

چکیده

این پژوهش به بررسی روند تغییرات پاسخ لرزه‌ای اسکلت‌های ترکیبی قاب خمشی محیطی^۱ و مقایسه آن با سیستم پایه، بر اساس نتایج تحلیل‌های غیرخطی تحت مجموعه‌ای از رکوردهای نیرومند سه مؤلفه‌ای حوزه نزدیک می‌پردازد. ساختارهای ترکیبی با تعیبه پیکربندی‌های چند طبقه‌ای المان‌های زیر بزرگ‌مقیاس در اسکلت قاب محیطی خمشی حاصل می‌گردند. المان‌های زیر بزرگ‌مقیاس، تنها در پانل‌های صلب سازه قاب محیطی تعیبه شده و دارای اتصال پیوسته با پانل زون‌های اسکلت مقاوم می‌باشند. پروسه مطالعاتی حاضر شامل بررسی چگونگی تغییرات پارامترهای پاسخ سه اسکلت مقاوم ۳۰ طبقه با و بدون پیکربندی المان‌های زیر بزرگ‌مقیاس است. طراحی سازه‌های مطالعاتی بر اساس ضوابط مقررات ملی ساختمان و همچنین ویرایش چهارم آیین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله (استاندارد ۲۸۰۰) انجام شده است. مدل‌سازی رفتار غیرخطی اعضا و تعریف مفاصل پلاستیک بر اساس ضوابط FEMA356 بوده و مجموعه تحلیل‌های غیرخطی تاریخچه زمانی با استفاده از نرم‌افزار SAP 2000 صورت گرفته است. کاربرد المان‌های زیر بزرگ‌مقیاس در سیستم قاب محیطی خمشی، سبب پخش به نسبت یکنواخت تر نیروی محوری، برش، لنگر خمشی و پیچشی دینامیکی در ستون‌های محیطی پلان و کاهش دامنه دوران غیرخطی اتصالات می‌شود. همچنین، ارزیابی پارامترهای پاسخ دینامیکی این سازه‌ها نشان‌دهنده بهره‌وری بالاتر سیستم سازه ترکیبی فوق بوده و کاهش نسبی پارامترهای پاسخ لرزه‌ای را در پی دارد.

واژگان کلیدی: ساختمان بلند، قاب محیطی خمشی، المان زیر بزرگ‌مقیاس، حوزه نزدیک گسل، پانل زون.

مطالعه روند تغییرات پاسخ لرزه‌ای اسکلت‌های ترکیبی قاب محیطی خمشی بلندمرتبه در ساختگاه‌های نزدیک گسل

محبوبه ابوطالبی

دانشجوی دکتری، مهندسی عمران گرایش سازه، دانشگاه خوارزمی، تهران

افشین مشکوه‌الدینی (نویسنده مسئول)

استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه خوارزمی، تهران

meshkat@khu.ac.ir

جعفر کیوانی قمصری

دانشیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه خوارزمی، تهران

۱- مقدمه

سرعت و تغییر مکان با پر یوندهای به نسبت بالا، از مشخصه‌های اصلی یک رکورد حوزه نزدیک می‌باشند [۲]. نکته دیگر آنکه به علت مشابهت و نزدیکی محتوای فرکانسی رکوردهای حوزه نزدیک با محدوده فرکانس‌های مودال ساختمان‌های بلندمرتبه، قابلیت وقوع وضعیت رزونانس و ایجاد خرابی‌های گسترده در اسکلت مقاوم ساختمان‌های مذکور وجود دارد. نمونه‌های بارز این خرابی‌ها در زلزله‌های ۱۹۹۴ نورث‌ریج کالیفرنیا، ۱۹۹۵ کوبه ژاپن و ۱۹۹۹ از میت ترکیه مشاهده شده است.

تعیین محدوده مناسب برای دامنه تغییرات نیروهای اعضا، نیاز تغییر شکل و همچنین شناخت ضعف‌های اصلی سیستم مقاوم می‌تواند

جنبش‌های زمین در حوزه نزدیک گسل نسبت به جنبش‌های حوزه دور، پارامترهای بیشتری را به سازه تحمیل می‌نمایند. انجام مطالعات کمی بر روی تأثیر جنبش‌های نیرومند حوزه نزدیک بر روی انواع سازه‌ها، به خصوص سازه‌های بلندمرتبه از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است [۱]. میزان خرابی ایجاد شده در سازه در اثر وقوع زمین‌لرزه به عوامل متعددی از قبیل مشخصات اسکلت مقاوم، خصوصیات رکورد زلزله، نوع خاک ساختگاه، نمود اثرات جهت‌داری و فرایند گسیختگی در مکانیسم گسل بستگی دارد. همچنین، محتوای فرکانسی و مدت‌زمان جنبش نیرومند زمین نیز از دیگر عوامل مهم در این موضوع به شمار می‌روند. پالس‌های پیوسته

سازمان این پژوهش شامل بررسی و ارزیابی پارامترهای نیاز لرزه‌ای ساختمان‌های بلند با سیستم قاب خمشی محیطی همراه با المان‌های زیر بزرگ مقیاس در ساختمان‌های نزدیک گسل می‌باشد. هدف مطالعاتی نیز بر پایه ارزیابی پخش یکنواخت تر پارامترهای نیاز تغییر مکان نسبی جانبی^۳، سرعت نسبی و شتاب مطلق طبقات، نیروی محوری، برآیند برش، لنگر خمشی و پیچشی ستون‌ها و نیز بررسی روند تعدیل یافته ایجاد دوران غیرخطی پانل زون‌ها در حوزه‌های اتصال، استوار است. سازه‌های مطالعاتی در سه مدل ۳۰ طبقه با و بدون پیکربندی المان‌های زیر انتخاب و طراحی شدند. طراحی سازه‌های مطالعاتی بر اساس ضوابط مندرج در مباحث ششم و دهم مقررات ملی ساختمان [۱۱-۱۲] و همچنین آیین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله (استاندارد ۲۸۰۰- ویرایش چهارم) [۱۳] انجام شده است. مدل‌سازی رفتار غیرخطی اعضا و تعریف مفاصل پلاستیک بر اساس FEMA356 [۱۴] بوده و مجموعه تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی با استفاده از نرم‌افزار SAP 2000 [۱۵] انجام شده‌اند.

۲- پیاده‌سازی تحلیل غیرخطی

۲-۱- توصیف مدل‌های مطالعاتی

هر سه مدل مورد مطالعه در این پژوهش، سازه‌های قاب محیطی ۳۰ طبقه با ارتفاع ۱۰۵ متر دارای پلان متقارن و شش دهانه ۶ متری در دو جهت X و Y پلان می‌باشند (شکل ۱). مدل اول فاقد پیکربندی المان‌های زیر بوده، مدل‌های دوم و سوم دارای آرایش زیرها به ترتیب با اتصال با یک و دو ستون است. المان‌های زیر بزرگ مقیاس در مدل‌های شماره دو و سه بر روی چهار طبقه ابتدایی سازه تعبیه گردیده‌اند. همچنین آرایش نمای این مدل‌های مطالعاتی به گونه‌ای انتخاب شده که در قاب‌های صلب خارجی حداقل دو دهانه آزاد جهت استفاده به عنوان ورودی وجود داشته باشد. اتصال المان‌های زیر به محل اتصال تیر به ستون به صورت صلب تعریف شده است. وجود این المان‌ها باعث افزایش سختی سازه و به دنبال آن کاهش پیوند سازه می‌شود. ارتفاع هر طبقه برابر با ۳/۵ متر، سیستم سازه‌ای سقف‌ها دال بتی دو طرفه با ضخامت ۱۵ سانتی‌متر، بار مرده برای تمامی طبقات، بار

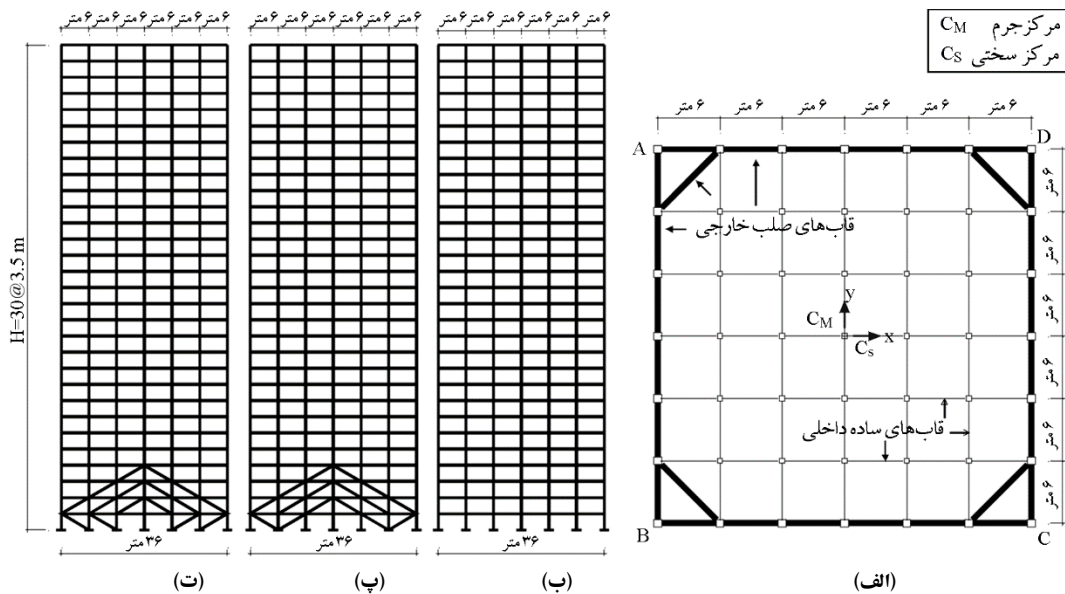
ویژگی‌های رفتار سازه‌ای را به‌طور قابل توجهی تحت تأثیر قرار دهد [۳]. برای ارزیابی دقیق نیاز لرزه‌ای، تحلیل غیرخطی ابزاری مناسب در تعیین و تشخیص روند ایجاد سطوح عملکردی ایمنی جانی و آستانه فروریزش در المان‌های اسکلت مقاوم می‌باشد. چالش موجود در این ابزار، توسعه مدل مؤلفه‌ها و روندهای تحلیلی است، به گونه‌ای که درجه مشخصی از اطمینان را فراهم سازد [۴]. نکته دیگر آنکه در موضوع طراحی بر اساس عملکرد، تحلیل دینامیکی غیرخطی به‌عنوان یک روش کارآمد جهت کمی‌سازی پاسخ لرزه‌ای سازه به کار برده می‌شود [۵].

سیستم قاب خمشی محیطی، یکی از اسکلت‌های سازه‌ای مورد استفاده در ساختمان‌های بلند می‌باشد. این سیستم، شکل تکامل یافته سازه‌های قاب صلب معمولی است. در عملکرد این سیستم، مؤلفه سختی مؤثر تیرها و ستون‌ها به‌طور برجسته‌ای به وسیله کاهش ابعاد دهانه‌های اسکلت مقاوم سازه و نیز افزایش عمق عضو، فزونی می‌یابد [۶]. عملکرد این سازه به گونه‌ای است که بارهای جانبی توسط دیافراگم‌های صلب کف (تاوه‌ها) به قاب‌های خمشی پیرامونی پلان منتقل شده و بارهای ثقلی توسط قاب‌های پیرامونی و داخلی تحمل می‌شوند [۷]. نکته دیگر آنکه وجود اثرات لنگی برش^۲ در عملکرد قاب خمشی محیطی، استفاده از حداکثر ظرفیت سختی و مقاومت سازه را محدود می‌سازد [۸]. معیارسازی طرح مدل مطالعاتی در این تحقیق، تعبیه پیکربندی المان‌های زیر بزرگ مقیاس است که می‌تواند باعث بهبود نسبی عملکرد سازه مذکور تحت اثر بارگذاری‌های دینامیکی شدید ناشی از زلزله‌های بزرگ شود.

پتانسیل فروریزش یک سازه متناسب با پارامترهای پاسخ لرزه‌ای بوده و مرتبط با جابه‌جایی جانبی تراز بام، جابه‌جایی نسبی طبقات و نیز تغییر شکل‌های موضعی از قبیل چرخش مفاصل پلاستیک می‌باشد [۹]. ارزیابی چنین پارامترهایی در نزدیکی وضعیت فروریزش اسکلت مقاوم به عوامل زیادی همانند فرض‌های ساخت مدل سازه، نوع المان‌های سازه‌ای و نیز قابلیت‌های عددی روش تحلیل غیرخطی بستگی دارد. همچنین، پتانسیل فروریزش سازه به‌طور مستقیم در ارتباط با شدت زمین‌لرزه‌ای تعریف می‌گردد که می‌تواند باعث ایجاد ناپایداری دینامیکی اسکلت مقاوم در اثر زوال پارامترهای سختی و مقاومت، همراه با اثرات تشدید یافته $P - \Delta$ شود [۱۰].

