

بررسی تاثیر پیکربندی سازه‌ای بر رفتار لرزه‌ای ساختمان‌های بلند فولادی با اسکلت قاب محیطی دسته شده

یادگار عزیزی^۱، آزاده احمدی^۲، مسعود اژدری‌فر^۳، افشین مشکوه‌الدینی^{۴*}

۱- دانشجوی دکتری، مهندسی عمران - سازه، دانشگاه خوارزمی، تهران

۲- دانش آموخته کارشناسی ارشد، مهندسی عمران - سازه، دانشگاه خوارزمی، تهران

۳- دانش آموخته کارشناسی ارشد، مهندسی عمران - زلزله، دانشگاه خوارزمی، تهران

۴- استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه خوارزمی، تهران

*تهران، صندوق پستی ۱۴۹۱۱-۱۵۷۱۹، meshkat@khu.ac.ir

چکیده

در این پژوهش، کاربرد و عملکرد اسکلت قاب محیطی دسته شده در سازه‌های فولادی بلند مرتبه تحت اثر رکوردهای نیرومند حوزه نزدیک، بر پایه ارزیابی پاسخ دینامیکی غیرخطی مورد مطالعه قرار گرفته است. سه مدل‌ولاسیون مختلف برای اسکلت مقاوم قاب محیطی دسته شده با پلان متقارن و در سه ارتفاع ۲۰، ۳۰ و ۴۰ طبقه انتخاب گردیده و بر اساس ضوابط استاندارد ۲۸۰۰ (ویرایش چهارم) و نیز مباحث ششم و دهم مقررات ملی ساختمان طراحی شده‌اند. ارزیابی نتایج تحلیلی و آورده‌های این پژوهش با تاکید اساسی بر روی تغییرات دو پارامتر تغییرمکان جانبی و دررفت طبقات که در فرایند طراحی از اهمیت بسزایی برخوردار می‌باشند، انجام گرفته است. ملاحظه گردید که تغییرات پارامتر دررفت تحت رکوردهای حوزه نزدیک حاوی پالس سرعت با افزایش ارتفاع سازه، بویژه در طبقات فوقانی، نمود بیشتری دارد. همچنین، نمود این ساز و کار نیز در پارامترهای پاسخ دینامیکی سازه‌های مطالعاتی با مدل‌ولاسیون یکنواخت، به روشنی دیده شد. افزون بر آن، بر اساس ارزیابی روند ایجاد تغییرشکل دینامیکی در سازه‌های مطالعاتی تحت تاثیر رکوردهای نیرومند زلزله و همچنین بررسی ساختار مفاصل پلاستیک تشکیل شده در اسکلت مقاوم، وجود نیاز بزرگ شکل‌پذیری تایید می‌گردد. نکته دیگر آن که با گذر از پالس پیوسته و پردامنه سرعت، ویژگی‌های رفتار لرزه‌ای سازه‌های مطالعاتی به شدت وارد حوزه غیرخطی می‌شوند.

واژگان کلیدی

پیکربندی سازه‌ای، اسکلت فولادی، قاب محیطی دسته شده، رکورد حوزه نزدیک، پالس سرعت، دررفت

Assessment of the influences of resistant skeletal configuration on the seismic behavior of high-rise steel buildings with bundled tube system

Y. Azizi, A. Ahmadi, M. Azhdarifar, A. Meshkat-Dini

Abstract

In this paper, the seismic performance of bundled-tube structures in high-rise steel buildings was assessed under near-field earthquake records through conducting of nonlinear dynamic time history analyses. Three different structural modulations were selected and designed for the resistant skeletons of the studied bundled-tube structures with symmetric plans including 20, 30 and 40 story frameworks, based on the Iranian seismic code 2800 (fourth edition) and the Iranian national building code (Issues 6 and 10). The results were assessed based on the changes in the story lateral displacement and the seismic drift, which were chosen as two significant parameters in structural design process. The story drift variation under the influence of near-field earthquake records containing velocity pulses is more evident in the response of the taller studied structures, especially at higher floors. In addition, this behavior can be observed clearly in the dynamic response of the studied structures with uniform skeletal modulation. The existence of large ductility demands is confirmed according to the analytical assessment of the formation of dynamic displacement mode under powerful earthquake records and the formed plastic hinges mechanisms in the resistant skeleton. By approaching high-amplitude coherent velocity pulses, the characteristics of seismic behavior of the studied structures become intensively nonlinear.

Keywords

Structural configuration, Steel skeleton, Bundled tube structure, Near-field earthquake record, Velocity pulse, Drift

پارامترها و مشخصات رفتاری ساختمان‌های بلند مرتبه از دو دیدگاه اصلی طراحی لرزه‌ای (از منظر مهندسی سازه) و نیز لرزه‌شناسی حرکات نیرومند زمین (از منظر مهندسی زلزله)، قابل بررسی است. همچنین در موضوع عوامل تأثیرگذار در مشخصات رفتار دینامیکی سازه‌ها نیز می‌توان به فرضیات تحلیلی، سیستم‌های مقاوم، مدل‌سازی بارهای دینامیکی و رکوردهای زلزله اشاره کرد. ملاحظه شده که میزان خسارت‌های وارده به ساختمان‌ها به سبب وقوع زلزله به فاکتورهای زیادی از قبیل محتوای فرکانسی، مدت دوام و ماکزیمم دامنه حرکات نیرومند زمین و نیز مشخصات دینامیکی اسکلت مقاوم سازه وابسته است. همچنین در همین راستا، گروه‌بندی رکوردهای زلزله را می‌توان به دو دسته جنبش‌های حوزه نزدیک و حوزه دور از گسل تقسیم بندی نمود. این مفهوم نیز ساده‌ترین معیار برای طبقه‌بندی رکوردهای زلزله است و بطور عمومی بر اساس فاصله تا صفحه شکست گسل سنجیده می‌شود [۶-۱]. دانسته شده که حرکات نیرومند زمین در حوزه نزدیک گسل و با بزرگی بیش از ۵ می‌تواند ایجاد کننده بارهای شدید و بزرگ دینامیکی بر روی سازه‌ها باشند. عامل فاصله ایستگاه لرزه‌نگاری تا صفحه شکست گسل، می‌تواند بر شکل تاریخچه زمانی، میزان و شدت پارامترهای طیفی یک رکورد زلزله تأثیر بگذارد. رکوردهای نیرومند حوزه نزدیک گسل دارای ویژگی‌های مشخصی هستند که آنها را از جنبش‌های حوزه دور متمایز می‌نماید [۹-۷].

تعداد زیادی از جنبش‌های نیرومند زمین با فاصله کمتر از ۲۰ کیلومتر تا صفحه شکست گسل، در هنگام وقوع زلزله‌های بزرگ کالیفرنیا مانند امپریال ولی^۱ ۱۹۷۹، لوماپریتا^۲ ۱۹۸۹، لندرز^۳ ۱۹۹۲، کیپ مندوسینو^۴ ۱۹۹۲ و نیز نورتریج^۵ ۱۹۹۴، همچنین زلزله کوبه^۶ ۱۹۹۵ در ژاپن، ارزینکن^۷ ۱۹۹۲ و کوکالی^۸ ۱۹۹۹ در ترکیه و نیز دو زلزله بزرگ طبس^۹ ۱۹۷۸ و بم^{۱۰} ۲۰۰۳ در ایران، ثبت گردیده‌اند. بر پایه مطالعات لرزه‌شناسی صورت گرفته بر روی رکوردهای نیرومند ثبت شده در زلزله‌های بزرگ ملاحظه گردیده که در فواصل نزدیک به صفحه شکست گسل‌های امتداد لغز^{۱۱}، شیب لغز^{۱۲} و فشاری قائم^{۱۳}، ارتعاشات و لرزش‌های زمین به شدت تحت تأثیر مکانیزم گسل، انتشار گسیختگی^{۱۴} و چگونگی تقویت و تفرق امواج برشی منتشره در محیط پیوسته خاک می‌باشد [۱۵-۱۰].

