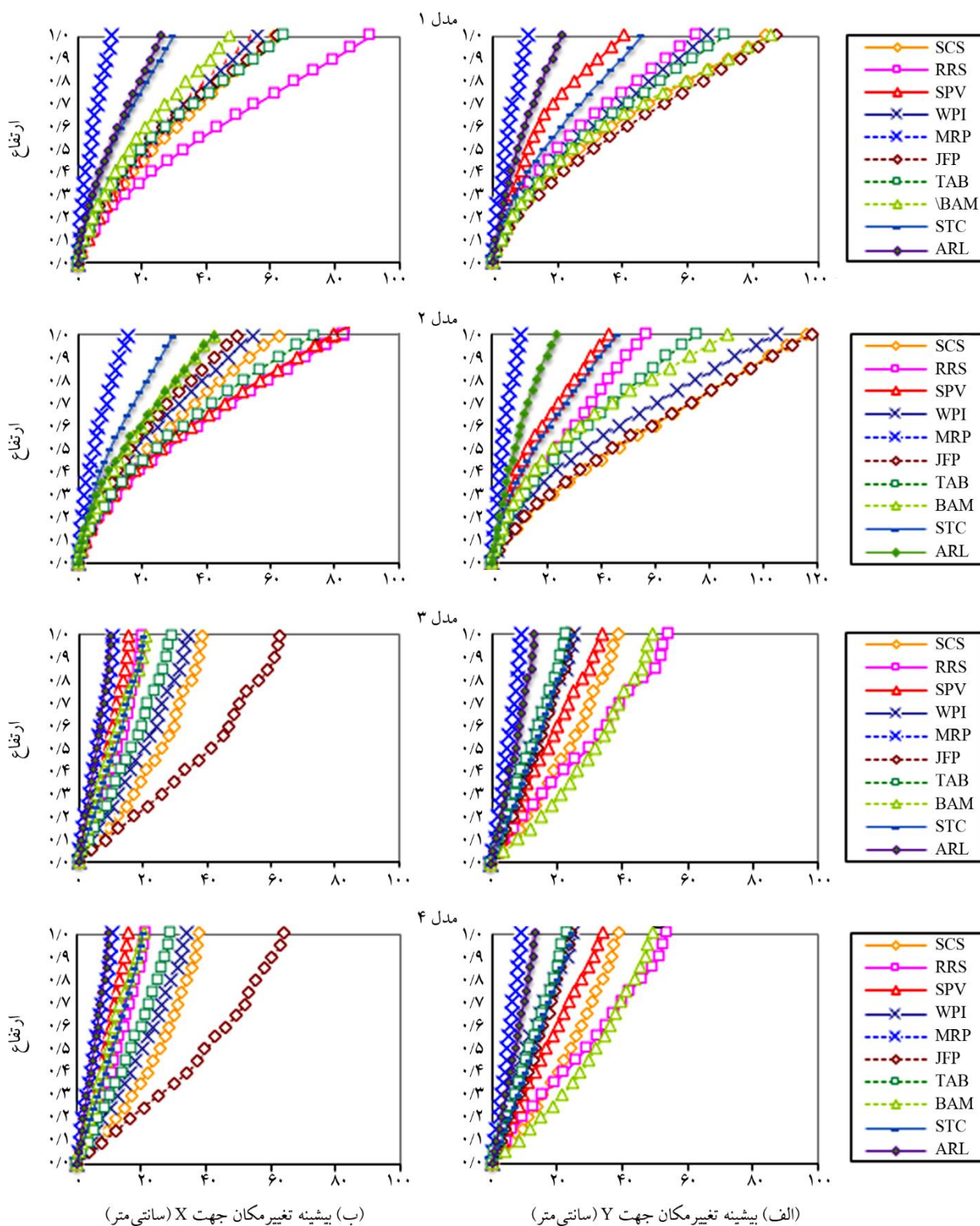
نمودارهای پوش بیشینه تغییر مکان جانبی مربوط به نقطه A پلان در شکل (۹) نمایش داده شده‌اند. مقادیر این پارامتر برای هر چهار مدل مطالعاتی (شکل ۴) در راستای Y پلان و تحت مؤلفه بزرگ تر TR، بیشتر از مقادیر راستای X تحت مؤلفه LN می‌باشند. شایان ذکر است که آهنگ افزایشی مقادیر تغییر مکان جانبی طبقات برای مدل‌های با مهاربندی بزرگ نیز به مراتب کمتر است. همچنین مقادیر این پارامتر تحت رکوردهای نیرومند دارای اثرات جهت‌پذیری پیش‌رونده و حاوی پالس بزرگ سرعت، بیشترین دامنه عددی را دارد. نمودارهای پاسخ لرزه‌ای مربوط به رکوردهای

تغییرات غیرقابل پیش‌بینی پارامترهای خود همبستگی و همبستگی متقاطع مربوط به سه مؤلفه TR، LN و UP، یکی از عوامل اصلی پدیدار شدن تغییرات چشمگیر برای پاسخ‌های غیرخطی سازه در حوزه تغییر شکل‌های بزرگ است.