اساس استاندارد ۲۸۰۰ (ویرایش ۴) محاسبه گردید (جدول ۱). سازه‌های مطالعاتی بر اساس آیین‌نامه مذکور و مبحث دهم مقررات ملی ساختمان طراحی گردیدند. همچنین برقراری دو معیار محدودیت جابه‌جایی نسبی طبقات و اصل ستون قوی و تیر ضعیف نیز بررسی و تأیید گردید. مجموعه مقاطع طراحی شده برای سازه‌های مطالعاتی در شکل (۲) و جدول (۲) نشان داده شده است.

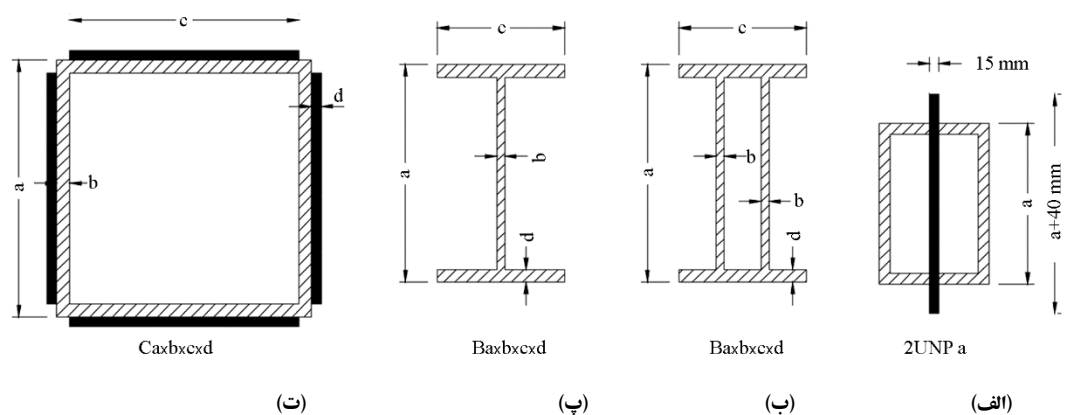
زنده برای بام و سایر طبقات بر طبق مبحث ششم مقررات ملی ساختمان به ترتیب برابر با ۰/۵، ۰/۱۵ و ۰/۲۰ تن بر مترمربع در نظر گرفته شده است. سازه مورد نظر در تهران با خطر لرزه‌خیزی خیلی زیاد بر روی خاک نوع II فرض شده و دارای شکل پذیری متوسط می‌باشد. جنس مقاطع از نوع فولاد ST37 با تنش تسلیم ۲۴۰۰ کیلوگرم بر سانتی مترمربع می‌باشد. مقادیر ضریب زلزله (ضریب برش پایه) بر



شکل (۱): سازه‌های مطالعاتی: (الف) پلان، (ب) نمای سازه قاب خمشی محیطی پایه (مدل ۱)، (پ) نمای سازه قاب خمشی محیطی دارای المان‌های زیر بزرگ مقیاس با اتصال به یک ستون (مدل ۲)، (ت) نمای سازه قاب خمشی محیطی دارای المان‌های زیر بزرگ مقیاس با اتصال به دو ستون (مدل ۳).

جدول (۱): ضریب زلزله و دوره تناوب سه مود اول مدل‌های مطالعاتی (شکل ۱).

ضریب زلزله	T_1 (s) مود اول انتقالی راستای x و y	T_2 (s) مود اول پیچشی حول محور Z	T_3 (s) مود دوم انتقالی راستای x و y
مدل ۱	۰/۰۴۲	۳/۹۴	۱/۸۹
مدل‌های ۲ و ۳	۰/۰۴۲	۳/۷۲	۱/۳۲



شکل (۲): شکل هندسی مقاطع طراحی شده: (الف) زیپرها؛ (ب) تیرهای با اتصال خمشی؛ (پ) تیرهای با اتصال مفصلی؛ (ت) ستون‌ها.

جدول (۲): مقاطع طراحی شده برای المان‌های سازه‌ای شامل ستون‌ها، تیرها و زیرها بر اساس شکل‌های ۱ و ۲ (ابعاد به mm)؛ پانل‌های محیطی اسکلت مقاوم دارای اتصالات خمشی بوده و سایر پانل‌های داخلی نیز با اتصالات ساده مفصلی طراحی شده‌اند.

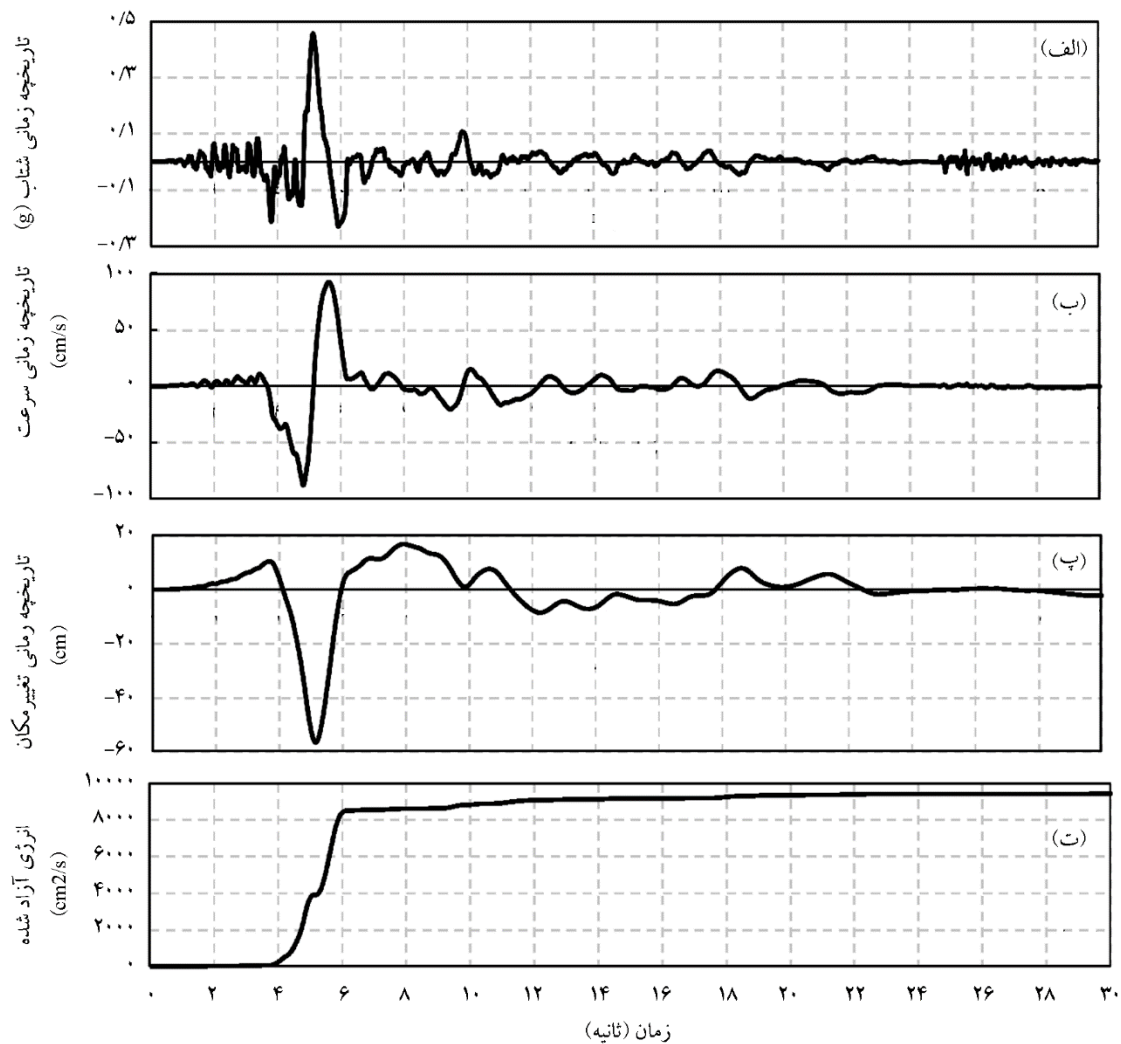
مقطع زیرها	مقطع تیرها		مقطع ستون‌ها		گروه طبقات
	پانل مفصلی داخلی	پانل خمشی محیطی	پانل مفصلی داخلی	پانل خمشی محیطی	
2UNP300 (طبقات ۱ تا ۴)	B350x20x150x10	B500x20x500x25	C550x30	C750x30x650x25	۱-۵
	B350x20x150x10	B500x20x500x25	C550x30	C700x30	۶-۱۰
	B350x20x150x10	B500x20x500x25	C450x25	C650x30	۱۱-۱۵
	B350x20x150x10	B500x20x450x25	C400x25	C600x30	۱۶-۲۰
	B350x20x150x10	B450x20x400x25	C350x20	C550x25	۲۱-۲۵
	B350x20x150x10	B350x15x400x20	C300x10	C500x15	۲۶-۳۰

۲-۲- مشخصه‌های اصلی زلزله‌های حوزه نزدیک

مشخصه جنبش‌های نیرومند زمین در نزدیکی صفحه گسیختگی گسل، وجود پالس‌های پرپود بلند و پر دامنه است و این عوامل می‌تواند سبب ایجاد خسارت‌های سازه‌ای شدید گردد [۱۹]. این مورد به ویژه برای رکوردهای دارای اثرات جهت‌داری پیش‌رونده^۴ صادق است. وضعیت مذکور زمانی اتفاق می‌افتد که گسیختگی به سمت ساختگاه با سرعتی نزدیک به سرعت موج برشی انتشار یابد و در نتیجه، بیشتر انرژی زلزله در یک بازه زمانی بسیار کوتاه و به‌طور مشخص‌تر در بخش ابتدایی تاریخچه رکورد آزاد می‌گردد [۲۰-۲۱]. الگوی انتشار امواج ناشی از تغییر شکل‌های برشی در نواحی نزدیک گسل سبب می‌شود که اندازه و دامنه عددی مشخصات طیفی در راستای عمود بر صفحه گسیختگی گسل، به مراتب بیشتر از راستای موازی آن باشد [۲۲-۲۳].

جنبش‌های نیرومند حوزه نزدیک با پالس‌های سرعت و جابه‌جایی شناخته می‌شوند. این پالس‌ها در بازه زمانی بسیار کوتاه رخ می‌دهند. پرپود مشخصه این چنین پالس‌هایی در محدوده بین ۲ تا ۶ ثانیه قرار دارد. بازه مذکور متناظر با زمان تناوب طبیعی مربوط به ساختمان‌های ۱۵ تا ۵۰ طبقه می‌باشد. این پالس‌ها همانند یک موج در ارتفاع سازه منتشر می‌گردند. همچنین پالس سرعت، منجر به ایجاد و انتشار موج لرزه‌ای برشی و در نتیجه افزایش و گسترش شدید کرنش‌های عضو، در اسکلت مقاوم سازه می‌شود. امواج ایجاد شده نیز دارای پالس رفت و برگشت می‌باشند. جبهه پیش‌رونده و فصل مشترک این پالس‌ها در امتداد ارتفاع سازه به بالا و پایین حرکت می‌کند و باعث تسلیم موضعی المان‌ها و تشکیل مفصل پلاستیک در اسکلت مقاوم می‌شود [۱۶-۱۷]. وجود چنین حوزه‌های غیرخطی می‌تواند سبب ایجاد اثرات شدید $P - \Delta$ گردیده و پایداری سازه را تحت تأثیر قرار دهد. همچنین، با استفاده از فرض‌های ساده مانند سازه برشی یکنواخت و پالس‌های با ساختارهای فرم بسته، امکان پیش‌بینی محل و زمان تشکیل حوزه‌های غیرخطی در اسکلت مقاوم فراهم می‌گردد. این راهکار جهت سازه‌های واقعی نامنظم و تحت رکوردهای سه مؤلفه‌ای نیرومند، کارساز نخواهد بود. بدین لحاظ، ایجاد مدل‌های ریاضی سه‌بعدی متناظر با سازه واقعی، امری ضروری است [۱۸].