هم پایه با تأثیرات بارز مکانیزم گسل، یکی از مهم‌ترین

مشخصه‌هایی که در تاریخچه زمانی رکوردهای حوزه نزدیک مشاهده می‌شود، حضور پالس‌های پرانرژی و پر دامنه سرعت و تغییر مکان است. بطور کلی پالس‌های یاد شده، به صورت یک ساختار موج گونه با دامنه بزرگ و پریود بلند (بیش از ۱ ثانیه) ظاهر گردیده که می‌تواند دارای شکل ترکیبی و پیوسته نیز باشد. پالس‌های پیوسته و پرانرژی سرعت بصورت متناظر با پالس‌های شتاب با گام زمانی کمتر از ۱ ثانیه و نیز اسپایک‌های پردامنه و کوتاه مدت با گام زمانی حدود ۰/۲ تا ۰/۳ ثانیه، در تاریخچه زمانی هر دو مولفه افقی موازی^{۱۵} (مولفه LN) و عمود^{۱۶} (مولفه TR) نسبت به صفحه شکست ایجاد می‌گردند. وقوع فرایند نیرومند جهت‌داری شکست سبب می‌شود که بخش بزرگی از انرژی جنبشی ارتعاشات نیرومند زمین، در دامنه زمانی پالس‌های ترکیبی پیوسته و بلند مدت سرعت که در تاریخچه زمانی هر دو مولفه افقی LN و TR آشکار می‌شوند، آزاد گردد. نتایج مطالعات نشان می‌دهد که جنبش نیرومند زمین در حوزه نزدیک گسل با پالس‌های دارای گام زمانی بیش از ۱ ثانیه و نیز زلزله‌های با بزرگی بیش از ۵ و مدت دوام حرکات نیرومند زمین بیش از ۱۰ ثانیه، قابلیت ایجاد چرخه‌های ارتعاشی شدید در رفتار لرزه‌ای سازه‌ها را دارا هستند. وقوع فرایندهای لرزه‌ای فوق، همراه با پدیدار شدن مکانیزم گسترده مفاصل پلاستیک در اسکلت مقاوم سازه و نیز بروز ویژگی‌های رفتار غیرخطی با دامنه بزرگ خواهد بود [۲۱-۱۶].

به علت وجود پالس‌های با پریود بلند و دامنه بزرگ در تاریخچه زمانی رکوردهای نیرومند حوزه نزدیک صفحه شکست گسل، نگاشت طیف فوریه آنها بیشتر به حالت باند باریک^{۱۷} و متناظر با فرکانس‌های پایین (پریودهای متوسط تا بلند) ظاهر می‌گردد. وجود این باند فرکانس‌های پرانرژی نیز می‌تواند سبب پدیدار شدن و گسترش سریع مفاصل غیرخطی در سیستم باربر جانبی سازه‌های میان‌مرتبه تا بلند و وارد شدن ویژگی‌های رفتاری اعضای اصلی اسکلت مقاوم سازه به حوزه غیرخطی بشود. افزون بر آن، به لحاظ نزدیکی پریود پالس (یا پالس‌های) موجود در تاریخچه زمانی این‌گونه رکوردها به پریود ساختمان‌های بلند، بررسی تحلیلی پارامترهای پاسخ لرزه‌ای این سازه‌ها تحت اثر رکوردهای حوزه نزدیک نیز زمینه ساز شناخت دقیق‌تری از ماهیت رفتاری ساختارهای مقاوم با سطوح مختلف طرح لرزه‌ای خواهد بود [۲۵-۲۲].

یکی از سیستم‌های کارآمد در ساخت ساختمان‌های میان مرتبه تا بلند، قاب خمشی محیطی^{۱۸} است. این سیستم متشکل از



چهار قاب صلب صفحه‌ای بوده که در پیرامون پلان سازه قرار گرفته و تشکیل یک ساختار پیوسته را می‌دهند. قاب‌های صلب موازی راستای اعمال بارهای جانبی (با ماهیت استاتیکی)، نقش جان^{۱۹} و دو قاب صلب عمود بر جهت بارگذاری جانبی نیز نقش بال^{۲۰} ساختار مقاوم را دارند. همچنین؛ به سبب عملکرد خمشی-برشی شاه‌تیرهای عمیق قرار گرفته در محیط پلان اسکلت مقاوم، یک برآیند بزرگ نیروی محوری در ستون‌های گوشه‌ای پلان ایجاد شده و توزیع ناهماهنگ تنش داخلی سایر ستون‌ها را نیز در پی دارد. این پدیده با نام تاخیر برش یا لنگی برش^{۲۱} معروف است. اثرات مذکور سبب ایجاد قیده‌های پیکربندی هندسی و نیز محدودیت ارتفاعی برای اسکلت مقاوم در حدود ۵۰ تا ۸۰ طبقه گردیده است [۲۶-۲۸].

با وجود کارایی سازه‌ای بالا در رفتار قاب محیطی خمشی، قابلیت استفاده از ظرفیت کامل اسکلت مقاوم در ارتباط با تغییرات ناهمگون پارامترهای سختی و مقاومت، تحت اثر لنگی برش وجود ندارد. با افزودن قاب‌های صلب میانی در اسکلت مقاوم قاب محیطی خمشی و ایجاد یک سازه چند سلولی پیوسته و دسته شده، اثرات پدیده لنگی برش تا اندازه زیادی کاهش می‌یابد. پیچیدگی اثرات لنگی برش تحت بارگذاری زلزله و اعمال هم‌زمان هر سه مولفه LN، TR و مولفه قائم^{۲۲} بسیار بیشتر از حالت استاتیکی است. حرکت جسم صلب تاو‌ه‌های کف طبقات در سازه قاب محیطی دسته شده^{۲۳} سبب یکسان شدن تغییرمکان جانبی قاب‌های صلب تشکیل‌دهنده کل اسکلت مقاوم خواهد شد. وجود قاب‌های صلب داخلی نیز سبب توزیع یکنواخت‌تر تنش برشی و بویژه تنش محوری در المان‌های تیر-ستون پیرامونی پلان این سازه نسبت به قاب محیطی خمشی منفرد می‌گردد [۲۹-۳۲].

موضوع این پژوهش، مطالعه مشخصات رفتار لرزه‌ای ساختمان‌های میان مرتبه تا بلند با سازه قاب خمشی محیطی دسته شده تحت اعمال تغییرات مدولاسیون اسکلت مقاوم و تیپ‌بندی المان‌های اصلی در راستای ارتفاع سازه می‌باشد. همچنین یک ارزیابی تحلیلی بر روی روند تغییرات پارامترهای پاسخ لرزه‌ای چندین مدل مطالعاتی با سیستم مقاوم یاد شده، تحت اثر یک مجموعه رکوردهای سه مولفه‌ای زلزله صورت گرفته است. رکوردهای نیرومند حوزه نزدیک انتخابی در این پژوهش از سه زلزله بزرگ بم و طیس ایران و نورتریج کالیفرنیا انتخاب گردیده است [۳۲].