هجومی زمین در بازه زمانی پالس بزرگ سرعت و اسپایک‌های پس از آن، همراه با آزادسازی بخش عمده انرژی جنبشی یک رکورد پر قدرت حوزه نزدیک است. ماهیت تصادفی رکوردهای نیرومند حاوی پالس بزرگ سرعت و نیز دامنه



شکل (۸): پوش بیشینه تغییر مکان نسبی جانبی (دریافت) طبقات در نقطه A پلان.

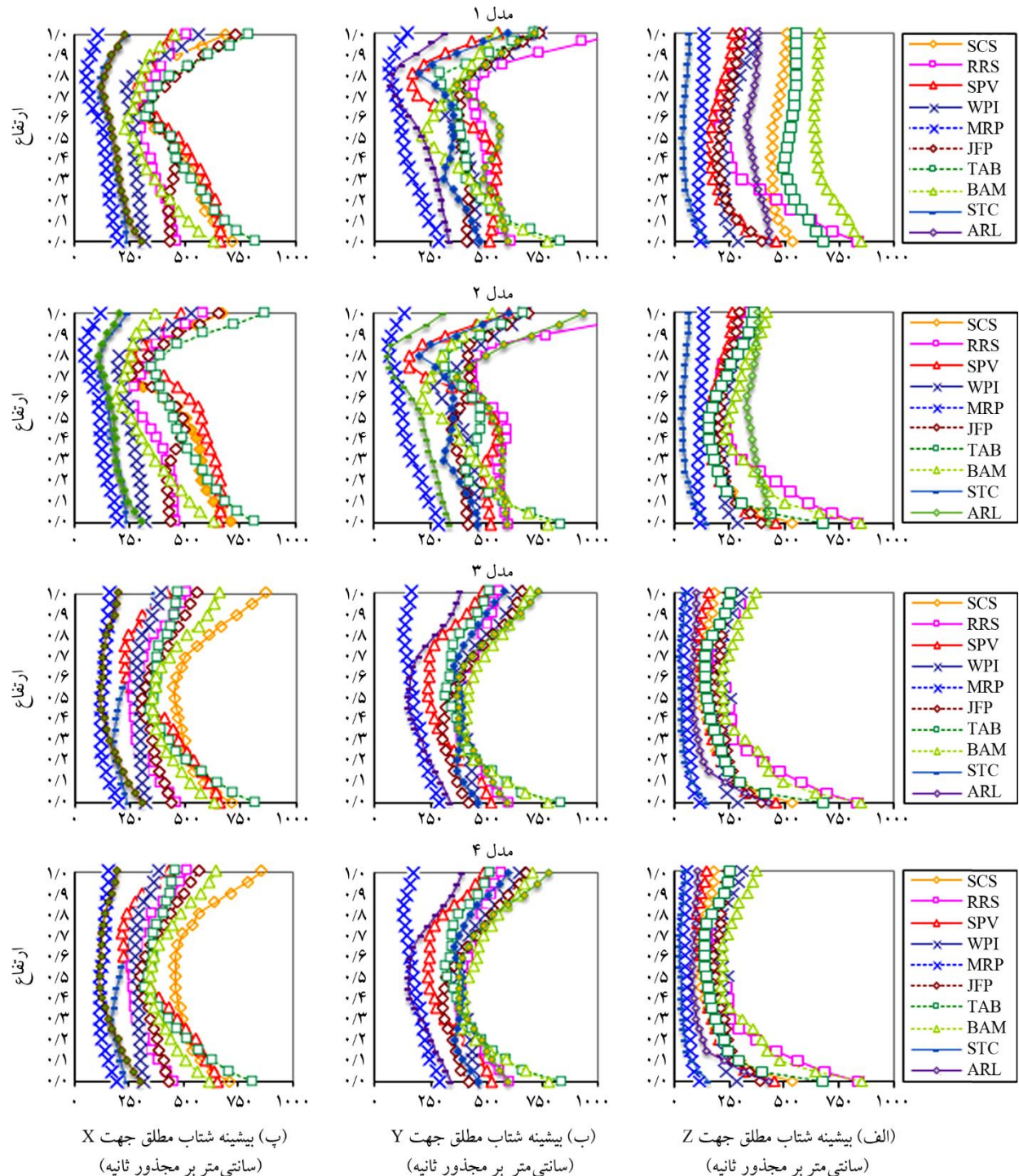


تغییرات کاهشی شتاب بیشینه طبقات در ارتفاع نسبی ۰/۴ تا ۰/۶ برای جهت X و Y پلان و همچنین در ترازهای ارتفاعی میان ۰/۲ تا ۰/۴ برای جهت Z رخ می‌دهند. سپس در ترازهای