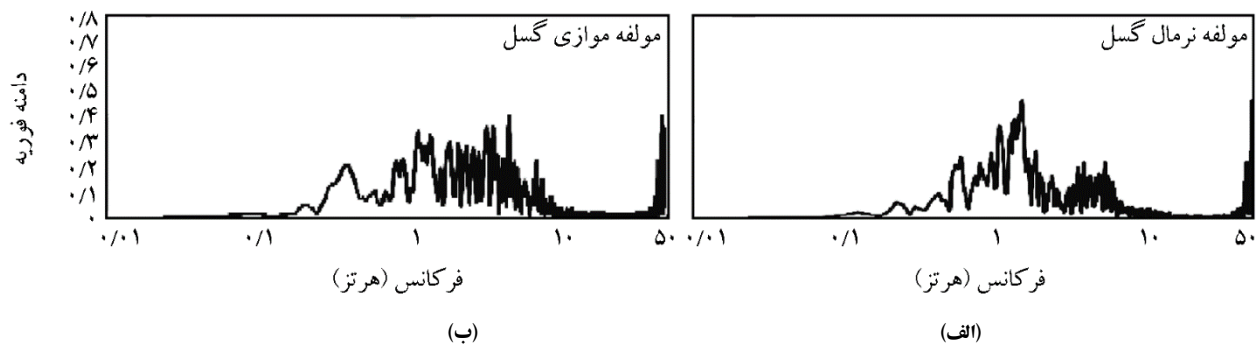
همچنین، از جمله دیگر پارامترهای مهم رکوردهای حوزه نزدیک عبارت از حداکثر شتاب زمین، محتوای فرکانسی و مدت دوام حرکات قوی زمین است [۲۴]. رکوردهای حوزه نزدیک، دارای دامنه شتاب بالاتر و محتوای فرکانسی بسیار پرنرزی نسبت به جنبش‌های حوزه دور می‌باشند [۲۵-۲۶]. در نگاهت رکوردهایی که تحت اثر فرآیند جهت‌داری پیش‌رونده قرار دارند، پالس‌های پرپود بلند با دامنه بزرگ ظاهر می‌گردد و این پالس‌ها در بیشتر موارد در بازه زمانی ابتدایی رکورد دیده می‌شوند (شکل ۳).



شکل (۳): تاریخچه زمانی مؤلفه TR رکورد حوزه نزدیک WPI: (الف) تاریخچه زمانی شتاب؛ (ب) تاریخچه زمانی سرعت؛ (پ) تاریخچه زمانی تغییر مکان؛ (ت) نمودار تجمعی آزاد شدن انرژی زمین‌لرزه.

طیف فوریه نگاهت چنین رکوردهایی دارای مقدار حداکثر دامنه طیفی در یک محدوده فرکانسی به نسبت کوچک، به ویژه در یک یا چند پرپود خاص است (شکل ۴). حاصل ضرب محور عمودی در شتاب ثقل، بیان‌گر مؤلفه‌های از جنس سرعت به‌ازای هر فرکانس می‌باشد. در صورت قرارگیری فرکانس مودهای ارتعاشی پایین‌تر سازه در این ناحیه از طیف فوریه، اثرات تشدید با دامنه بزرگ رخ خواهد داد. اثر این موضوع در سازه‌های با پرپود بلند بسیار قابل توجه است. همچنین پدیدار شدن پالس‌های سرعت، نشانگر آزاد شدن یک انرژی جنبشی بسیار بزرگ در مدت زمانی کوتاه، ناشی از شکست گسل می‌باشد (شکل ۳).

ظهور پالس‌های بزرگ و پر دامنه در تاریخچه رکورد زلزله، سبب تأثیرپذیری پاسخ سازه از حالت مود گونه^۵ به موج گونه^۶ می‌شود. اندرکنش پیوسته و ترکیبی مودهای ارتعاشی انتقالی و پیچشی، همراه با اثرات تقویت شده مودهای بالاتر (متناظر با باند فرکانس‌های بالا) رخ خواهد داد. نمود اثرات این روند به صورت انتشار نیرومند امواج زلزله در اسکلت مقاوم سازه است [۲۷]. پالس مذکور می‌تواند در تاریخچه زمانی شتاب، سرعت و تغییر مکان زمین ظاهر گردد (شکل ۳). نتیجه بارز چنین روندی، پدیدار شدن و گسترش سریع مفاصل غیرخطی در سیستم باربر جانبی سازه تحت ارتعاشات با دامنه بزرگ است [۲۸].



شکل (۴): طیف فوریه متناظر با مؤلفه‌های افقی رکورد حوزه نزدیک SPV از زلزله نورث ریج ۱۹۹۴: (الف) مؤلفه TR در راستای عمود بر صفحه شکست گسل؛ (ب) مؤلفه LN در راستای موازی با صفحه شکست گسل (دیمانسیون سرعت برای محور عمودی از حاصل ضرب شتاب ثقل g در اعداد متناظر حاصل می‌شود).

و Saticoy (STC) از زلزله ۱۹۹۴ نورث ریج در کالیفرنیا جنوبی و همچنین رکورد Erzincan (ERZ) ترکیه از نوع حوزه نزدیک می‌باشند. رکورد El Centro 1940 (ELC) نیز به‌عنوان معیار حوزه دور انتخاب شده است. پارامترهای فیزیکی این رکوردها در جدول (۳) آورده شده و تاریخچه زمانی شتاب و سرعت هر سه مؤلفه نیز در شکل (۵) مشهود است.

با بررسی تاریخچه زمانی‌های سرعت شکل (۵) می‌توان دریافت که رکورد حوزه دور ELC فاقد هرگونه پالس است. رکورد WPI دارای بزرگ‌ترین پالس مشخص در تاریخچه زمانی سرعت متناظر با مؤلفه شمال (مؤلفه TR) و با مقدار بیشینه برابر با ۹۳ سانتی‌متر بر ثانیه می‌باشد. رکورد نیرومند ERZ نیز دارای بیشینه سرعت زمین برابر با مقدار ۸۴ سانتی‌متر است. تاریخچه زمانی سرعت زمین برای دو مؤلفه LN (موازی صفحه عمومی شکست گسل) و TR رکوردهای STC و SPV نیز دارای مجموعه‌ای از ساختارهای پیوسته و کم‌دامنه موجی شکل می‌باشد. یک پالس کوچک و نه‌چندان نیرومند در بازه زمانی ۳ ثانیه تا ۵ ثانیه تاریخچه زمانی سرعت مؤلفه TR رکورد SPV وجود دارد. دو پالس کوچک و به نسبت کم‌دامنه نیز در دو محدوده زمانی ۳ ثانیه تا ۴/۵ ثانیه و همچنین ۶ ثانیه تا ۹ ثانیه از تاریخچه مؤلفه LN ملاحظه می‌شوند. تاریخچه زمانی شتاب رکورد SPV دارای حداکثر شتاب زمین، PGA برابر با ۰/۹۳g می‌باشد.

نکته دیگر آنکه به دلیل اعمال نیروهای دینامیکی شدید ناشی از یک رکورد نیرومند زلزله به‌صورت ضربه، اسکلت مقاوم سازه رفتار تردتری را از خود نشان می‌دهد. بنابراین مناسب است که برای جلوگیری از وقوع شکست ترد، نگرش دقیق‌تری بر پارامتر شکل‌پذیری سازه اعمال گردد.

۲-۳- انتخاب و مقیاس‌سازی رکوردها

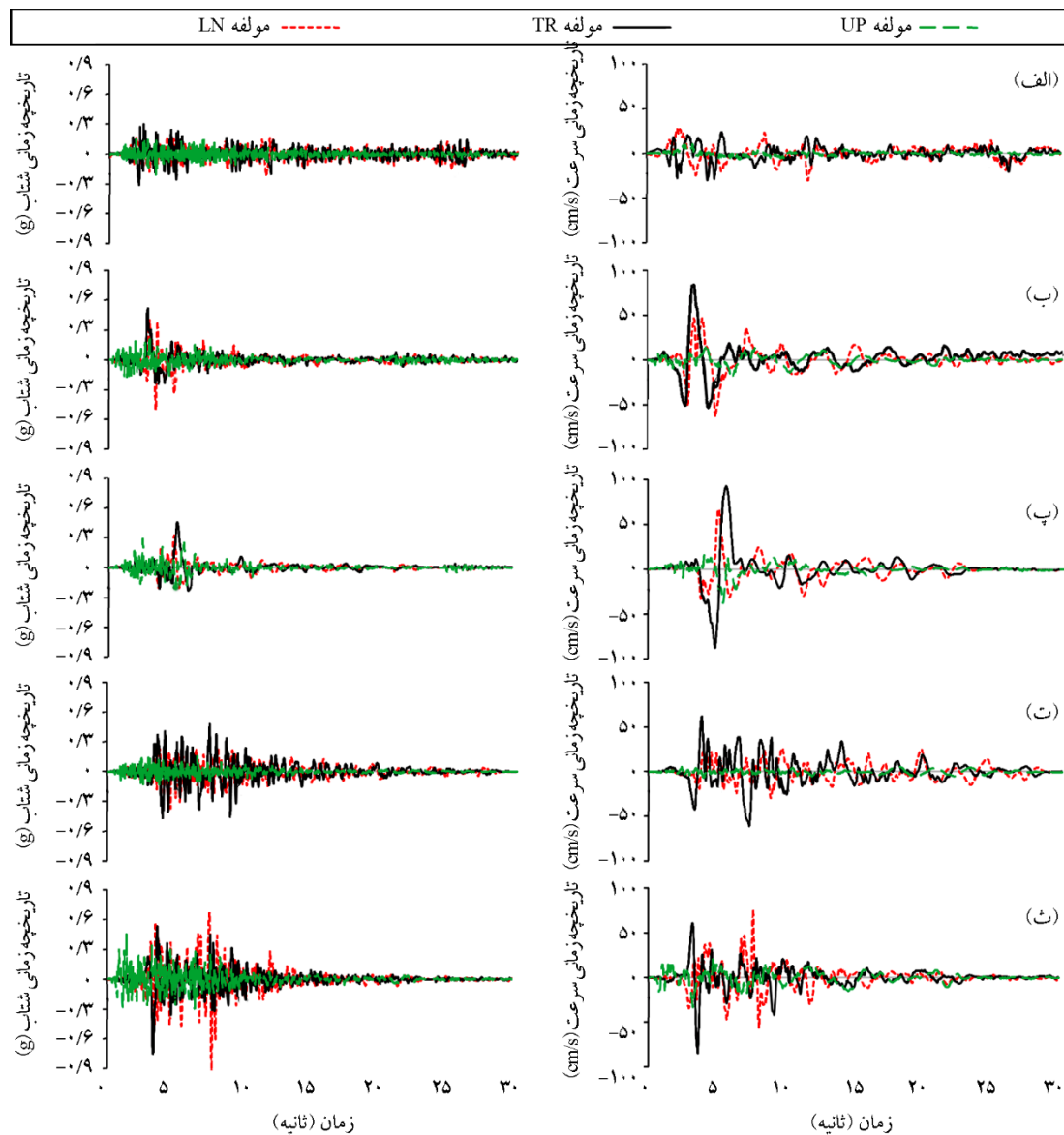
جهت انجام ارزیابی کارآمد بر روی روند طراحی بر اساس عملکرد؛ علاوه بر مدل‌سازی دقیق المان‌های سازه، انتخاب منطقی رکوردهای زلزله نیز ضروری به‌شمار می‌رود. روش درست انتخاب و مقیاس‌سازی شتاب‌نگاشت‌های زلزله نقش مهمی در نتایج تحلیل‌های غیرخطی دینامیکی داشته و می‌تواند منجر به کاهش قابل‌توجه پراکندگی در پارامترهای پاسخ سازه شود. وجود پالس‌های پرانرژی و بلندمدت در تاریخچه زمانی مؤلفه‌های یک رکورد نیرومند حوزه نزدیک می‌تواند پارامترهای پاسخ لرزه‌ای غیرخطی سازه را به‌شدت تحت تأثیر قرار دهد [۲۹-۳۱]. رکوردهای زلزله در این پژوهش بر اساس حضور اثرات نیرومند جهت‌داری به همراه پالس‌های پر دامنه و بلندمدت در تاریخچه زمانی سرعت زمین و نیز انطباق نوع خاک ساختگاه انتخاب شده‌اند. چهار رکورد سه مؤلفه‌ای انتخابی در این پژوهش عبارتند از Sepulveda (SPV)، Newhall W.Pico (WPI)

جدول (۳): مشخصات فیزیکی رکوردهای انتخابی.