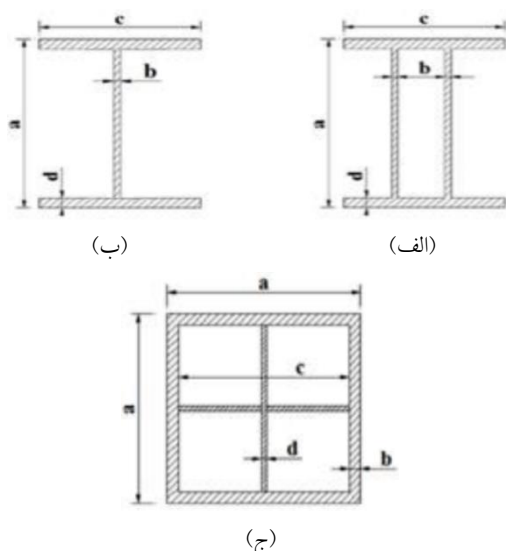
رکوردهای زلزله انتخابی در این پژوهش، حاوی ساختارهای پیرامنه پالس و اسپایک سرعت در تاریخچه زمانی هر دو مولفه

افقی LN و TR می‌باشند. پدیدار شدن این ساختارهای پیوسته و بلند مدت، تداعی‌کننده تحریکات نیرومند دینامیکی بصورت جنبش‌های ضربه‌ای زمین در حوزه نزدیک به صفحه شکست گسل است. دامنه این پالس‌ها و مدت دوام حرکات نیرومند زمین نیز بستگی مستقیم به جهت اصلی انتشار امواج زلزله دارد. نتایج مطالعات نشان می‌دهند که یک اندرکنش اساسی میان دو فرایند انتشار امواج زلزله و نیز مکانیزم گسیختگی گسل برقرار است. شناخت عوامل دخیل در موضوع فوق، تبیین‌کننده پدیده جهت‌داری شکست^{۲۴} و چگونگی تأثیرات آن در مشخصات فیزیکی رکوردهای زلزله ثبت شده در فواصل کمتر از ۲۰ کیلومتر تا صفحه گسیختگی و شکست گسل می‌باشد [۳۵-۳۳].

۲- سازه‌های مطالعاتی با ساختار قاب خمشی محیطی دسته شده

سازه‌های مطالعاتی در این پژوهش از نوع قاب محیطی دسته شده با پلان متقارن و منظم می‌باشند که بر اساس ضوابط لرزه‌ای استاندارد ۲۸۰۰ (ویرایش چهارم) و مبحث دهم مقررات ملی ساختمان طراحی شده اند [۳۶ و ۳۷]. سیستم قاب محیطی دسته شده علاوه بر چهار قاب صلب که در پیرامون سازه قرار گرفته، از قاب‌های صلب داخلی نیز تشکیل شده است. توزیع تعدیل یافته نیروهای محوری ستون‌ها سبب کاهش اثرات لنگی برش شده و به تبع آن پارامترهای نیاز لرزه‌ای دریافت، برش پایه و همچنین روند شکل‌گیری مفاصل پلاستیک در اسکلت سازه نیز دارای نمود کوچک‌تری خواهند بود [۳۸]. شکل‌های (۱) و (۲) جزئیات پلان، نما و مقاطع سازه‌های مطالعاتی را نشان می‌دهد. این سازه‌ها دارای پلان مشابه بوده و در سه ارتفاع ۲۰، ۳۰ و ۴۰ طبقه و با سه پیکربندی و مدولاسیون ۴، ۵ طبقه‌ای و یکنواخت طراحی گردیده‌اند. مطابق شکل (۱) پلان مدل‌ها در دو جهت X و Y دارای ۶ دهانه به طول ۶ متر است. ارتفاع طبقات ۳/۵ متر در نظر گرفته شده و منطقه پروژه دارای خطر نسبی زیاد است و خاک ساختمانی از نوع ۲ می‌باشد.

ضریب رفتار برای سازه‌های مطالعاتی برابر با ۵ با قابلیت شکل‌پذیری متوسط لحاظ شده و تعیین بارگذاری نیز بر طبق مبحث ششم مقررات ملی ساختمان است. بارگذاری مرده برای تمام طبقات برابر با 500 kg/m^2 و بار زنده در طبقات 200 kg/m^2 و برای تراز $z=H$ (تراز بام) 150 kg/m^2 می‌باشد [۳۹]. مقادیر پریرود پنج مود اول ارتعاشی سازه‌های مطالعاتی با سه نوع مدولاسیون اسکلت مقاوم، در جداول (۱) تا (۳) و همچنین نیم‌رخ مقاطع سازه‌های با مدولاسیون



شکل ۲- مقاطع المان‌های سازه‌های مطالعاتی؛ (الف) نیمرخ المان‌های تیر در سازه‌های مطالعاتی ۳۰ و ۴۰ طبقه $(B \times b \times c \times d)$ ، (ب) نیمرخ المان‌های تیر در سازه‌های مطالعاتی ۲۰ طبقه $(B \times b \times c \times d)$ ، (ج) نیمرخ ستون‌ها همراه با بخش سخت کننده داخلی در پنج طبقه اول سازه‌های ۳۰ و ۴۰ طبقه $(C \times a \times b \times c \times d)$ [۴۰]

جدول ۱- پریود سه مود اول ارتعاشی سازه مطالعاتی ۲۰ طبقه

پیکربندی اسکلت مقاوم	مود ۱ (انتقالی X و Y) sec	مود ۲ (انتقالی X و Y) sec	مود ۳ (پیچشی) sec
مدولاسیون ۴ طبقه‌ای	۳/۱۲	۲/۳۸	۱/۲۳
مدولاسیون ۵ طبقه‌ای	۲/۹۹	۲/۲۹	۱/۰۸
مدولاسیون یکنواخت	۲/۹۴	۲/۲۶	۱/۰۱

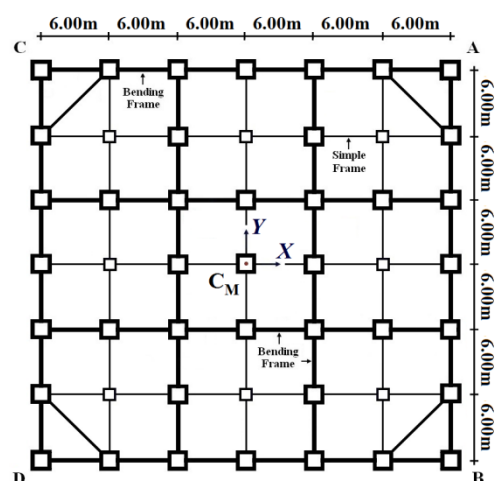
جدول ۲- پریود سه مود اول ارتعاشی سازه مطالعاتی ۳۰ طبقه

پیکربندی اسکلت مقاوم	مود ۱ (انتقالی X و Y) sec	مود ۲ (انتقالی X و Y) sec	مود ۳ (پیچشی) sec
مدولاسیون ۴ طبقه‌ای	۳/۹۳	۲/۹۵	۱/۵۰
مدولاسیون ۵ طبقه‌ای	۳/۸۷	۲/۹۰	۱/۴۴
مدولاسیون یکنواخت	۳/۸۱	۲/۸۶	۱/۳۹