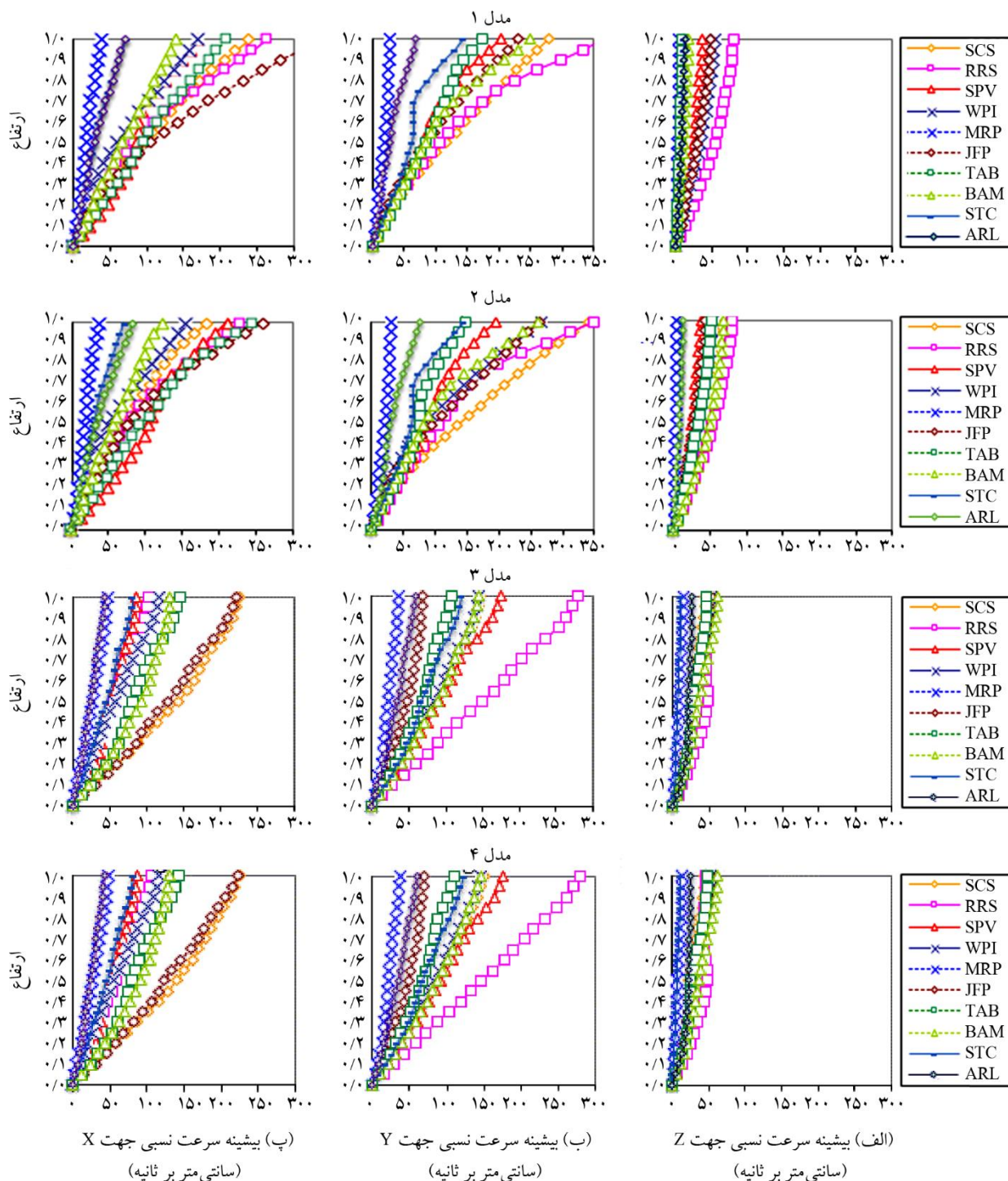
نمودارهای پوش بیشینه شتاب مطلق و سرعت نسبی طبقات در محل مرکز جرم CM متناظر با راستاهای X و Y پلان و Z اسکلت سازه در شکل‌های (۱۰) و (۱۱) نمایش داده شده‌اند.