بزرگای M _w	حداکثر جابه‌جایی زمین PGD (cm)	حداکثر سرعت زمین PGV (cm/s)	حداکثر شتاب زمین PGA (g)	رکوردهای زلزله
۶/۷	۱۶/۱	۶۷/۴	۰/۳۲۵	مؤلفه موازی صفحه شکست گسل
	۵۶/۶	۹۲/۸	۰/۴۵۵	مؤلفه عمود بر صفحه شکست گسل
	۱۳/۳	۳۷/۲	۰/۲۹۰	مؤلفه قائم
۶/۷	۸/۴۵	۲۸/۸۵	۰/۳۶۸	مؤلفه موازی صفحه شکست گسل
	۲۲/۷	۶۱/۵۹	۰/۴۷۷	مؤلفه عمود بر صفحه شکست گسل
	۳/۳۲	۶/۲۶	۰/۱۵۳	مؤلفه قائم
۶/۷	۱۵/۱	۷۵/۶۹	۰/۹۳۹	مؤلفه موازی صفحه شکست گسل
	۱۸/۷	۸۴/۸۳	۰/۷۵۲	مؤلفه عمود بر صفحه شکست گسل
	۹/۳۰	۳۳/۰۵	۰/۴۶۷	مؤلفه قائم
۶/۷	۲۳/۹	۶۴/۴۷	۰/۴۹۶	مؤلفه موازی صفحه شکست گسل
	۲۷/۱۵	۸۳/۹۵	۰/۵۱۵	مؤلفه عمود بر صفحه شکست گسل
	۷/۶۷	۱۸/۱۶	۰/۲۴۸	مؤلفه قائم
۷/۰	۲۳/۹	۳۰/۲	۰/۲۱۵	مؤلفه موازی صفحه شکست گسل
	۱۳/۳	۲۹/۸	۰/۳۱۳	مؤلفه عمود بر صفحه شکست گسل
	۹/۱۶	۱۰/۷	۰/۲۰۵	مؤلفه قائم

با توجه به محدودیت در منابع ثبت شده حاصل از زلزله‌های بزرگ، نیاز به پروسه مقیاس‌سازی بر اساس هم‌پایه‌سازی جنبش‌های نیرومند زمین در زلزله‌های مختلف با پهنه‌بندی خطر مورد نظر در حوزه ساختگاه، امری اجتناب‌ناپذیر است [۳۲-۳۳]. در این پژوهش، ضرایب مقیاس برای هر یک از رکوردهای انتخابی بر اساس ویرایش چهارم استاندارد ۲۸۰۰ [۱۳] به‌طور مجزا محاسبه شد و سپس با اعمال رکوردهای ضریب‌دار پارامترهای پاسخ لرزه‌ای سازه‌ها، با استفاده از تحلیل‌های غیرخطی تاریخچه زمانی به دست آمد. بر طبق این آیین‌نامه، هر شتاب‌نگاشت به حداکثر مقدار خود مقیاس شده و طیف پاسخ برای هر شتاب‌نگاشت با منظور کردن نسبت میرایی ۵ درصد تعیین گردید. طیف پاسخ دو مؤلفه هر شتاب‌نگاشت با روش جذر مجموع مربعات^۷ با یکدیگر ترکیب شدند، سپس هر شتاب‌نگاشت به گونه‌ای مقیاس شد که در محدوده ۰/۲T تا ۱/۵T مقدار طیف جذر مجموع مربعات از ۱/۳ مقدار طیف طرح استاندارد کمتر نشود. پارامتر T پررود مود اول ارتعاشی سازه‌های مطالعاتی می‌باشد.

مؤلفه قائم (مؤلفه UP) رکوردهای شکل (۵) نیز به مراتب ضعیف‌تر از دو مؤلفه LN و TR است. ساختار لرزه‌شناسی و مشخصات طیفی مؤلفه قائم (مؤلفه UP) یک رکورد حوزه نزدیک، بستگی مستقیم به نوع گسل و شاخص انرژی متناظر با محدوده فرکانس‌های بالا (بازه طیفی بیش از ۲۰ هرتز) دارد. مؤلفه قائم رکوردهای نیرومند زلزله حاصل از ارتعاشات حوزه گسیختگی گسل‌های نرمال؛ دارای پتانسیل بالای آزادسازی انرژی جنبشی است. مؤلفه UP مربوط به رکورد SPV از زلزله نورتریج ۱۹۹۴ دارای یک مجموعه اسپایک‌های به نسبت دامنه بلند و با گام زمانی بسیار کوچک‌تر از ۰/۲۵ ثانیه است. شاخص عددی یا همان دامنه ارتفاعی اسپایک‌های کوچک موجود در تاریخچه زمانی شتاب مؤلفه UP رکوردهای حوزه نزدیک STC ، ERZ و همچنین رکورد حوزه دور ELC، بسیار پایین و کمتر از ۰/۱۸g است. تنها یک ساختار موجی شکل کوچک با گام زمانی حدود ۰/۱۵ ثانیه، همراه با گروه اسپایک‌های ضعیف شتاب در تاریخچه زمانی مؤلفه عمودی رکورد حوزه نزدیک WPI از زلزله نورتریج ۱۹۹۴ ملاحظه می‌شود.



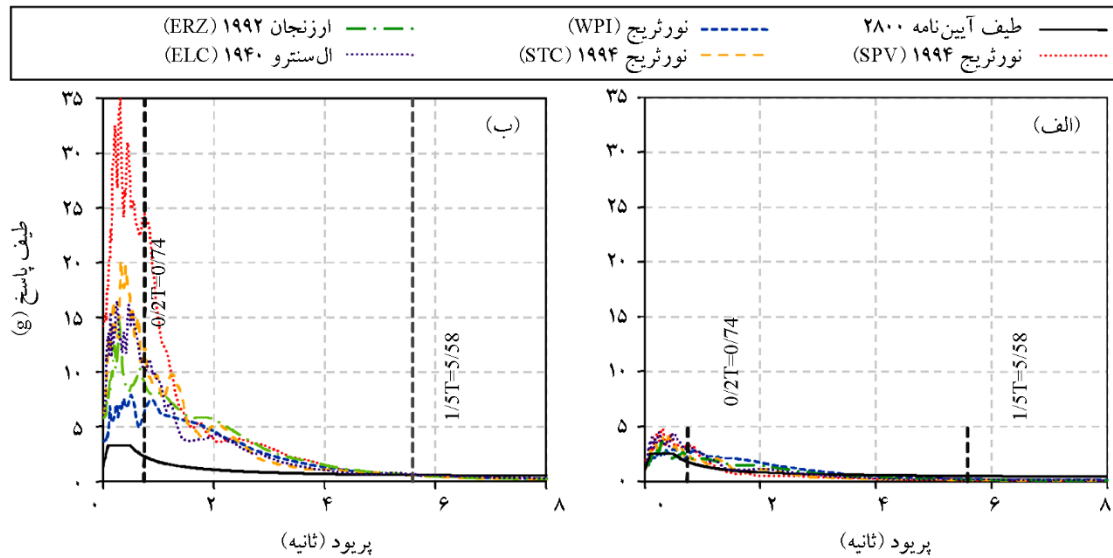
شکل (۵): تاریخچه زمانی شتاب و سرعت متناظر با رکوردهای سه مؤلفه‌ای: (الف) ELC از زلزله ال سترو ۱۹۴۰؛ (ب) ERZ از زلزله ارزنجان ۱۹۹۲ توکیه؛ (پ) WPI از زلزله نورث ریج ۱۹۹۴؛ (ت) STC از زلزله نورث ریج ۱۹۹۴؛ (ث) SPV از زلزله نورث ریج ۱۹۹۴.

بیشتری پیدا می‌کند. همچنین، تغییرات مؤلفه‌های محور عمودی در طیف پاسخ رکوردهای حوزه نزدیک حاوی پالس بزرگ سرعت در مقایسه با رکوردهای حوزه دور شدیدتر است (شکل ۶).

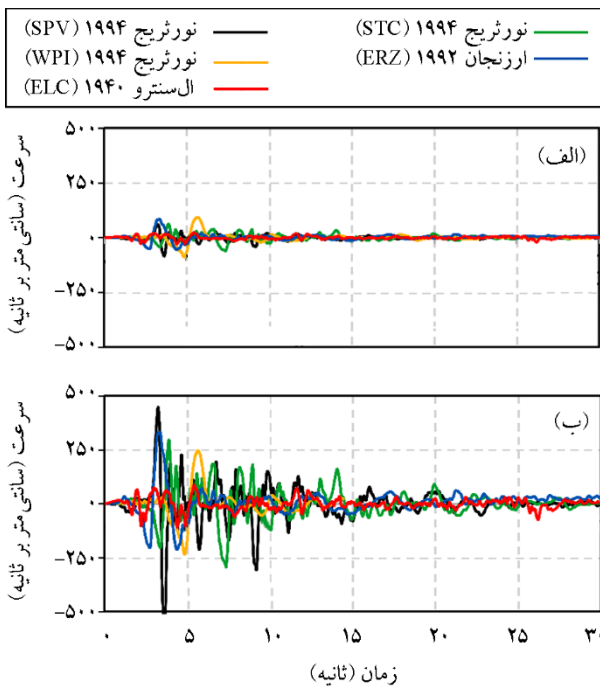
جدول (۴): ضرایب مقیاس محاسبه شده بر اساس استاندارد ۲۸۰۰.

ELC	ERZ	SPV	STC	WPI	
۳/۶۷۲	۴/۴۴۵	۸/۰۲۲	۵/۷۵۳	۲/۸۶۲	مدل ۱
۳/۶۷۲	۳/۹۵۶	۷/۳۵۸	۴/۷۹۵	۲/۶۶۴	مدل‌های ۲ و ۳

ضرایب مقیاس محاسبه شده در جدول (۴) آورده شده‌اند. شکل (۶) نیز حاوی طیف‌های طرح استاندارد ۲۸۰۰ و طیف جذر مجموع مربعات تمامی رکوردها در دو حالت طبیعی و مقیاس شده می‌باشد. پیش‌بینی وجود پراکندگی بالا برای پاسخ‌های دینامیکی تحت شتاب‌نگاشت‌های نیرومند حوزه نزدیک که مطابق ضوابط استاندارد ۲۸۰۰ مقیاس شده‌اند، بدیهی است. یکی از دلایل اصلی این موضوع نیز شدت متفاوت رکوردهایی است که به یک سطح طیفی، هم‌پایه شده‌اند. مطابق شکل (۵)، این موضوع هنگامی که تاریخچه زمانی رکورد حاوی پالس سرعت باشد، اهمیت



شکل (۶): طیف پاسخ شتاب: (الف) طیف SRSS دو مؤلفه رکوردها در حالت طبیعی و طیف طرح استاندارد ۲۸۰۰، (ب) طیف SRSS دو مؤلفه رکوردها در حالت مقیاس شده و ۱/۳ برابر طیف طرح استاندارد ۲۸۰۰ (جدول ۴).

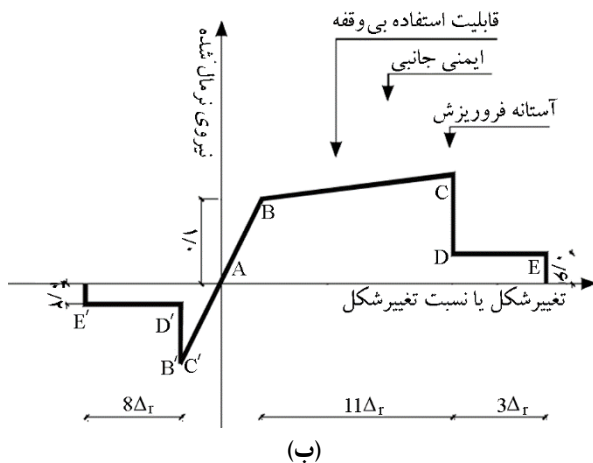
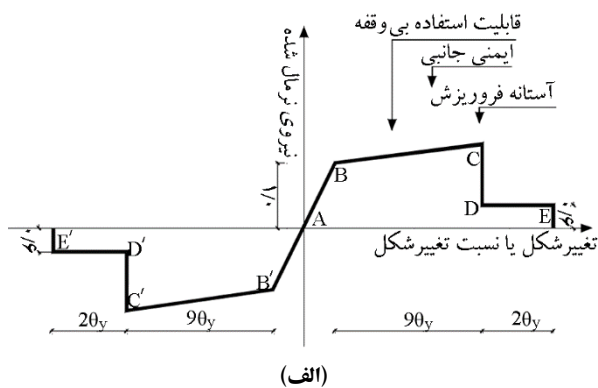


شکل (۷): تاریخچه زمانی سرعت مربوط به مؤلفه TR رکوردهای انتخابی: (الف) حالت طبیعی (میدان آزاد)، (ب) حالت مقیاس شده.

تغییر مکان زمین ظاهر خواهند شد. پیدایش رفتار ضربه‌ای زمین ناشی از ارتعاشات پر قدرت در حوزه نزدیک گسل‌های فعال بر همین مبنا استوار است. اعمال ضریب مقیاس برای رکوردهای حاوی اثرات نیرومند جهت‌داری، ساختار تغییر مکان دینامیکی

بر پایه شکل (۷) دو رکورد WPI و ERZ در حالت طبیعی (میدان آزاد)، دارای بزرگ‌ترین دامنه پالس سرعت می‌باشند. همچنین بعد از مقیاس‌سازی، پالس رکورد SPV دامنه‌ای به مراتب بزرگ‌تر از دیگر رکوردها خواهد داشت. با انجام مقیاس‌سازی، ملاحظه می‌شود که همراه با پالس مشخص و بزرگ مربوط به محدوده زمانی ۲ ثانیه تا ۵ ثانیه در شکل (۷)، یک مجموعه موجک‌های مصنوعی و به نسبت پر دامنه نیز پدیدار خواهند شد. بدین ترتیب پالس‌های مشخص شتاب موجود در تاریخچه زمانی مؤلفه‌های LN و TR رکوردها، تبدیل به ساختارهای موجی شکل بسیار پر قدرت می‌شوند. همچنین در کنار روند بزرگ شدن پالس‌های مذکور، مجموعه اسپایک‌های کم دامنه شتاب نیز به صورت یک گروه موجک‌های به نسبت نیرومند پدیدار خواهند شد.