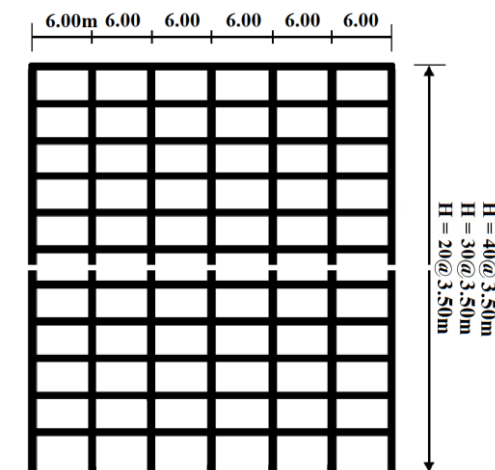
جدول ۳- پریود سه مود اول ارتعاشی سازه مطالعاتی ۴۰ طبقه

پیکربندی اسکلت مقاوم	مود ۱ (انتقالی X و Y) sec	مود ۲ (انتقالی X و Y) sec	مود ۳ (پیچشی) sec
مدولاسیون ۴ طبقه‌ای	۴/۵۹	۳/۳۵	۱/۸۷
مدولاسیون ۵ طبقه‌ای	۴/۵۳	۳/۳۲	۱/۸۱
مدولاسیون یکنواخت	۴/۸۳	۳/۵۴	۱/۷۹

۵ طبقه‌ای در جداول (۴) تا (۶) مربوط به پیکربندی‌های ۲۰، ۳۰ و ۴۰ طبقه آورده شده‌اند. با بررسی پریودهای مودال سازه‌های مطالعاتی، به دلیل بیشتر بودن زمان تناوب مود اول انتقالی نسبت به نخستین مود پیچشی، ماهیت رفتاری به صورت پیچشی سخت می‌باشد. همچنین، ارزیابی دو معیار محدودیت جابجایی نسبی طبقات و رعایت اصل ستون قوی-تیر ضعیف در روند طراحی لحاظ شده است.



(الف)



(ب)

شکل ۱- سازه‌های مطالعاتی قاب خمشی محیطی دسته شده با پیکربندی ۲۰، ۳۰ و ۴۰ طبقه؛ (الف) پلان سازه شامل صفحات قاب‌های خمشی (خطوط پررنگ) و صفحات قاب‌های ساده مفصلی (خطوط نازک)؛ (ب) نمای سازه‌های مطالعاتی C_M نمایش گر مرکز جرم طبقه می‌باشد. سه مدولاسیون ۴، ۵ طبقه‌ای و یکنواخت در پیکربندی اسکلت سازه‌های مطالعاتی در نظر گرفته شده است [۴۰].

جدول ۴- مقاطع اعضای سازه مطالعاتی قاب خمشی محیطی دسته شده ۲۰ طبقه با مدولاسیون ۵ طبقه‌ای، (ابعاد به mm، شکل (۲))

گروه طبقات	ستون‌های داخلی و خارجی (قاب‌های صلب)	تیرها (قاب‌های صلب)	گروه طبقات	ستون‌های داخلی (قاب‌های مفصلی)
۱-۵	C 600×30	B 500×15×350×25	۱-۴	C 500×25
۶-۱۰	C 550×25	B 450×15×350×25	۵-۸	C 450×20
۱۱-۱۵	C 500×20	B 450×10×350×25	۹-۱۲	C 400×15
۱۶-۲۰	C 450×15	B 400×10×300×20	۱۳-۱۶	C 350×15
-	-	-	۱۷-۲۰	C 300×10

جدول ۵- مقاطع اعضای سازه مطالعاتی قاب خمشی محیطی دسته شده ۳۰ طبقه با مدولاسیون ۵ طبقه‌ای، (ابعاد به mm، شکل (۲))

گروه طبقات	ستون‌های داخلی و خارجی (قاب‌های صلب)	ستون‌های داخلی (قاب‌های مفصلی)	تیرها (قاب‌های صلب)
۱-۵	C 800×30 & 740×20 (سخت کننده)	C 600×30	B 500×15×500×20
۶-۱۰	C 750×30	C 550×25	B 450×15×500×20
۱۱-۱۵	C 700×25	C 500×25	B 450×15×500×20
۱۶-۲۰	C 650×25	C 450×20	B 400×15×450×20
۲۱-۲۵	C 600×20	C 400×15	B 400×15×350×20
۲۶-۳۰	C 550×20	C 350×10	B 350×10×300×10

طرح نیمرخ المان‌های سازه‌ای در شکل (۲) مشهود است. نشانه B بیان‌گر نیمرخ تیرها و C نیز نماد معرف ستون‌ها می‌باشد. مشخصات طراحی دو مدولاسیون دیگر نیز به روش مشابه تعیین شده است. نکته دیگر آن که طرح مقطع کلیه المان‌های تیر اتصال در قاب‌های ساده داخلی با اتصالات مفصلی، به صورت شکل (۲-ب) بوده و ابعاد مربوطه نیز به قرار B 350×10×150×20، B 350×15×150×25 و B 350×20×150×25 میلیمتر به ترتیب برای پیکربندی‌های ۲۰، ۳۰ و ۴۰ طبقه است. ارزیابی و بررسی ملاحظات مرتبط با درستی و کارآمدی طرح لرزه‌ای سازه‌های مطالعاتی با پیکربندی‌های مختلف، همراه با پردازش و نگرش دقیق

جدول ۶- مقاطع اعضای سازه مطالعاتی قاب خمشی محیطی دسته شده ۴۰ طبقه با مدولاسیون ۵ طبقه‌ای، (ابعاد به mm، شکل (۲))

گروه طبقات	ستون‌های داخلی و خارجی (قاب‌های صلب)	ستون‌های داخلی (قاب‌های مفصلی)	تیرها (قاب‌های صلب)
۱-۵	C 900×30 & 840×20 (سخت کننده)	C 750×30	B 500×15×500×25
۶-۱۰	C 850×30	C 700×25	B 500×15×500×25
۱۱-۱۵	C 800×30	C 650×20	B 500×15×500×25
۱۶-۲۰	C 750×30	C 600×20	B 500×15×500×25
۲۱-۲۵	C 700×20	C 550×20	B 500×15×500×25
۲۶-۳۰	C 650×25	C 500×15	B 400×15×350×20
۳۱-۳۵	C 600×20	C 450×15	B 350×10×350×10
۳۶-۴۰	C 550×20	C 400×10	B 300×20×350×10