زلزله در سراسر اسکلت مقاوم است. روند تغییرات پارامترهای دریفت و تغییر مکان جانبی، شتاب مطلق و سرعت نسبی طبقات در مدل‌های مطالعاتی، به ویژه در طبقات فوقانی اسکلت مقاوم نمود بیشتری یافته و دامنه پاسخ لرزه‌ای را افزایش می‌دهد.

ارتفاعی بالاتر، یک روند افزایشی برای بیشینه هر سه مؤلفه شتاب به وقوع می‌پیوندد. نمودارهای بیشینه سرعت نسبی طبقات، نمایشگر یک سیر صعودی در هر سه جهت اسکلت مقاوم می‌باشند. تغییرات فزاینده پارامتر سرعت در راستای ارتفاع سازه، ناشی از اثرات تشدید یافته انتشار امواج نیرومند



شکل (۱۰): پوش بیشینه شتاب مطلق طبقات در مرکز جرم CM پلان.



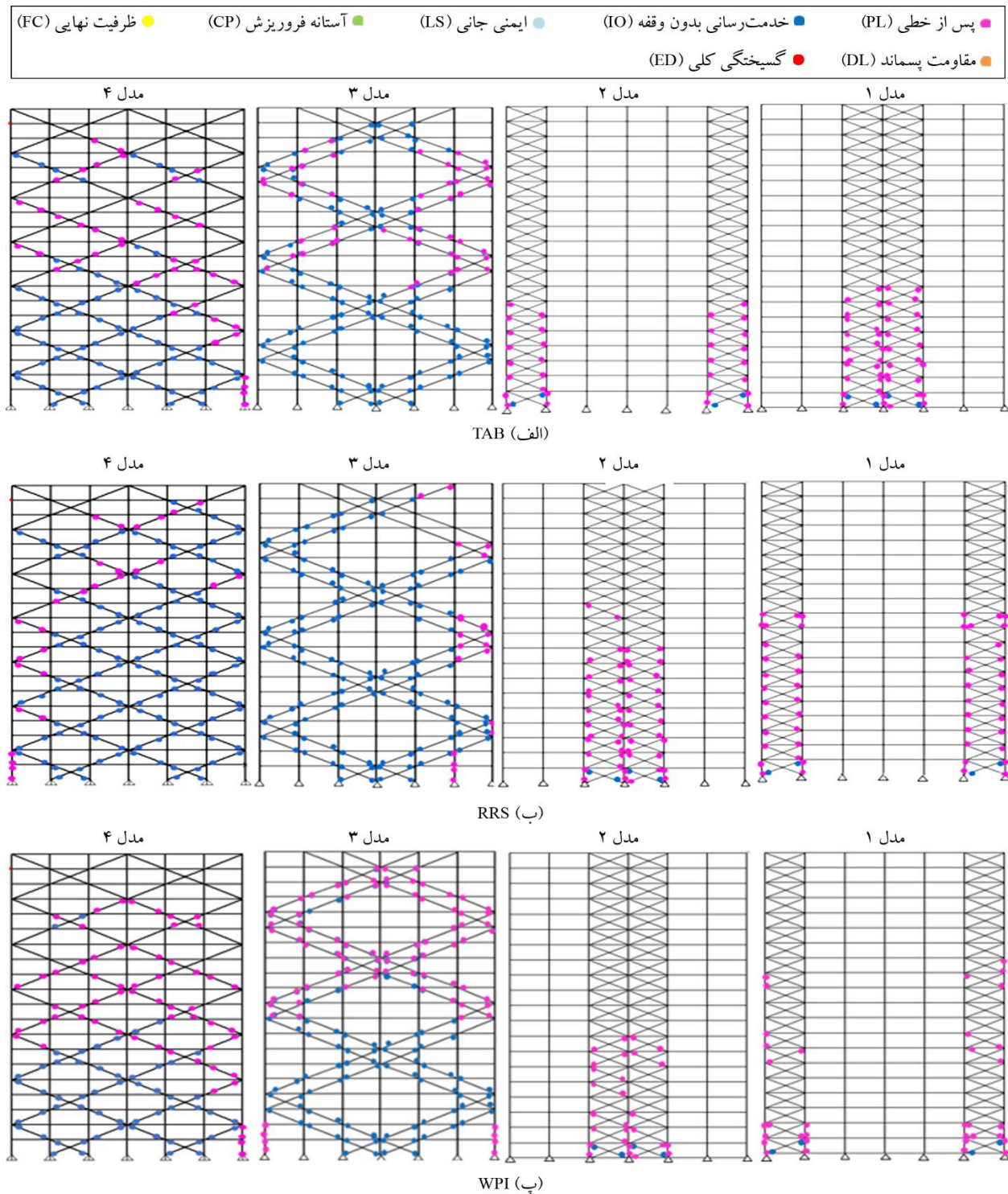
شکل (۱۱): پوش بیشینه سرعت نسبی طبقات در مرکز جرم CM پلان.