مطابق با جدول (۴) عدد ضریب مقیاس رکوردها برای مدل‌های ۲ و ۳ (دارای پیکربندی المان‌های زیر) کمی کمتر از مقدار متناظر برای مدل ۱ (فاقد آرایش المان‌های زیر) است (شکل ۱). بدین ترتیب با ضریب‌دار شدن هر سه مؤلفه یک رکورد نیرومند حوزه نزدیک، ساختارهای چند موجی بزرگ و بلندمدت نظیر پالس‌های ترکیبی شبه‌سینوسی در تاریخچه زمانی



شکل (۸): مدل رفتار غیرخطی: (الف) المان‌های تیر و ستون؛ (ب) المان‌های زیر بزرگ مقیاس [۱۴].

راستای Y بیشتر از راستای X است. نکته دیگر آنکه محل وقوع بیشینه دررفت نیز به طبقات بالاتر منتقل شده، درحالی که مقدار آن در اکثر موارد کاهش یافته است. نتایج تحلیلی حاصل شده برای دو پیکربندی متفاوت المان‌های زیر (مدل‌های ۲ و ۳) بسیار مشابه هستند. اختلاف کوچک بین نمودارهای رکوردهای WPI و STC در راستای X نشان می‌دهد که تعبیه المان‌های زیر با اتصال به دو ستون (مدل ۳)، رفتار به نسبت بهتری را به‌ازای پارامتر دررفت در پی دارد. تاریخچه زمانی رکورد حوزه دور و نه‌چندان نیرومند ELC حاوی یک مجموعه پیوسته و پر تعداد اسپایک‌های کم‌دامنه شتاب است. ملاحظه می‌شود که تحت این رکورد حوزه دور، وجود المان‌های زیر تأثیر چندانی در کاهش دامنه تغییرات دررفت نداشته و همچنین نمود مشخصی برای تفاوت تغییرات پارامتر مذکور در ترازهای ارتفاعی بالاتر هر سه سازه شکل (۱) نیز دیده نمی‌شود.

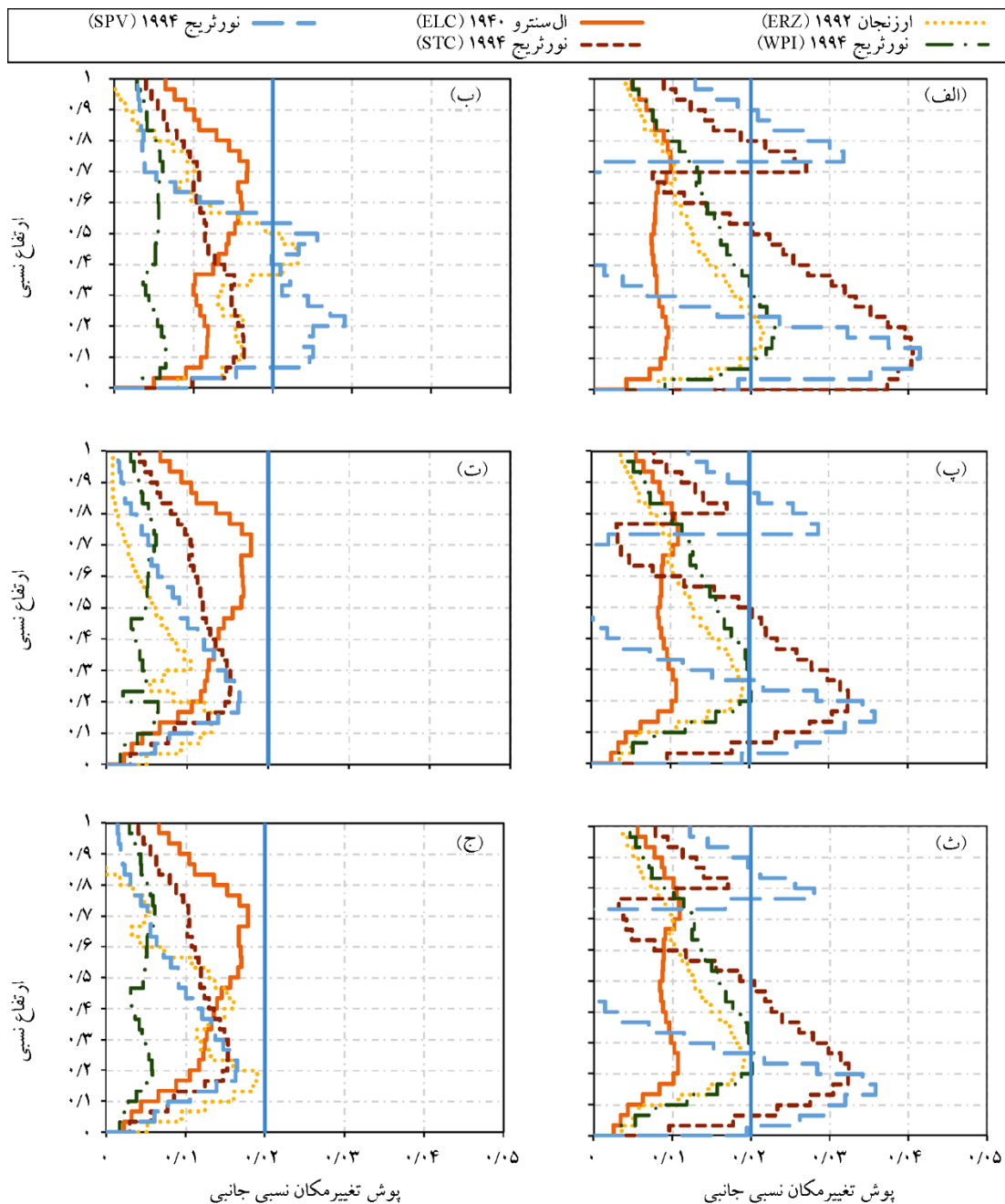
زمین را به یک جنبش هجومی شامل ضربات چند گانه بسیار پرانرژی و ویران‌گر تبدیل می‌نماید. نمود این رفتار به صورت ضربات متوالی به اسکلت مقاوم سازه است که پدیدار شدن مفاصل پلاستیک و گسترش سریع رفتار غیرخطی با دامنه بزرگ را در پی دارد.

۴-۲- مفاصل پلاستیک

عوامل اصلی حاکم بر تغییرات پاسخ سازه به‌ویژه در نزدیکی وضعیت فروریزش، کاهش سختی^۸ و زوال مقاومت^۹ است. این دو عامل، مقدار دررفت طبقه را افزایش داده و بسته به سرعت زوال و مشخصه‌های زمین لرزه، ممکن است منجر به ناپایداری دینامیکی و فروریزش کل سازه نیز بشود. بنابراین چگونگی توصیف اثر این دو پارامتر، از معیارهای مهم در پیاده‌سازی روش تحلیل دینامیکی غیرخطی می‌باشد. مدل‌سازی رفتار حقیقی یک سازه با عدم قطعیت‌های زیادی همراه است. ساختار منحنی نیرو-تغییر شکل اعضا جهت حصول یک ارزیابی قابل اطمینان از رفتار دینامیکی غیرخطی سازه، بایستی توانایی تعریف و تحلیل زوال پارامترهای مقاومت و سختی را داشته باشد [۳۴-۳۵]. جهت تعریف پیاده‌سازی مدل مذکور از ضوابط و توصیه‌های FEMA 356 استفاده شده و مفصل پلاستیک P-M2-M3 (اندرکنش نیروی محوری و لنگر خمشی) در دو انتهای ستون‌ها با اتصالات ممان‌گیر، مفصل M3 برای تیرها با مدل پانل زون صلب و همچنین مفصل P برای زیرهای بزرگ مقیاس تعریف شده است (شکل ۸).

۳- ارزیابی پاسخ لرزه‌ای سازه‌های مطالعاتی

نمودارهای تغییرات جابه‌جایی نسبی طبقه‌ای (دررفت) در نقطه A پلان شکل (۱) و در راستای X و Y مدل‌های مطالعاتی، در شکل (۹) نشان داده شده است. همان‌طور نمودارها نشان می‌دهند با حضور المان‌های زیر در چهار طبقه پایینی سازه، مقدار تغییر مکان نسبی جانبی (دررفت) در این بخش به طرز محسوسی کاهش می‌یابد. همچنین دامنه مقادیر دررفت در



شکل (۹): پوش بیشینه تغییر مکان نسبی جانبی طبقات در نقطه A (شکل ۱): (الف) مدل ۱ (قاب خمشی محیطی پایه) در راستای y پلان؛ (ب) مدل ۱ (قاب خمشی محیطی پایه) در راستای x پلان؛ (پ) مدل ۲ (قاب خمشی محیطی دارای المان‌های زیر با اتصال به یک ستون) در راستای y پلان؛ (ت) مدل ۲ (قاب خمشی محیطی دارای المان‌های زیر با اتصال به یک ستون) در راستای x پلان؛ (ث) مدل ۳ (قاب خمشی محیطی دارای المان‌های زیر با اتصال به دو ستون) در راستای y پلان؛ (ج) مدل ۳ (قاب خمشی محیطی دارای المان‌های زیر با اتصال به دو ستون) در راستای x پلان، محور ۰/۰۲ بیان‌گر حد مجاز تعریف شده در استاندارد ۲۸۰۰ است.

رکورد حاوی تعداد بسیار زیاد اسپایک‌های کم دامنه شتاب با گام زمانی کوچک (متناظر با فرکانس بالا) است و اعمال ضریب مقیاس نیز تنها به ارتفاع طیفی این اسپایک‌های کم انرژی می‌افزاید (شکل ۷). اعمال

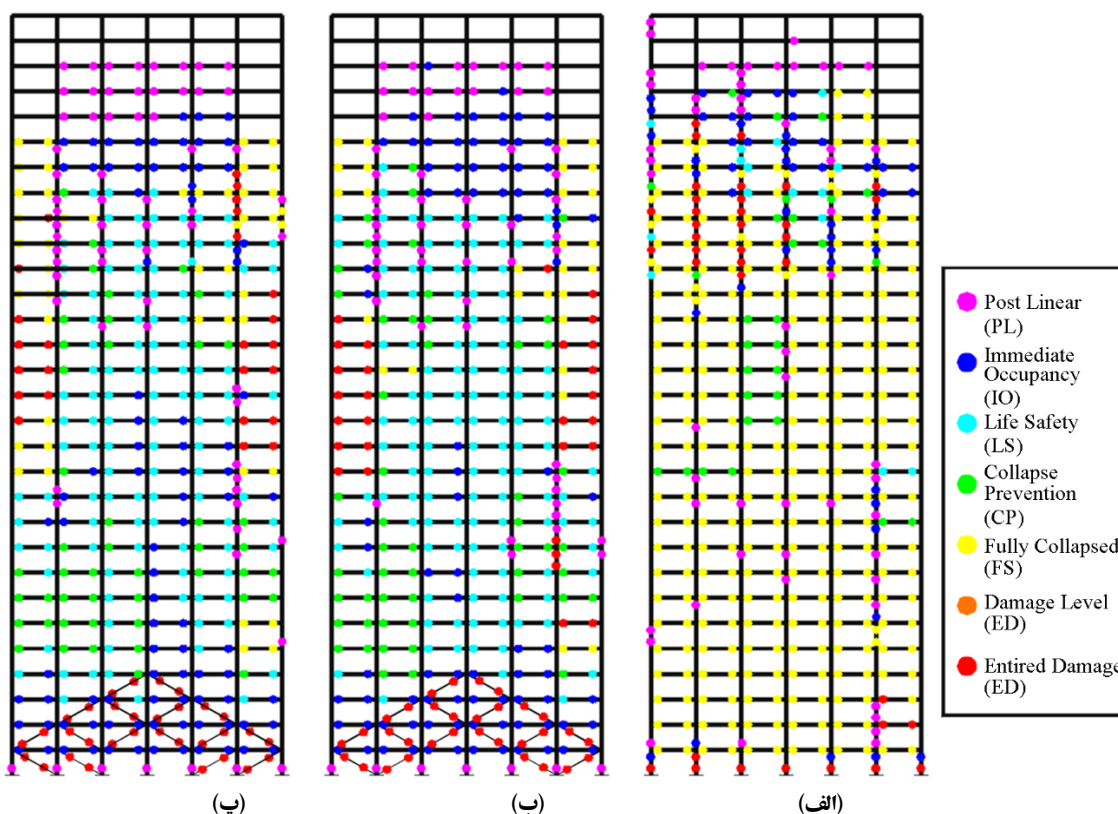
ماهیت فیزیکی متفاوت رکوردهای حوزه دور نسبت به جنبش‌های نیرومند ثبت شده در نزدیک صفحه شکست گسل، عامل مهم تأثیر گذار در این مقوله است. مطابق شکل (۵)، تاریخچه زمانی این

ایمنی جانی و یا نزدیک به وضعیت فروریزش خواهد رسید. آرایش و محل تشکیل مفاصل پلاستیک در صفحه قاب صلب گوشه‌ای پلان و به موازات محور X هر یک از مدل‌های مطالعاتی، تحت رکورد مقیاس شده STC در شکل (۱۰) به نمایش در آمده است. مطابق این شکل، در پیکره سازه‌های ۲ و ۳ تعداد مفاصل پلاستیک کمتری نسبت به مدل ۱ تشکیل شده است. بدین ترتیب، دامنه آسیب کمتری به اسکلت مقاوم سازه وارد شده و پایداری دینامیکی در بازه زمانی گسترده‌تری برقرار می‌باشد (جدول ۵). طبق بررسی‌های این پژوهش، محدوده افزایش مدت‌زمان پایداری دینامیکی سازه از ۰/۵ ثانیه برای رکورد مقیاس شده WPI تا ۱۶/۵۲ ثانیه برای رکورد مقیاس شده STC ادامه دارد. همچنین، وضعیت نزدیک شدن به سطح عملکردی آستانه فروریزش، دیرتر اتفاق می‌افتد.