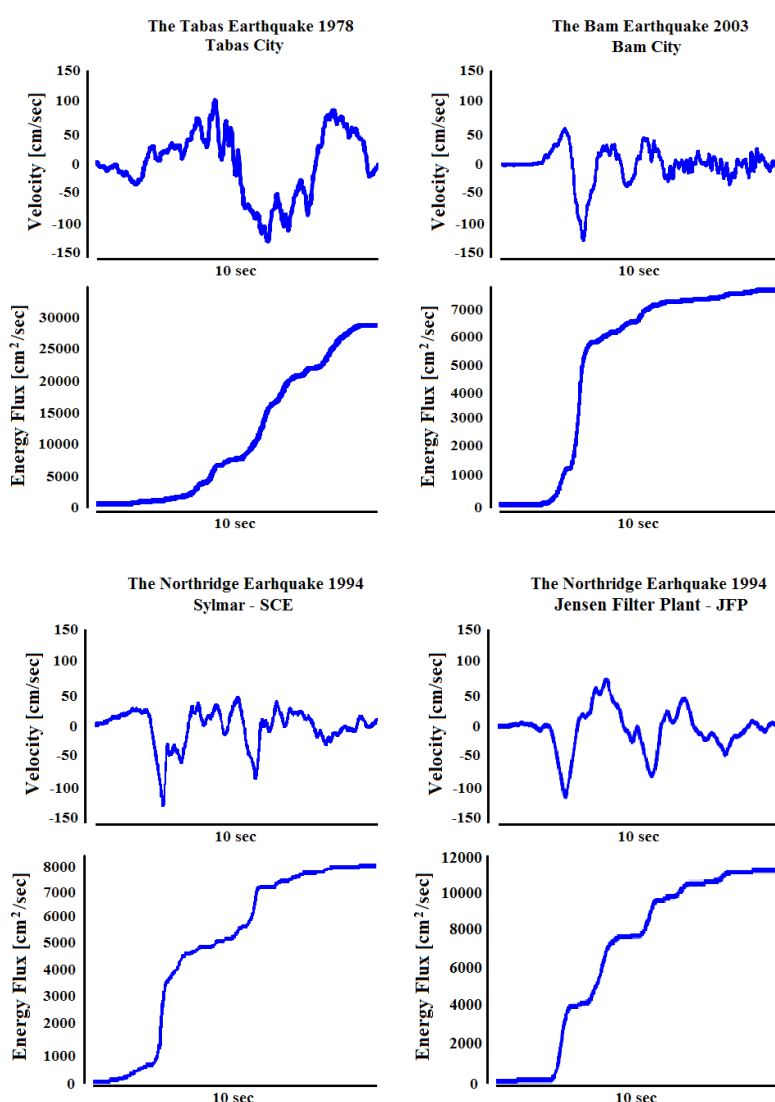
تحلیلی، با توجه به ضوابط آیین‌نامه‌های مذکور صورت گرفته و به انجام رسیده است [۴۰].

۳- ویژگی‌های رکوردهای نیرومند حوزه نزدیک

بر پایه نتایج حاصل از مطالعات لرزه‌شناسی جنبش‌های نیرومند زمین در زلزله‌های بزرگ می‌توان معیار فاصله کمتر از ۲۰ کیلومتر تا صفحه شکست و مکانیزم گسیختگی گسل را به عنوان حوزه در برگیرنده اثرات نیرومند انتشار امواج زلزله و پدیدار شدن خصوصیات فرایند جهت‌داری پیش‌رونده^{۲۵} در نظر گرفت. همچنین در ناحیه نزدیک گسل، ویژگی‌های فیزیکی ارتعاشات زمین به نحو قابل توجهی از عواملی نظیر مکانیزم گسیختگی، راستا و جهت گسترش گسیختگی به سمت ساختمانگاه و نیز جابجایی دایمی زمین که از لغزش گسل ناشی می‌شود، تأثیر می‌پذیرد. حرکات ضربه‌ای و موج‌گونه زمین که از مشخصات اصلی جنبش‌های نیرومند حوزه نزدیک است، به لحاظ بررسی رفتار لرزه‌ای سه بعدی سازه‌ها از اهمیت بسزایی برخوردار می‌باشد. ارزیابی ویژگی‌های فیزیکی جنبش‌های نیرومند ثبت شده در حوزه نزدیک گسل و اثرات آن بر عملکرد ساختمان‌های میان مرتبه تا بلند، یک موضوع شاخص در مبحث طراحی لرزه‌ای است. در همین خصوص نیز پرپود پالس^{۲۶} نقش مهمی را در روند ایجاد و گسترش تغییرشکل غیرالاستیک ایفا

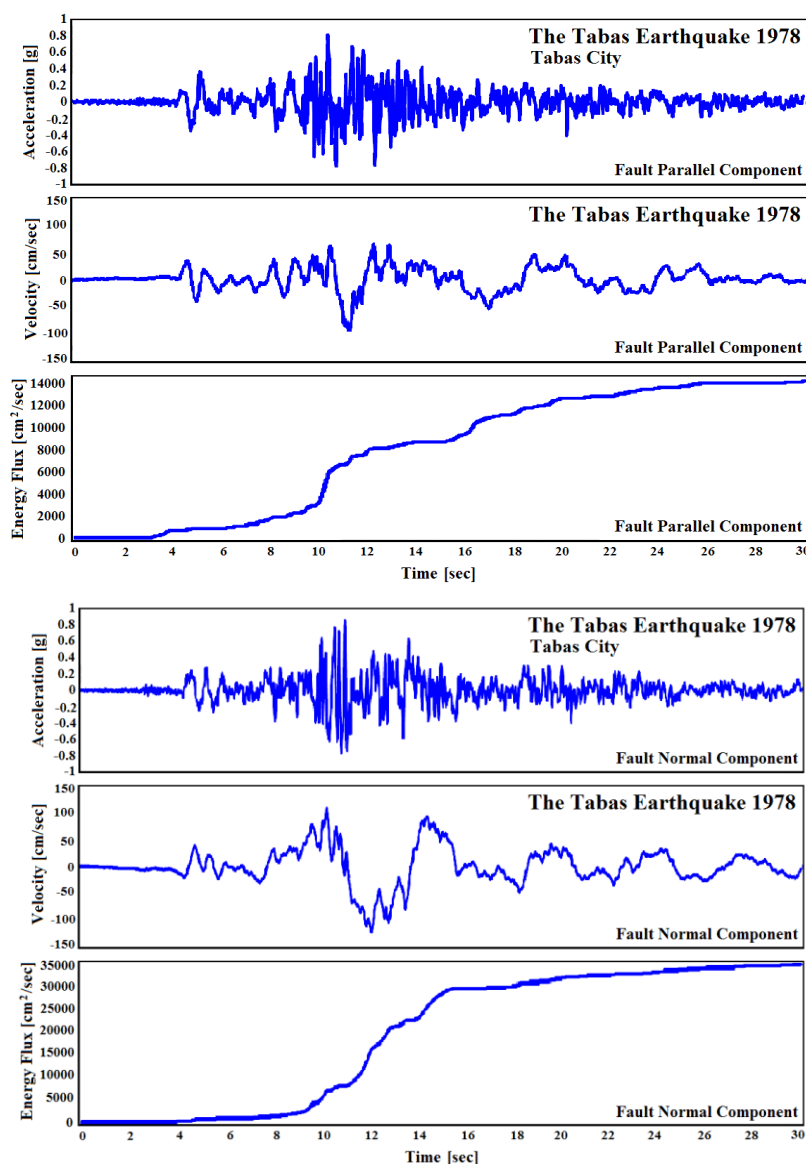
پالس‌های سرعت و جابجایی زمین در تاریخچه زمانی آنها پدیدار گردد [۴۱ و ۴۲]. نمودارهای تاریخچه زمانی نشان داده شده در شکل‌های (۳) تا (۵) نمونه‌هایی از اثرات فرایند جهت‌داری پیش‌رونده است. حضور اثرات جهت‌داری پیش‌رونده در ماهیت رکوردهای حوزه نزدیک، سبب ایجاد اسپایک‌های پرانرژی در تاریخچه زمانی شتاب و نیز پالس‌های بلند مدت و پدیده در تاریخچه زمانی سرعت و جابجایی زمین می‌گردد. پالس‌های بزرگ تغییر مکان و جنبش‌های نیرومند ضربه‌ای زمین در زلزله‌های بزرگ، سبب افزایش پارامترهای برش پایه، نیاز شکل‌پذیری و جابجایی نسبی (دریفت) طبقات در رفتار لرزه‌ای ساختمان‌های میان مرتبه تا بلند خواهند شد [۴۳-۴۶].