مشهود است. چیدمان مهاربندها در پانل‌های قاب‌های مستوی پیرامونی پلان، سبب ایجاد پارامترهای پاسخ به نسبت متفاوت در رفتار لرزه‌ای اسکلت‌های قاب محیطی مهاربندی شده خواهد شد (شکل ۴). موضوع فوق در شکل‌گیری آرایش مفاصل پلاستیک

ارزیابی نتایج حاکی از آن است که آرایش و پیکربندی مهاربندهای بزرگ مقیاس در اسکلت‌های بلندمرتبه، تا اندازه قابل توجهی مقادیر بیشینه شتاب مطلق و سرعت نسبی طبقات را کاهش می‌دهد. نمود این ویژگی در بررسی و مقایسه نمودارهای پاسخ مربوط به مدل‌های ۱ و ۲ با مدل‌های ۳ و ۴

مطالعاتی به حد فراتر از ایمنی جانی (LS) نرسیده است. بدین ترتیب، ملاحظه می‌شود که طراحی اسکلت مقاوم قاب محیطی دارای پیکربندی مهاربندهای بزرگ مقیاس، سبب افزایش سختی و بهبود عملکرد لرزه‌ای ساختمان‌های بلند خواهد شد.

در پیکربندی اسکلت مقاوم سازه‌های مطالعاتی، اختلاف چندانی را نشان نمی‌دهد. مطابق شکل (۱۲) مکانیسم مفاصل پلاستیک تشکیل شده در هر چهار مدل مطالعاتی، به نسبت یکنواخت و مشابه است. همچنین، ماهیت رفتار لرزه‌ای تمامی مدل‌های



شکل (۱۲): ساختار مفاصل پلاستیک تشکیل شده در قاب مستوی محیطی هم‌راستا با محور Y پلان تحت رکوردهای حوزه نزدیک (جدول ۱).

۵- نتیجه گیری

در این پژوهش، یک بررسی تحلیلی بر روی عملکرد لرزه‌ای سیستم‌های قاب محیطی مهاربندی شده تحت اثر زلزله‌های حوزه نزدیک صورت گرفت. چهار سازه مطالعاتی بیست طبقه دارای آرایش متفاوت اسکلت مقاوم و پانل‌های مهاربندی شده، با پلان و مقاطع یکسان طراحی شدند. همچنین، یک مجموعه تحلیل دینامیکی غیرخطی تحت ۱۰ رکورد حوزه نزدیک و دور انجام گردید. انتخاب رکوردهای حوزه نزدیک، بر پایه حضور اسپایک‌های پدیده‌ها به همراه پالس پراثری و بلندمدت در تاریخچه زمانی مربوطه صورت پذیرفت. پارامترهای پاسخ ارزیابی شده نیز شامل جابه‌جایی جانبی و دررفت، شتاب مطلق و سرعت نسبی طبقات می‌باشند. در این راستا، بیان نکات و نتایج زیر حائز اهمیت است.

- چیدمان و پیکربندی مهاربندها در سازه‌های قاب محیطی با آرایش پانل‌های واگرا و نیز همگرا، علاوه بر افزایش کارایی اسکلت مقاوم در تحمل بارهای ثقلی، در برابر بارهای جانبی نیز همانند یک کنسول بزرگ و یکپارچه عمل می‌کند. نتایج تحقیق حاضر در این خصوص، بیان‌گر کارایی برتر آرایش مهاربندهای بزرگ‌مقیاس در تعدیل مشخصه‌های پاسخ لرزه‌ای ساختارهای ترکیبی قاب محیطی است. پارامترهای پاسخ غیرخطی مدل‌های ۱ و ۲ (شکل ۴) نسبت به سازه‌های مطالعاتی ۳ و ۴ دارای مهاربندهای بزرگ‌مقیاس، تغییرات بیشتر و بزرگ‌تری دارند. چیدمان مهاربندهای بزرگ‌مقیاس برای دو سازه مطالعاتی ۳ و ۴ سبب کاهش بیش از ۳۰ درصدی در تغییر شکل جانبی، همراه با یک افت بزرگ در اندازه دررفت جانبی نسبت به سازه‌های با آرایش متمرکز پانل‌های مهاربندی می‌شود.