نکته دیگر آن است که وجود زیپرها در طبقات تحتانی باعث شده که روند تشکیل و گسترش حوزه‌های غیرخطی، بیشتر در این المان‌ها صورت گیرد. اضافه می‌شود که با تشکیل مفاصل پلاستیک

ضرایب مقیاس سبب افزایش دامنه و بزرگ‌تر شدن پالس‌های شتاب و سرعت ناشی از فرایند جهت‌داری خواهد شد و این روند نیز منتهی به نیرومندتر شدن رکورد حوزه نزدیک می‌شود (جدول ۴ و شکل ۷). ضرایب مقیاس به دست آمده برای رکوردهای مختلف، بر اساس ماهیت طیفی آنها متفاوت خواهد بود [۳۶-۳۷]. مطابق جدول (۴)، رکورد SPV دارای بزرگ‌ترین ضریب مقیاس بوده و پس از اعمال آن نیز تبدیل به یک رکورد بسیار نیرومند می‌گردد. این رکورد در حالت مقیاس شده می‌تواند آثار بسیار مخربی بر روی سازه داشته باشد.

با اعمال ضرایب مقیاس بر رکوردهای زلزله، شدت و دامنه بارگذاری دینامیکی معادل وارد بر اسکلت مقاوم سازه نیز تغییر می‌نماید. هر اندازه که مقدار عددی این ضرایب بیشتر باشد، رکوردهای مقیاس شده نیز به صورت نیرومندتری به سازه وارد خواهند شد. نتیجه این رویه نیز تشکیل ساختار گسترش یافته مکانیسم‌های پلاستیک در اسکلت مقاوم سازه است، به طوری که دامنه غیرخطی در بسیاری از المان‌های اصلی به حدود بالاتر از



شکل (۱۰): آرایش مفاصل پلاستیک تشکیل شده در پیکره قاب صلب گوشه‌ای در راستای X پلان در آخرین ثانیه قبل از فروریزش کلی اسکلت مقاوم سازه (شکل ۱) تحت رکورد مقیاس شده STC. (الف) مدل ۱؛ (ب) مدل ۲؛ (پ) مدل ۳، مفاهیم سطوح عملکردی در مراجع [۱۴-۱۵] آورده شده‌اند.

سطح عملکرد استفاده بی‌وقفه (IO) باقی مانده و نمود رسیدن به سطح عملکرد آستانه فروریزش نیز در تیرهای ترازهای ارتفاعی بالاتر سازه پدیدار می‌گردد.

علاوه بر ضریب مقیاس، عوامل دیگری نیز بر میزان اثرات مخرب یک رکورد حوزه نزدیک بر روی سازه تأثیر گذار هستند. یکی از این عوامل، قرارگیری محور طیفی فرکانس‌های اصلی سازه (جدول ۱) بر روی نقاط اوج طیف فوریه رکورد می‌باشد. همان‌طور که در شکل (۱۱-الف) و جدول (۶) مشاهده می‌گردد، محور طیفی فرکانس سوم سازه بر روی یکی از نقاط اوج رکورد STC قرار دارد. همچنین از دیگر موارد مهم، قرارگیری پروده‌های اصلی سازه بر روی نقطه اوج طیف پاسخ سرعت رکورد می‌باشد.

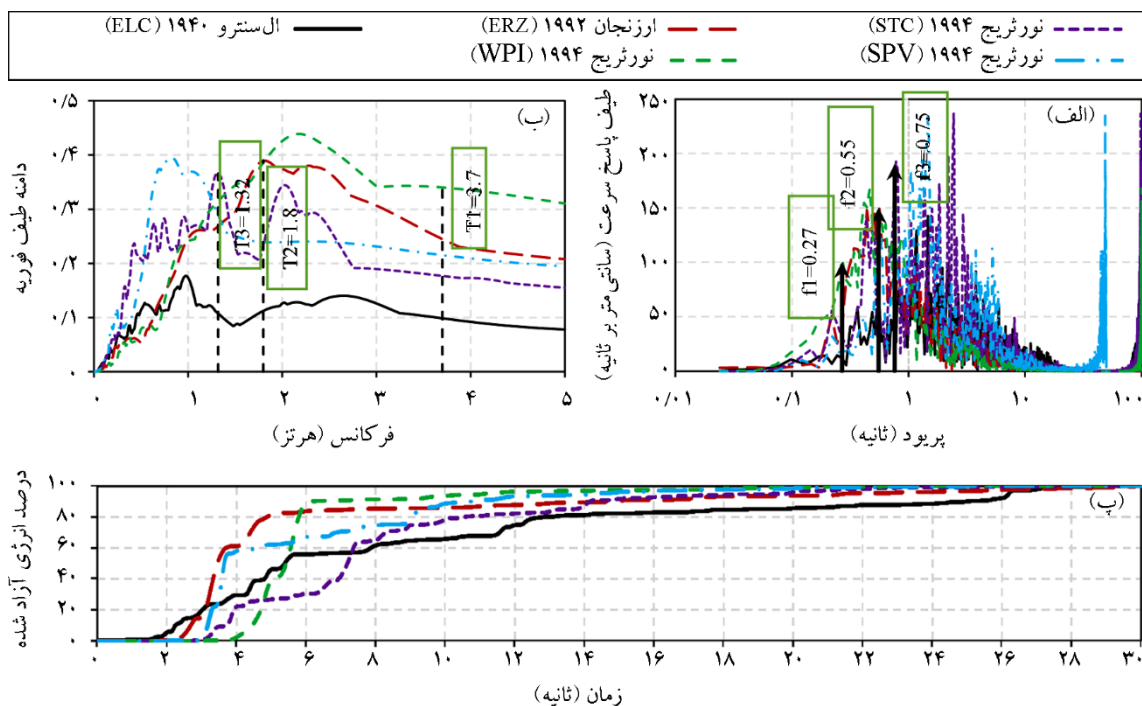
جدول (۶): پرود پالس رکوردهای حوزه نزدیک انتخابی (بر حسب ثانیه).

نام رکورد	WPI	STC	SPV	ERZ
پرود پالس سرعت	۳/۲۰	۱/۲۸	۰/۶۸	۳/۴۵

جدول (۵): دامنه زمانی متناظر با اوج روند آزاد شدن انرژی جنبشی رکورد نسبت به بازه ۳۰ ثانیه‌ای (بر حسب ثانیه).

سازه مطالعاتی	WPI	STC	SPV	ERZ	ELC
مدل ۱	۷/۰۵	۱۳/۴۸	۴/۶۰	۵/۲۳	۳۰
مدل ۲	۷/۵۰	۳۰	۵/۴۲	۵/۹۱	۳۰
مدل ۳	۷/۵۲	۳۰	۵/۰۴	۶/۱۱	۳۰

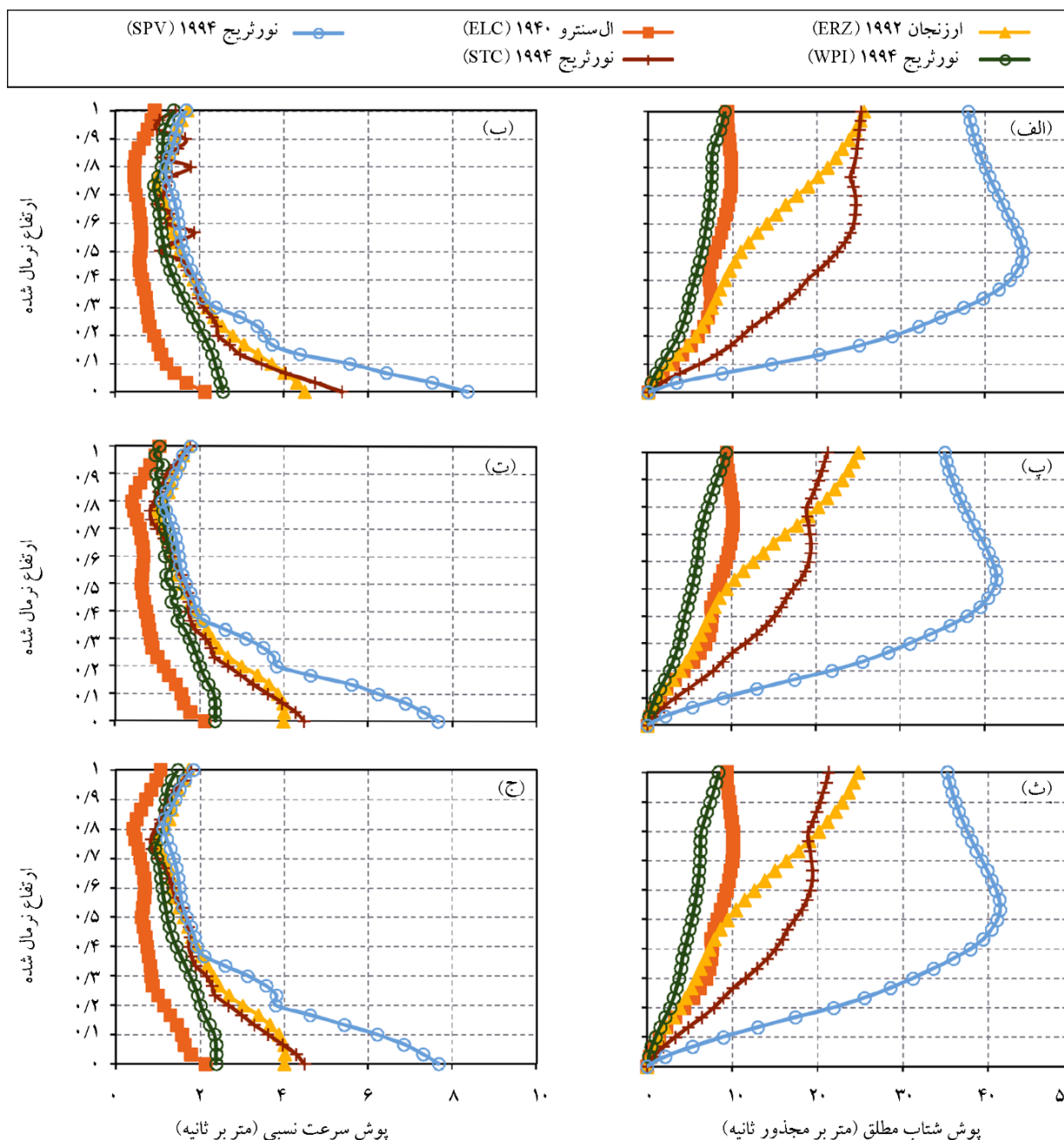
(با وضعیت نزدیک به فروریزش عضوی) در پیکربندی المان‌های زیر بزرگ مقیاس، دامنه رفتار لرزه‌ای در حوزه تغییر شکل‌های بزرگ مربوط به المان‌های ستون این طبقات نیز دچار کاهش نسبی می‌گردد. ملاحظه می‌شود که در ساختار پاسخ لرزه‌ای مدل ۱، طبقات تحتانی سازه به سطح عملکرد ایمنی جانی (LS) و فراتر از آن می‌رسند. همچنین دو سطح عملکرد آستانه فروریزش (CP) و فروریزش کلی (C) نیز از ترازهای ارتفاعی پایین‌تری شروع به تشکیل می‌نمایند. ساختار رفتار لرزه‌ای مدل‌های ۲ و ۳ به گونه‌ای است که به‌طور نسبی، دامنه پاسخ لرزه‌ای طبقات تحتانی در حدود



شکل (۱۱): (الف) طیف فوریه مؤلفه TR رکوردهای انتخابی (سه فلش از چپ به راست نمایانگر فرکانس‌های ۱ تا ۳ مدل‌های مطالعاتی دارای المان‌های زیر می‌باشند)؛ (ب) طیف پاسخ سرعت مؤلفه TR رکوردهای انتخابی (سه خط چین سیاه‌رنگ عمودی از راست به چپ نمایانگر پروده‌های ۱ تا ۳ مدل‌های مطالعاتی دارای المان‌های زیر می‌باشند)؛ (پ) روند آزاد شدن انرژی مؤلفه TR رکوردهای انتخابی.