می‌کند. نزدیکی پریود پالس بزرگ موجود در تاریخچه زمانی رکوردهای حوزه نزدیک به پریود ارتعاش آزاد اسکلت سازه‌ای، سبب تشدید قابل توجه پارامترهای پاسخ لرزه‌ای می‌گردد. مشخصات پاسخ دینامیکی سازه‌ها تحت رکوردهای نیرومند زلزله، به روند گسیختگی و الگوی انتشار اثرات جهت‌داری (راستای گسلش) وابسته است. ملاحظه شده که مشخصات فیزیکی رکوردهای ثبت شده در حوزه نزدیک گسل دارای تفاوت چشمگیری نسبت به رکوردهای حوزه دور از صفحه گسلش می‌باشند. همچنین در حالی که ممکن است، تفاوت ظاهری چندانی میان تاریخچه شتاب-زمان دو رکورد نیرومند زلزله نباشد، این احتمال وجود دارد که آرایش‌های مختلفی از



شکل ۳- تاریخچه زمانی پالس پیوسته ترکیبی سرعت متناظر با مولفه شتاب نیرومندتر عمود بر صفحه شکست گسل (مولفه TR) و منحنی تجمعی آزاد شدن انرژی جنبشی رکوردهای حوزه نزدیک TAB 1978، BAM 2003، SCE 1994 و JFP 1994 (جدول (۷))

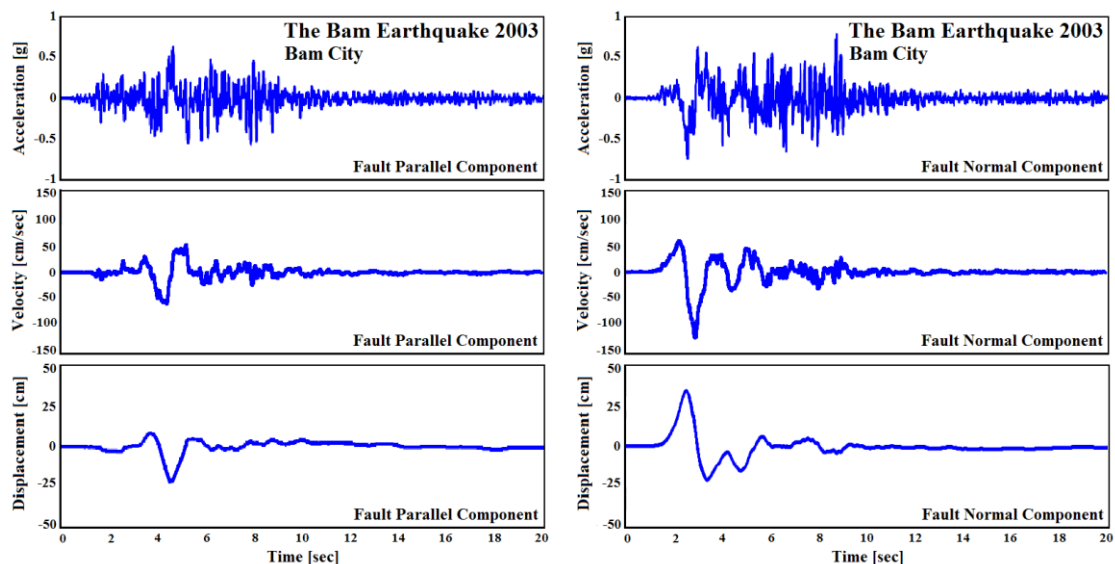




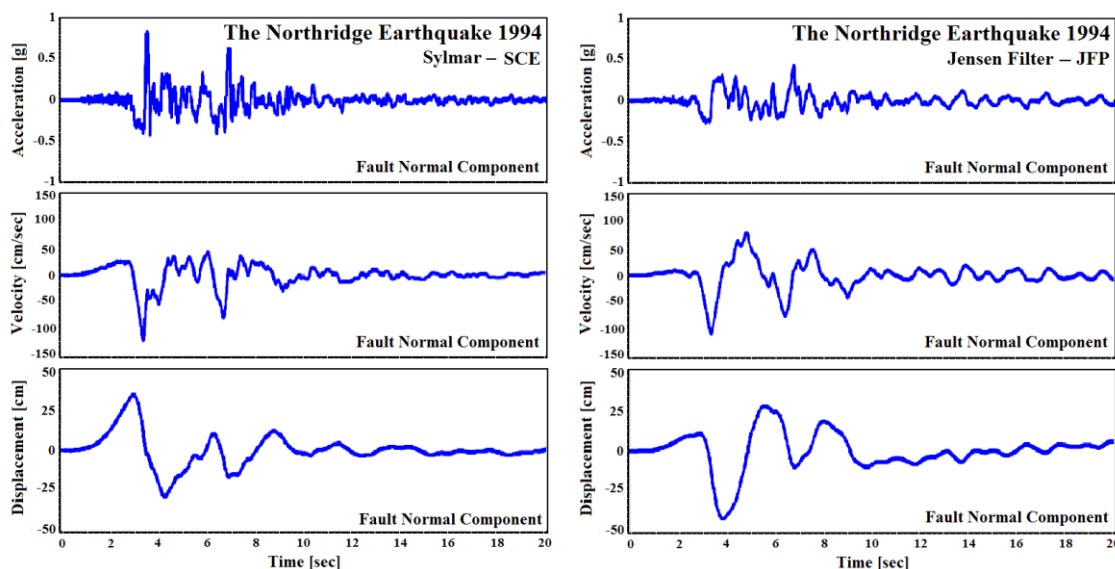
شکل ۴- تاریخچه زمانی شتاب و سرعت متناظر با دو مولفه موازی و عمود نسبت به صفحه شکست گسل (مولفه‌های LN و TR) و منحنی تجمعی آزاد شدن انرژی جنبشی رکورد اصلی زلزله Tabas 1978 ایران

آزاد شدن تجمعی انرژی جنبشی رکورد پدیدار خواهد شد. مطابق شکل‌های (۳) و (۴)، وقوع پرش در منحنی انرژی در بازه زمانی پالس سرعت صورت می‌گیرد. ملاحظه می‌شود که در تاریخچه رکورد BAM پالس اصلی سرعت، به نسبت کوتاه مدت بوده و یک پرش بزرگ برای روند آزاد شدن انرژی جنبشی در همان محدوده زمانی رخ می‌دهد. همچنین در تاریخچه رکورد TAB نیز یک پالس بلند مدت سرعت وجود دارد که منجر به آزادسازی انرژی جنبشی با شیب طولانی و ملایم می‌شود. روند آزاد شدن انرژی جنبشی تحت رکوردهای SCE و JFP به علت وجود پالس ترکیبی و چند موجی سرعت (شکل ۵))، به صورت پلکانی است.