- با بررسی نمودارهای پارامترهای پاسخ سازه‌های مطالعاتی، ملاحظه می‌شود که روند تغییرات آنها متناسب با ماهیت فیزیکی رکوردهای اعمالی است. بیشینه پاسخ‌ها نیز تحت رکوردهای دارای بزرگ‌ترین مدت دوام و بیشترین دامنه جنبش نیرومند زمین حاصل شده‌اند. دیدگاه فوق برای

رکوردهای حاوی اثرات پر قدرت جهت‌پذیری پیش‌رونده، نمود مشخص‌تری دارد. در این خصوص می‌توان به نمودارهای پاسخ لرزه‌ای سازه‌های مطالعاتی تحت رکوردهای JFP، RRS، SCS از زلزله نورثریج ۱۹۹۴ کالیفرنیا و نیز رکورد BAM از زلزله بم ۲۰۰۳ در ایران اشاره نمود.

- نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که رفتار غیرخطی مهاربندها تحت رکوردهای حوزه نزدیک حاوی اثرات جهت‌پذیری، وارد مرحله آستانه فروریزش نشده و محدود به سطح عملکرد ایمنی جانی باقی مانده است. همچنین، مشخصات رفتار لرزه‌ای بسیاری از المان‌های ستون نیز در حوزه رفتار خطی باقی مانده است. دیدگاه فوق بر مبنای وجود رفتار غیرخطی با ماهیت هندسی تحت اثرات $P-\Delta$ برای المان‌های ستون، با نمود مشخص‌تری در عملکرد اسکلت‌های مقاوم دارای مهاربندهای بزرگ‌مقیاس ملاحظه شد. نکته دیگر آنکه طرح لرزه‌ای اسکلت‌های قاب محیطی مهاربندی شده، با رعایت دو معیار محدودیت جابه‌جایی نسبی طبقات و اصل ستون قوی-تیر ضعیف، دارای عملکرد قابل قبولی به‌ویژه در ساختگاه‌های نزدیک گسل می‌باشد. دانسته شده که کارایی لرزه‌ای پیکربندی دارای مهاربندهای بزرگ‌مقیاس به مراتب فراتر از آرایش متمرکز پانل‌های مقاوم است.

مراجع

1. Kalkan, E. and Kunnath, S.K. (2006) Effects of fling step and forward directivity on seismic response of buildings. *Earthquake Spectra*, **22**(2), 367-390.
2. Liu, T., Luan, Y., and Zhong, W. (2012) A numerical approach for modeling near-fault ground motion and its application in the 1994 Northridge earthquake. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **34**(1), 52-61.
3. Hoseini Vaez, S.R., Sharbatdar, M.K., Ghodrati Amiri, G., Naderpour, H., and Kheyroddin, A. (2013) Dominant pulse simulation of near fault ground motions. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, **12**, 267-278.