در کمتر از ۵ و ۶ ثانیه، ۹۰ و ۸۰ درصد انرژی جنبشی آزاد می‌شود. پدیدار شدن اثرات تشدید در رفتار لرزه‌ای سازه تحت عوامل فوق روی خواهد داد و به دلیل اعمال نیروهای دینامیکی جانبی به صورت ضربه، اسکلت مقاوم سازه رفتار تردتری از خود نشان می‌دهد. شکل (۱۲- الف تا ج) نشان‌دهنده نمودارهای

بر پایه شکل (۱۱-ب) محور پیروم سوم سازه (شکل ۱) نیز منطبق بر نقطه اوج طیف پاسخ سرعت رکورد STC است. همچنین روند آزاد شدن انرژی جنبشی یک رکورد نیز از پارامترهای تأثیرگذار بر شدت ایجاد خرابی در سازه است. مطابق شکل (۱۱-پ) برای دو رکورد نیرومند ERZ و WPI به ترتیب



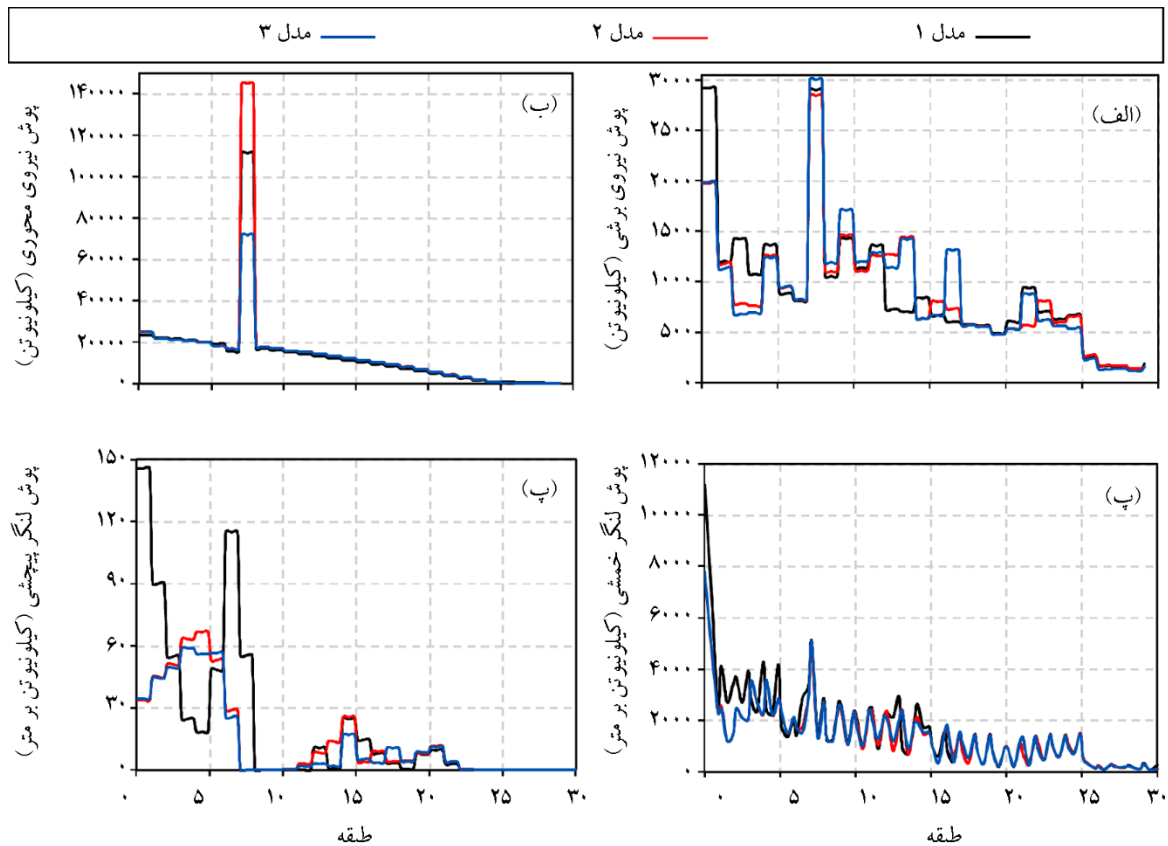
شکل (۱۲): نمودارهای پوش بیشینه شتاب مطلق و سرعت نسبی مرکز جرم CM طبقات در راستای y. پلان مدل‌های مطالعاتی (شکل ۱) تحت رکوردهای مقیاس شده: (الف) پوش سرعت نسبی در مدل ۱؛ (ب) پوش شتاب مطلق در مدل ۱؛ (پ) پوش سرعت نسبی در مدل ۲؛ (ت) پوش شتاب مطلق در مدل ۲؛ (ث) پوش سرعت نسبی در مدل ۳؛ (ج) پوش شتاب مطلق در مدل ۳.

پاسخ بیشینه سرعت نسبی تحت رکورد نیرومند و مقیاس شده SPV بررسی گردید، مقادیر آن در طبقات پانزدهم و سی‌ام مدل‌های دارای پیکربندی المان‌های زیر بزرگ مقیاس، به ترتیب ۱۵ و ۶ درصد کوچک‌تر از مقادیر متناظر در پاسخ مدل پایه می‌باشد. در خصوص بیشینه شتاب مطلق طبقات نیز کاهش ایجاد شده در دامنه پارامتر مذکور، کمتر از پارامتر سرعت نسبی بوده و بیشتر در طبقات پایینی محسوس است. همچنین ملاحظه می‌شود که افزودن المان‌های زیر در دو مدل ۲ و ۳ باعث کاهش نسبی تغییرات بیشینه شتاب مطلق طبقات بالایی در مدل پایه تحت رکورد مقیاس شده STC و یکنواخت‌تر شدن تغییرات پارامتر مذکور شده است.

شکل (۱۳- الف تا ت) به ترتیب پوش بیشینه نیروهای برشی، محوری و نیز لنگرهای خمشی و پیچشی در ستون نقطه A در راستای ارتفاع سازه، تحت رکورد مقیاس شده ERZ را به تصویر می‌کشد. با توجه به این نمودارها می‌توان نتیجه‌گیری کرد که

پوش بیشینه سرعت نسبی و شتاب مطلق مدل‌های مطالعاتی در محل مرکز جرم C_M و در راستای Y پلان در طبقات مختلف هستند. دامنه تغییرات پارامتر سرعت مذکور به دلیل وجود اثرات نیرومند جهت‌داری در برخی رکوردها و همچنین پدیدار شدن ساختار موج‌گونه در تاریخچه زمانی سرعت زمین، به نسبت دارای مقادیر بزرگی بوده و این اثر در نمودارهای پوش بیشینه شتاب طبقات سازه‌ها نیز قابل مشاهده است. نتایج این پژوهش بیان‌گر آن است که پارامترهای پاسخ به شدت تحت تأثیر ساختار فیزیکی رکوردهای وارد به سازه‌های مطالعاتی قرار دارند و این تفاوت در نمودارهای مذکور به وضوح دیده می‌شود.

بررسی نمودارهای شکل (۱۲) نشان می‌دهد که تغییرات هر دو پارامتر پاسخ مذکور برای سازه با پیکربندی المان‌های زیر بزرگ مقیاس (مدل‌های ۲ و ۳) نسبت به مدل پایه (مدل ۱)، دارای روند یکنواخت‌تر و متناسب‌تر است. چنانچه دامنه تغییرات پارامتر



شکل (۱۳): پوش بیشینه برآیند نیرویی و لنگرهای ایجاد شده در المان ستون نقطه A تحت رکورد مقیاس شده ERZ در مدل‌های مطالعاتی (شکل ۱): (الف) پوش نیروی برشی؛ (ب) پوش نیروی محوری؛ (پ) پوش لنگر خمشی؛ (ت) پوش لنگر پیچشی.

۴- نتیجه‌گیری

بر اساس نتایج به‌دست آمده در این تحقیق ملاحظه می‌شود که آرایش هندسی و پیکربندی المان‌های زیر بزرگ مقیاس سبب افزایش سختی سازه و کاهش متوسط ۵ درصدی در پرورد مود پایه ارتعاش می‌گردد. این کاهش دوره تناوب اسکلت مقاوم نیز باعث افزایش نسبی برش پایه و همچنین یک کاهش ۵ تا ۱۶ درصدی در ضریب مقیاس جهت هم‌پایه‌سازی رکورد زلزله با سطح خطر حوزه ساختگاه خواهد شد. همچنین اضافه مقاومت ایجاد شده ناشی از چیدمان پیکربندی المان‌های زیر بزرگ مقیاس، باعث می‌شود که پایداری دینامیکی اسکلت مقاوم سازه تا محدوده بزرگ‌تری از بازه زمانی رکوردهای نیرومند حوزه نزدیک برقرار باشد. همچنین درباره رکوردهای حوزه نزدیک ضعیف‌تر که تنها حاوی اسپایک‌های کم‌دامنه شتاب و یک پالس ترکیبی کوچک و کوتاه‌مدت سرعت می‌باشند، مجموعه پارامترهای پاسخ لرزه‌ای دارای دامنه عددی به مراتب کمتری خواهند بود.

بر اساس ارزیابی نتایج حاصله از عملکرد سازه‌های مطالعاتی در حوزه رفتار غیرخطی، ملاحظه می‌گردد که روند تشکیل مکانیسم مفاصل پلاستیک در بخش‌های میانی و فوقانی اسکلت مقاوم مدل پایه (مدل ۱)، دارای شدت بیشتری بوده و از حدود عملکردی ایمنی جانی و آستانه فروریزش نیز تجاوز نموده است. نمود اساسی فرآیند فوق در رفتار لرزه‌ای مدل‌های با چیدمان زیرهای بزرگ مقیاس (مدل‌های ۲ و ۳)، به صورت دامنه پایین‌تر آسیب بوده و در نتیجه اسکلت مقاوم سازه دیرتر به ناپایداری

چیدمان المان‌های زیر بزرگ مقیاس باعث تعدیل نیرو و کاهش مقادیر بیشینه لنگرهای خمشی و پیچشی و نیز نیروی برشی بخصوص در طبقات پایینی سازه می‌شود. اثر این تعدیل در برآیند نیروی محوری، کمتر بوده و برای دیگر برآیندها قابل توجه‌تر است. بیشترین نمود نیز در کاهش ۷۰ و ۳۰ درصدی به ترتیب برای لنگر پیچشی و نیروی برشی در طبقه اول می‌باشد. همچنین برای بررسی کارایی و بهره‌وری اثر چیدمان المان‌های زیر بزرگ مقیاس، وزن اسکلت و میزان تغییرات جابه‌جایی نسبی جانبی (دریفت) نقطه A پلان در سازه‌های شکل (۱) به ترتیب در جدول‌های (۷) و (۸) نشان داده شده است. مقایسه وزن مدل‌های مختلف نشان می‌دهد که وجود المان‌های زیر سبب یک افزایش ناچیز و کمتر از ۰/۱ درصد می‌شود (جدول ۷). همچنین مقایسه مقادیر میانگین، انحراف استاندارد و ماکزیمم دریفت جانبی نیز نشان می‌دهد که پیکربندی المان‌های زیر بزرگ مقیاس در دو مدل ۲ و ۳ به ترتیب و به طور متوسط سبب کاهش ۱۴ و ۱۵ درصدی مقدار میانگین پارامتر مذکور و یک کاهش ۱۴ درصدی در حداکثر آن تحت رکوردهای حوزه نزدیک انتخابی می‌گردد (جدول ۸). این امر نیز نمودی بر جنبه اقتصادی و بهره‌وری مناسب سیستم سازه‌ای مذکور است.

جدول (۷): وزن مصالح مصرفی سازه‌های مطالعاتی شکل ۱ (برحسب تن).

مدل ۱	مدل ۲	مدل ۳	
۴۶۷۳/۷	۴۶۷۸/۳	۴۶۷۸/۳	وزن مصالح مصرفی
	کمتر از ۰/۱ درصد	کمتر از ۰/۱ درصد	افزایش وزن نسبت به مدل ۱

جدول (۸): میانگین، انحراف استاندارد و ماکزیمم جابه‌جایی نسبی جانبی برای نقطه A پلان سازه‌های مطالعاتی (شکل ۱).