شکل (۳) نمایش‌گر چگونگی تغییرات و روند تجمعی آزاد شدن انرژی جنبشی چندین رکورد حوزه نزدیک حاوی پالس ترکیبی پر دامنه و بلند مدت سرعت است. شکل و نمود پالس‌های سرعت می‌تواند به صورت یک موج بزرگ شبه‌سینوس و نیز یک ساختار ترکیبی حاوی چند موجک مثلثاتی باشد. بازه زمانی پریود این پالس‌ها در محدوده ۲ تا ۶ ثانیه است که نزدیک به پریود طبیعی ساختمان‌های ۱۵ تا ۵۰ طبقه نیز می‌باشد. نمود مشخص فرایند هم‌افزایی امواج برشی زلزله تحت اثر پدیده جهت‌داری، پدیدار شدن پالس‌های بزرگ سرعت است. روند آزاد شدن انرژی جنبشی رکورد نیز در یک بازه زمان کوتاه صورت می‌گیرد. بر این اساس یک پرش مشخص در نمودار



(الف)



(ب)

شکل ۵- نمودار تاریخچه زمانی متناظر شتاب، سرعت و تغییر مکان زمین مربوط به رکوردهای حوزه نزدیک در جدول (۷)، (الف) مولفه‌های افقی موازی (مولفه LN) و عمود بر صفحه شکست گسل (مولفه TR) متناظر با رکورد BAM 2003 و (ب) مولفه نیرومندتر عمود بر صفحه شکست گسل (مولفه TR) متناظر با رکوردهای SCE 1994 و JFP 1994

ساختمان را نشان می‌دهند. رکوردهای انتخابی در این تحقیق، توصیف کننده ماهیت و مشخصات واقعی بارگذاری ناشی از زلزله‌های بسیار نیرومند می‌باشند. وضعیت و چگونگی تغییرات پارامترهای رفتار دینامیکی غیرخطی سازه‌های مطالعاتی این پژوهش، تحت اثر این چهار رکورد نیرومند حوزه نزدیک مورد ارزیابی قرار گرفته است. مشخصات رکوردهای انتخابی نظیر بیشینه شتاب زمین (PGA)، بیشینه سرعت زمین (PGV) و بیشینه تغییر مکان زمین (PGD) در جدول (۷) نشان داده شده‌اند [۴۷].

مطالعات این پژوهش تحت اثر چهار رکورد نیرومند انتخاب شده از زلزله‌های بزرگ شهرهای بم، طبس ایران و نورتریج کالیفرنیا صورت گرفته است. تاریخچه زمانی سه مولفه‌ای این رکوردها حاوی اثرات پر قدرت جهت‌داری، پالس‌های پر انرژی سرعت همراه با اسپایک‌های پر دامنه شتاب می‌باشند. این چهار رکورد زلزله در زمره نیرومندترین جنبش‌های ثبت شده در حوزه نزدیک یک گسل فعال بوده و ویژگی‌های بارز فرایند پر قدرت جهت‌داری گسیختگی و انتشار امواج لرزه‌ای پر انرژی در

جدول ۷- مشخصات فیزیکی و لرزه شناسی رکوردهای انتخابی [۴۷]

PGD/PGV (sec)	PGV/PGA (sec)	بزرگا (M _w)	PGD (cm)	PGV (cm/s)	PGA (g)	مولفه*	رکورد زلزله فاصله تا صفحه شکست
۰/۴۰	۰/۱۲	۷/۴	۳۹/۹	۹۷/۷	۰/۸۳۶	LN	Tabas 1978 Tabas City (TAB) 3.0 km
۰/۷۸	۰/۱۴		۹۴/۵	۱۲۱/۳	۰/۸۵۱	TR	
۰/۳۷	۰/۰۶		۱۷/۰	۴۵/۵	۰/۶۸۸	UP	
۰/۳۴	۰/۰۹	۶/۶	۲۰/۷	۵۹/۶	۰/۶۳۵	LN	Bam 2003 Bam City (BAM) 1.0 km
۰/۳۰	۰/۱۶		۳۷/۴	۱۲۳/۷	۰/۷۹۳	TR	
۰/۲۶	۰/۰۳		۱۰/۱۱	۳۷/۶۶	۰/۹۹۹	UP	
۰/۴۴	۰/۱۱	۶/۷	۴۵/۲۸	۱۰۲/۲۳	۰/۸۹۷	LN	Northridge 1994 Sylmar (SCE) 6.40 km
۰/۴۶	۰/۱۹		۵۴/۱۶	۱۱۷/۴۷	۰/۶۱۲	TR	
۰/۷۴	۰/۰۶		۲۵/۶۳	۳۴/۵۹	۰/۵۸۶	UP	
۰/۲۴	۰/۱۶	۶/۷	۲۳/۹۶	۹۹/۱۰	۰/۵۹۳	LN	Northridge 1994 Jensen Filter (JFP) 6.10 km
۰/۴۷	۰/۲۵		۵۰/۶۹	۱۰۵/۹۵	۰/۴۲۴	TR	
۰/۲۶	۰/۰۸		۸/۸۹	۳۳/۹۱	۰/۳۹۹	UP	

* LN: مولفه موازی با صفحه شکست گسل، TR: مولفه عمود بر صفحه شکست گسل و UP: مولفه قائم

قاب‌های با اتصالات مفصل صورت گرفته است (شکل (۱)). مشخصات تحلیلی مذکور بر اساس توصیه‌های Fema اختصاص داده شده و همچنین پردازش‌ها و سنجش‌های موضوعی در برپا کردن مدل تحلیلی سازه‌های مطالعاتی نیز بصورت کامل در نظر گرفته شده است [۴۸-۵۰]. شایان ذکر است که همگی تحلیل‌های غیرخطی تاریخچه زمانی تحت اعمال رکوردهای مقیاس شده، با نرم افزارهای کاربردی مهندسی عمران انجام گردید [۵۱ و ۵۲].

۴- پارامترهای پاسخ سازه های مطالعاتی

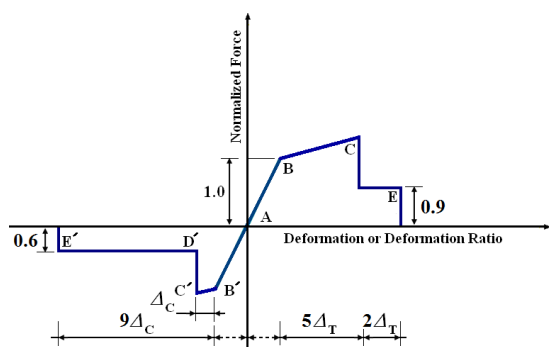
پوش بیشینه پارامترهای شتاب مطلق، تغییر مکان جانبی و دریافت طبقات سازه‌های مطالعاتی بر اساس نتایج تحلیل‌های غیرخطی دینامیکی تاریخچه زمانی تحت رکوردهای مقیاس شده بدست آمده و به ترتیب در شکل‌های زیر نمایش داده شده‌اند. نمایش عددی ستون عمودی نمودارها بصورت ارتفاع نسبی سازه بوده و محور افقی نیز مربوط به پارامترهای پاسخ فوق است که در راستای لا پلان (همسو با مولفه TR) محاسبه شده‌اند. مطابق با شکل (۷)، بیشینه برش پایه برای سازه‌های مطالعاتی تحت اثر چهار رکورد حوزه نزدیک نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که برش پایه تحت رکوردهای حوزه نزدیک به دلیل پدیدار شدن ساختارهای موج گونه در تاریخچه زمانی سرعت زمین،