- investigation on seismic behavior of inverted V-braced frames. *International Journal of Steel Structures*, **18**(1), 189-198.
15. Fan, H., Li, Q.S., Tuan, A.Y., and Xu, L. (2009) Seismic analysis of the world's tallest building. *Journal of Constructional Steel Research*, **65**, 1206-1215.
 16. Lu, X., Lu, X., Guan, H., Zhang, W., and Ye, L. (2013) Earthquake-induced collapse simulation of a super-tall mega-braced frame-core tube building. *Journal of Constructional Steel Research*, **82**, 59-71.
 17. Hemmati, A. and Kheyroddin, A. (2013) Behavior of large scale bracing system in tall building subjected to earthquake load. *Journal of Civil Engineering and Management*, **19**, 206-216.
 18. Mazinani, I., Jumaat, M.Z., Ismail, Z., and Chao, O.Z. (2014) Comparison of shear lag in structural steel building with framed tube and braced tube, *Structural Engineering and Mechanics*, **49**(3), 297-309.
 19. Vafaei, D. and Eskandari, R. (2016) Seismic performance of steel mega braced frames equipped with shape-memory alloy braces under near-fault earthquakes. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, **25**, 3-21.
 20. Bastami, M. and Hajihasani, M. (2013) Input waves for seismic design of power substation equipment for near and far Iranian earthquake records. *Inter-national Journal of Civil Engineering*, **12**, 55-72.
 21. Zhai, C., Chang, Z., Li, S., Chen, Z.Q., and Xie, L. (2013) Quantitative identification of near-fault pulse-like ground motions based on energy. *Bulletin of the Seismological Society of America (BSSA)*, **103**(5), 2591-2603.
 22. Khaloo, A.R., Khosravi, H., and Hamidi Jamnani, H. (2015) Nonlinear interstory drift contours for idealized forward directivity pulses using "modified fish-bone" models. *Advances in Structural Engineering (SAGE Journals)*, **18**(5), 603-627.
 23. PEER Ground Motion Database, <http://peer.berkeley.edu>.
 24. Azhdarifar, M., Meshkat-Dini, A., and Moghadam, A.S. (2015) Assessment of seismic response of
 4. Yaghmaei-Sabegh, S. (2013) Wavelet-based analysis for pulse period of earthquake ground motions. *International Journal of Engineering-Transactions A: Basics*, **26**(10), 1135-1144.
 5. Trifunac, M.D. and Todorovska, M. (2013) A note on energy of strong ground motion during Northridge, California, earthquake of January 17, 1994. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **47**, 175-184.
 6. Trifunac, M.D. and Todorovska, M. (2013) A note on the power of strong ground motion during Northridge, California, earthquake of January 17, 1994. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **52**, 13-26.
 7. Mukhopadhyay, S. and Gupta, V.K. (2013) Directivity pulses in near-fault ground motions-II: estimation, extraction and modeling. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **50**, 38-52.
 8. Somerville, P.G., Smith, N.F., Graves, R.W., and Abrahamson, N.A. (1997) Modification of empirical ground motion attenuation to include amplitude and duration effects of rupture directivity. *Seismological Research*, **68**, 199-222.
 9. Somerville, P.G. (2003) Magnitude scaling of the near fault rupture directivity pulse, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, **137**(1), 201-212.
 10. Richards, P. and Uang, C.M. (2006) Testing protocol for short links in eccentrically braced frames. *Journal of Structural Engineering*, **132**, 1183-1191.
 11. Dubina, D., Stratan, A., and Dinu, F. (2008) Dual high-strength steel eccentrically braced frames with removable links, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **37**, 1703-1720.
 12. Bosco, M., Ghersi, A., Marino, E.M., and Rossi, P.P. (2013) Prediction of the seismic response of steel frames with concentric diagonal bracings. *The Open Construction and Building Technology Journal*, **7**, 118-128.
 13. Jay, S., Rou, W., Bulent, A., Bilge, D., and Eren, U. (2014) Seismic demand on brace-intersected beams in two-story X-braced frames. *Engineering Structures*, **76**, 295-312.
 14. Yeom, H.J. and Yoo, J.H. (2018) Analytical

33. Nazari, S., Keyvani, J., Meshkat-Dini, A., and Azhdarifar, M. (2017) Study on the seismic response of mid-rise bundled tube resistant systems under simulated closed-form near-field records. *Asian Journal of Civil Engineering (BHRC)*, **18**, 1-8.
34. Standard No. 2800 (2014) *Iranian Code of Practice for Seismic Resistant Design of Buildings* (4th Ed.).
35. The Iranian National Building Code (2014) (Design Loads for Buildings - Issue 6), Tehran, Iran.
36. The Iranian National Building Code (2014) (Steel Structures - Issue 10), Tehran, Iran.
37. Barati, F. (2015) Study on the effect of physical characteristics of near field earthquake records on response parameters of braced tube structured systems. M.Sc. Thesis, Kharazmi University (In Persian).
38. FEMA 356 (2000) *Pre-Standard and Commentary for the seismic Rehabilitation of Buildings*. Washington D.C. Federal Emergency Management Agency, USA.
39. FEMA P-695 (2009) *Quantification of Building Seismic Performance Factors*. Washington, D.C. Federal Emergency Management Agency, USA.
40. SAP2000 (CSI) (2010) *Integrated Software for Structural Analysis and Design*, Berkeley, California.
41. PERFORM3D (CSI) (2007) *Nonlinear Analysis and Performance Assessment for 3D-Structures*. Berkeley, California.
42. mid-rise steel buildings with structural configuration of framed tube skeletons. *7th International Conference on Seismology and Earthquake Engineering (SEE7)*, Tehran, Iran.
25. Durucan, C. and Durucan, A.R. (2016) Ap/Vp specific inelastic displacement ratio for the seismic response estimation of SDOF structures subjected to sequential near fault pulse type ground motion records. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering (Elsevier)*, **89**, 163-170.
26. Bradley, B.A., Pettinga, D., Baker, J.W., and Fraser, J. (2017) Guidance on the utilization of earthquake-induced ground motion simulations in engineering practice. *Earthquake Spectra (EERI)*, **33**(3), <https://doi.org/10.1193/120216EQS219EP>.
27. Puglia, R., Russo, E., Luzi, L., D'Amico, M., Felicetta, C., Pacor, F., and Lanzano, G. (2018) Strong-motion processing service: a tool to access and analyze earthquakes strong-motion waveforms, *Bulletin of Earthquake Engineering (Springer)*, **16**(7), 2641-2651, <https://doi.org/10.1007/s10518-017-0299-z>.
28. Mollaioli, F. and Decanini, L.D. (2006) Characterization of the dynamic response of structures to damaging pulse type near fault ground motion. *International Journal of Theoretical Applied Mechanics*, **41**, 23-46.
29. Malhotra, P.K. (1999) Response of buildings to near-field pulse-like ground motions. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **28**, 1309-1326.
30. Sehhati, R., Rodriguez-Marek, A., ElGawady, M., and Cofer, W.F. (2011) Effects of near-fault ground motions and equivalent pulses on multi-story structures. *Engineering Structures*, **33**(3), 767-779.
31. Mukhopadhyay, S. and Gupta, V.K. (2013) Directivity pulses in near-fault ground motions -I: Identification, extraction and modeling. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **50**, 1-15.
32. Burks, L.S. and Baker, J.W. (2016) A predictive model for fling-step in near-fault ground motions based on recordings and simulations, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **80**, 119-126.