نام رکورد	ERZ			STC			WPI			SPV		
	مدل ۱	مدل ۲	مدل ۳	مدل ۱	مدل ۲	مدل ۳	مدل ۱	مدل ۲	مدل ۳	مدل ۱	مدل ۲	مدل ۳
میانگین	۰/۰۱۲۳	۰/۰۱۰۶	۰/۰۱۰۷	۰/۰۲۳۷	۰/۰۱۷۰	۰/۰۱۷۱	۰/۰۱۴۶	۰/۰۱۲۵	۰/۰۱۲۵	۰/۰۱۲۹	۰/۰۱۲۹	۰/۰۱۲۱
انحراف استاندارد	۰/۰۰۵۶	۰/۰۰۵۲	۰/۰۰۵۲	۰/۰۱۱۵	۰/۰۰۹۶	۰/۰۰۹۶	۰/۰۰۶۰	۰/۰۰۵۷	۰/۰۰۵۷	۰/۰۱۶۰	۰/۰۱۳۷	۰/۰۱۴۰
ماکزیمم	۰/۰۲۱۵	۰/۰۱۹۱	۰/۰۱۹۱	۰/۰۴۰۵	۰/۰۳۲۵	۰/۰۳۲۴	۰/۰۲۳۱	۰/۰۲۰۴	۰/۰۲۰۴	۰/۰۴۱۵	۰/۰۳۵۸	۰/۰۳۵۸

- analysis in beam columns. *Engineering Structure*, **25**, 1131-1138.
9. Krawinkler, H., Medina, R., and Alavi, B. (2003) Seismic drift and ductility demands and their dependence on ground motions. *Engineering Structure*, **25**, 637-653.
 10. Zareian, F. and Krawinkler, H. (2007) Assessment of probability of collapse and design for collapse safety. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **36**, 1901-1914.
 11. Iranian National Building Code (2014) *Design Loads for Buildings - Division 6*. Tehran, Iran (in Persian).
 12. Iranian National Building Code (2014) *Steel Structures - Division 10*. Tehran, Iran (in Persian).
 13. Iranian Standard No. 2800 (2014) *Iranian Code of Practice for Seismic Resistant Design of Buildings*. Fourth edition. Tehran, Iran (in Persian).
 14. FEMA 356 (1998) *Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings*. Federal Energy Management Agency (FEMA).
 15. *SAP 2000*, Integrated Software for Structural Analysis and Design. Computers & Structures, Inc., Berkeley, California.
 16. Iwan, W.D. (1994) Near-field consideration in specification of seismic design motions for structures. *10th European Conference on Earthquake Engineering*, Vienna, Austria.
 17. Hall, J.F., Heaton, T.H., Halling, M.W. and Wald D.J. (1995) Near-source ground motion and its effects on flexible buildings. *Earthquake Spectra*, **11**, 569-605.
 18. Krishnan, S. (2007) Case studies of damage to 19-story irregular steel moment-frame building under near-source ground motion. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **36**, 861-885.
 19. Alavi, B. and Krawinkler, H. (2004) Behavior of moment-resisting frame structures subjected to near-fault ground motion. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **33**, 687-706.
 20. Ambraseys, N.N. and Douglas, J. (2003) Near-field horizontal and vertical earthquake ground motions.

دینامیکی محتمل خواهد رسید. پارامتر بیشینه تغییر مکان نسبی جانبی (دریفت) برای دو مدل ۲ و ۳ نسبت به مدل ۱ به طور متوسط ۱۴ درصد کاهش یافته و محل وقوع مقدار حداکثر به طبقات بالاتر منتقل شده است. حضور المان‌های مذکور، کاهش عمومی مقدار بیشینه شتاب مطلق و سرعت نسبی طبقات را در پی دارد. یک تعدیل در بیشینه برآیندهای نیروی محوری، برشی و همچنین لنگرهای خمشی و پیچشی در ستون‌های محیطی اسکلت مقاوم رخ خواهد داد.

مراجع

1. Ali, M.M. and Moon, K.S. (2007) Structural developments in tall buildings: current trends and future prospects. *Architectural Science Review*, **50**(3), 205-223.
2. Movahed, H., Meshkat-Dini, A. and Tehranizadeh, M. (2014) Seismic evaluation of steel special moment resisting frames affected by pulse type ground motions. *Asian Journal of Civil Engineering (BHRC)*, **15**, 575-585.
3. Gupta, A. and Krawinkler, H. (2000) Behavior of ductile SMRFs at various seismic hazard levels. *Journal of Structural Engineering (ASCE)*, **126**(1), 98-107.
4. Krawinkler, H. (2006) Importance of good nonlinear analysis. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, **15**, 515-531.
5. Tajmir-Riahi, H., Amouzgar, H., and Saheb-Fosoul, S. (2015) Comparative study of seismic structural response to real and spectrum matched ground motions. *Scientia Iranica, Sharif University of Technology*, **22**(1), 92-106.
6. Stafford Smith, B. and Coull, A. (1991) *Tall Building Structures: Analysis and Design*. John Wiley Publication.
7. Gunel, M.H. and Ilgin, H.E. (2007) A proposal for the classification of structural systems of tall buildings. *Journal of Building and Environment*, **42**, 2667-2675.
8. Lue, Q.Z., Tang, J., Li, Q.S. (2003) Shear lag

- Directivity pulses in near-fault ground motions - I: Identification, extraction and modeling. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **50**, 1-15.
31. Mukhopadhyay, S. and Gupta, V.K. (2013) Directivity pulses in near-fault ground motions - II: Estimation of pulse parameter. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **50**, 38-52.
32. Somerville, P.G. (2003) Magnitude scaling of the near fault rupture directivity pulse. *Physics of the Earth and Planetary*, **137**, 201-212.
33. Haj Najafi, L. and Tehranizade, M. (2015) Selecting appropriate intensity measure in view of efficiency. *Civil Engineering Infrastructures Journal*, **48**(2), 251-269.
34. Lignos, D.G, Krawinkler, H. (2011) Deterioration modeling of steel components in support of collapse prediction of steel moment frames under earthquake loading. *Journal of Structural Engineering*, **137**, 1291-1302.
35. Ibarra, L.F., Medina, R.A., Krawinkler, H. (2005) Hysteretic models the incorporate strength and stiffness deterioration. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **34**, 1489-1511.
36. Bradley, B.A., Pettinga, D., Baker, J.W., 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>.
37. Puglia, R., Russo, E., Luzi, L., D'Amico, M., Felicetta, C., Pacor, F., 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>.
38. **واژه‌نامه**
- Framed Tube Structure ۱- قاب خمشی محیطی
- Shear Lag ۲- لنگی برش
- Drift ۳- تغییر مکان نسبی جانبی
- Forward Directivity ۴- جهت‌داری پیش‌رونده
- Soil Dynamics and Earthquake Engineering, **23**, 1-18.
21. Somerville, P.G., Smith, N., Graves, R. and Abrahamson, N. (1997) Modification of empirical strong ground motion attenuation relation to include the amplitude and duration effects of rupture directivity. *Seismological Research Letters*, **68**, 180-203.
22. Somerville, P.G. (1998) Development of an improved ground motion representation for near-fault ground motions. *Proceeding of SMIP98 Seminar on Utilization of Strong-Motion Data*, Oakland, California.
23. Somerville P.G., Smith N., Graves, R. (1999) Recommended lateral force requirements and commentary, 7th Edition, SEAOC, Sacramento, California.
24. Kermani, E., Jafarian, Y. and Baziar, M. (2009) New predictive models for the ratio of strong ground motions using genetic programming. *International Journal of Civil Engineering*, **7**, 236-247.
25. Mavroeidis, G.P. and Papageorgiou, A.S. (2002) Near-source strong ground motions characteristics and design issues. *US National Conference on Earthquake Engineering Boston*, Massachusetts.
26. Meshkat-Dini, A. (2008) *Torsional Response of Tall Buildings Subjected to Near Field Earthquake Records and Application of Neutral Networks*. Ph.D. Dissertation, Amirkabir University of Technology, Tehran (in Persian).
27. Iwan, W.D. (1995) Nearfield consideration in specification of seismic design motions for structures. *European Conference on Earthquake Engineering*, Balkema, Rotterdam.
28. Kalkan, E., Eeri, S.M., Kunnath, S.K. and Eeri, M. (2006) Effects of fling step and forward directivity on seismic response of buildings. *Earthquake Spectra*, **22**(2), 367-390.
29. Azhdarifar, M., Meshkat-Dini, A., Sarvghad-Moghadam, A. (2015) Study on the seismic response of steel medium-height buildings with framed-tube skeleton under near-fault records. *Electronic Journal of Structural Engineering (EJSE)*, **15**, 70-87.
30. Mukhopadhyay, S. and Gupta, V.K. (2013)

Mode Like	۵- مود گونه
Wave Like	۶- موج گونه
SRSS	۷- جذر مجموع مربعات
Stiffness Deterioration	۸- کاهش سختی
Strength Degradation	۹- زوال مقاومت

Study on the Seismic Response Variations of Tall Hybrid Hramed Tube Skeletons in Near-Fault Sites

Mahboobeh Aboutalebi¹, Afshin Meshkat-Dini^{2*} and Jafar Keyvani Ghamsari³

1. Ph.D. Student, Kharazmi University, Tehran, Iran
2. Assistant Professor, Kharazmi University, Tehran, Iran,
*Corresponding Author, email: meshkat@khu.ac.ir
3. Associate Professor, Kharazmi University, Tehran, Iran

This research investigates the trend of changes in seismic response of tall hybrid framed tube skeletons according to the obtained analytical results through conducting nonlinear dynamic response history analyses (NL-RH analyses) under three components near-field earthquake records. For this purpose, three 30-story structural models with framed tube resistant skeletons were selected and designed. The first resistant skeleton is classified as the basic model with a framed tube structural system. The second and third models are introduced by embedding of multi-level configurations of large scale zipper elements on the basic model, which connected to one or two columns in the first story. The existence of a designed multi-level arrangement of large scale zipper elements prevents the formation of expanded plastic mechanism and also relatively blocks the occurrence of any possible buckling in the lower-stories columns. The connection of the large scale zipper elements to the columns was defined rigid. The studied structures were loaded and designed in accordance with the notified provisions recommended by the Iranian national building codes (divisions six and ten) as well as the standard 2800 (fourth edition) [1-3]. The assumed hysteresis loops related to the possible formation of plastic hinges in structural elements have been adapted from the FEMA 356 [4]. These notifications were described to clarify the assigned non-linear behavior of the elements of each studied structure. All of the analyses were conducted through SAP 2000 software [5].

To perform nonlinear dynamic response history analyses, an ensemble of five earthquake records including one far-field and four near-field ground motions contain forward-directivity effects, were selected and scaled according to the fourth edition of the Standard 2800. The main criterion in choosing near-field records is the existence of distinct coherent pulses caused by the strong rupture directivity effects, which are emerged in the ground velocity time history [6-7]. In this research, a comprehensive numerical assessment was accomplished on the seismic response parameters of the studied structural models. The analytical evaluations are focused on the maximum inter-story drift ratios, the maximum relative velocity and absolute acceleration of the floors (defined at the center of mass C_M), maximum axial and shear force resultants, the upper bound of flexural and torsional moment of the columns, and also the maximum rotation of the formed plastic hinges.

By comparing the configuration of the plastic hinges formed in columns and beams, it is resulted that the presence of the large-scale zipper elements in the lower four stories of the structure relatively causes less damages as well as a greater time domain of dynamic stability. The use of these elements in the perimeter bays of tall framed tube structures results a more uniform distribution of the axial and shear forces, as well as bending and torsion moments in the peripheral columns. It is also resulted a noticeable reduction for the maximum inter story drift ratio of floors, the maximum relative velocity and absolute acceleration of floor levels. Moreover, by comparing the total weight of studied models, it is clear that the architectural embedding of the large-scale zipper elements would cause a slight increase for this factor while reducing the average relative displacement near to 15% as well.

Keywords: Tall Building, Framed Tube, Large-Scale Zipper Element, Near Fault, Panel Zone.

REFERENCES

- 1- Iranian National Building Code (2014) Design Loads for Buildings - Division 6. Tehran, Iran (in Persian).
- 2- Iranian National Building Code (2014) Steel Structures - Division 10. Tehran, Iran (in Persian).
- 3- Iranian Standard No. 2800 (2014) Iranian Code of Practice for Seismic Resistant Design of Buildings. Fourth edition. Tehran, Iran (in Persian).
- 4- FEMA (1998) Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings, FEMA 356. Federal Energy Management Agency.
- 5- SAP 2000, Integrated Software for Structural Analysis and Design. Computers & Structures, Inc., Berkeley, California.
- 6- 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.
- 7- Mukhopadhyay, S., and Gupta, V.K. (2013) Directivity pulses in near-fault ground motions—II: Estimation of pulse parameters. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 50, 38-52.