واژه‌نامه

Near Fault Zone	۱- حوزه نزدیک گسل
Rupture Plate	۲- صفحه شکست
Rupture Directivity	۳- جهت پذیری شکست
Fling Step Movement	۴- حرکت پرتابی
Forward Directivity	۵- جهت پذیری پیش‌رونده
Backward Directivity	۶- جهت پذیری پس‌رونده
Neutral Directivity	۷- جهت پذیری خنثی
Strick Slip Fault	۸- گسل امتداد لغز

Dip Slip Faulting	۹- گسلش شیب لغز
Free Field Record	۱۰- رکورد میدان آزاد
Fourier Amplitude Spectra	۱۱- طیف دامنه فوریه
Tripartite Spectra	۱۲- طیف سه‌جانبه
Braced Tube Frame	۱۳- قاب محیطی مهاربندی شده
Large Scale Braces	۱۴- مهاربندهای بزرگ‌مقیاس

Evaluation of Seismic Response of Tall Buildings comprised of Braced Tube Skeleton with Contiguous Braced Panels Configuration Subjected to Nearfield Records

Farshad Barati¹, Marzie Heydari², Afshin Meshkat-Dini^{3*}, and Abdolreza Sarvghad-Moghadam⁴

1. M.Sc. Graduate, Kharazmi University, Faculty of Engineering, Tehran, Iran

2. M.Sc. Graduate, Kharazmi University, Faculty of Engineering, Tehran, Iran

3. Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Kharazmi University, Tehran, Iran,
*Corresponding Author, email: meshkat@khu.ac.ir

4. Associate Professor, Structural Engineering Research Center, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology (IIEES), Tehran, Iran

The braced tube structure is one of the most efficient lateral load resistant skeletal systems under seismic loads. This high-rise mega frame has desirable aspects in terms of seismic response. Also, this system increases the resistance potential of high-rise structures in comparison with three-dimensional steel rigid frames. The present study denotes the seismic response properties of four mega braced tube structural systems of 20-story with different bracing configurations, which are the same in plan and loading arrangements, subjected to strong near-field records. The two studied structures have skeletal configuration of centralized braced panels. Moreover, the two other studied models were designed based on mega braced tube system considered as the resistant structure. In order to assess dynamic response parameters of the studied structures, several nonlinear time history analyses were performed. The selected earthquake records contain a variety of wave-like characteristics such as long period pulses and high amplitude spikes in the ground velocity and acceleration time histories. The analytical evaluation of seismic response parameters indicates the desirable performance of mega braced tube structural systems under powerful near-fault records.

The aforementioned seismic performances were investigated in terms of maximum lateral displacement, inter-story drift as well as absolute acceleration, relative velocity of floors and total base shear along with the integrated formations of skeletal nonlinear hinges. It was obtained that the concentrated configuration of a limited number of aligned braced panels in high-rise framed skeleton is not relatively suitable. Also, dynamic response parameters of the 20-story models with the configuration of centralized braced panels are influenced more while being subjected to near-field ground motions in comparison to the mega braced tube systems. The application of centralized braced panels would lead to the more intensive variation in seismic response parameters. It should be noted that the application of single elements as well as concentric aligned braced panels cannot be effective in controlling the maximum lateral displacement and drift demands. The structural vulnerability assessment indicated that mega braced tube structures have better seismic performance than the other type of resistant skeletons under influencing of large coherent velocity pulses which displayed in the time history of strong earthquake records.

Keywords: Braced Tube Frame, Perimeter Resistant Skeleton, Large Scale Braces, Nonlinear Behavior, Near-Field Record, Velocity Pulse.