ماهیت ضربه‌ای پالس‌های بزرگ تغییر مکان در حوزه نزدیک گسل سبب افزایش شدید پارامترهای برش پایه، نیروی محوری ستون‌ها، نیاز شکل‌پذیری و دریافت طبقات، بویژه برای ساختمان‌های با اسکلت قاب خمشی میان مرتبه تا بلند خواهد شد. اهمیت این موضوع با افزایش یافتن مدت دوام حرکات نیرومند زمین در بازه زمانی رکورد زلزله دو چندان خواهد شد. همگی رکوردهای جدول (۷) برای سازه های مطالعاتی این پژوهش (با سه پیکربندی اسکلت مقاوم) به روش حداکثر شتاب طیفی زمین و بر اساس استاندارد ۲۸۰۰ (ویرایش چهارم)، مقیاس گردیده و ضرایب مقیاس در جدول (۸) نمایش داده شده اند. هر چهار رکورد سه مولفه‌ای انتخابی TAB، BAM، SCE و JFP دارای اثرات نیرومند جهت‌داری پیش‌رونده هستند. بر پایه نتایج این مطالعه؛ کاربرد ضرایب مقیاس کوچک و نزدیک به ۱ در بسیاری از موارد تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی، می‌تواند سبب حصول وضعیت عملکرد اسکلت مقاوم ساختمان‌های میان مرتبه تا بلند، در محدوده غیرخطی و با دامنه‌های به نسبت بزرگ شود. این موضوع درباره اعمال ضرایب مقیاس بزرگ، به مراتب شدیدتر خواهد بود. مدل‌سازی رفتار غیرخطی اعضاء اسکلت مقاوم نیز بر اساس شکل (۶) با تعریف مفصل پلاستیک اندرکنشی PMM (المان‌های تیر ستون)، مفصل خمشی M (شاه تیرها) و نیز مفصل محوری P برای المان‌های ستون در

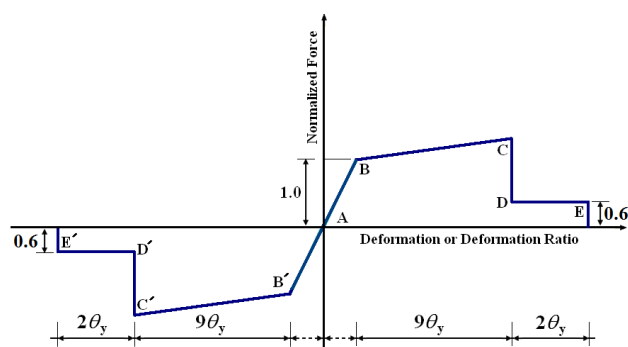


جدول ۸- ضرایب مقیاس رکوردهای سه مولفه‌ای انتخابی

Northridge 1994 (JFP)	Northridge 1994 (SCE)	Tabas 1978 (TAB)	Bam 2003 (BAM)	پیگرندی اسکلت مقاوم	سازه‌های مطالعاتی
$\approx 1/0.0$	$1/64$	$1/76$	$2/43$	طبقه ۴	طبقه ۲۰
$\approx 1/0.0$	$1/51$	$1/70$	$2/26$	طبقه ۵	
$\approx 1/0.0$	$1/47$	$1/67$	$2/19$	یکنواخت	
$1/0.3$	$2/67$	$1/40$	$3/56$	طبقه ۴	طبقه ۳۰
$1/0.4$	$2/55$	$1/44$	$3/45$	طبقه ۵	
$1/0.2$	$2/47$	$1/46$	$3/37$	یکنواخت	
$1/56$	$3/60$	$1/16$	$4/45$	طبقه ۴	طبقه ۴۰
$1/48$	$3/59$	$1/19$	$4/36$	طبقه ۵	
$1/70$	$3/70$	$1/12$	$4/79$	یکنواخت	



(ب)

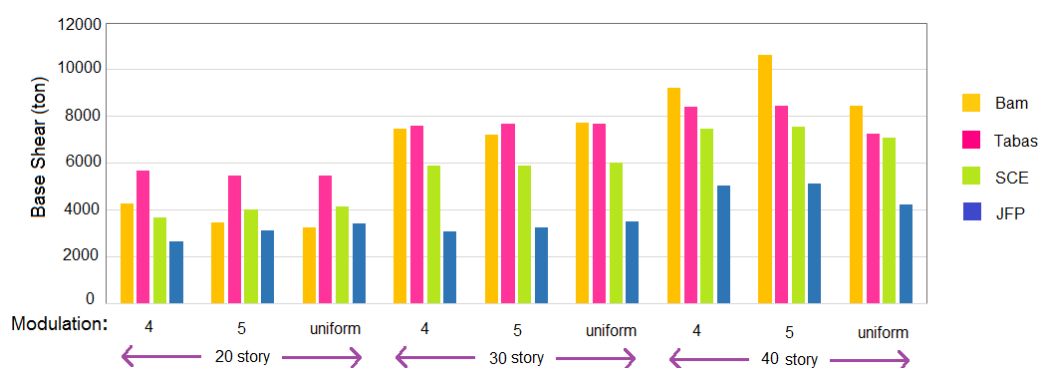


(الف)

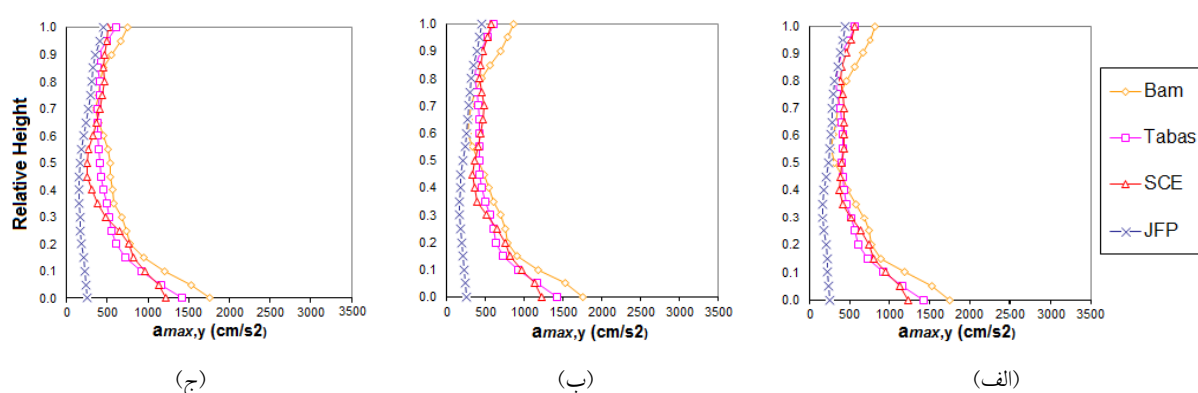
شکل ۶- مدل رفتار غیرخطی المان‌های تیر و ستون در سازه‌های مطالعاتی؛ (الف) مفاصل غیرخطی خمشی M و خمشی-محوری PMM و (ب) مفصل غیرخطی محوری P [۴۸ و ۴۹]

زمین می‌باشد. مشاهده می‌گردد که با تغییر در مدولاسیون اسکلت مقاوم در سه ارتفاع ۲۰، ۳۰ و ۴۰ طبقه، تغییرات قابل ملاحظه‌ای برای این پارامتر پاسخ در راستای ارتفاع سازه‌ها به وجود نمی‌آید. بیشترین میزان تغییرات در بیشینه شتاب مطلق طبقات برای سازه ۴۰ طبقه تحت اثر رکورد بم می‌باشد. مقدار این پارامتر در تراز فنداسیون سازه با مدولاسیون یکنواخت نسبت به دو مدولاسیون ۴ و ۵ طبقه ای، به میزان ۶۲/۵ درصد کاهش می‌یابد. مقادیر شتاب در تراز فنداسیون سازه‌های مطالعاتی تحت اثر رکورد نیرومند BAM در حدود $1/7g$ ، $3/0g$ و $3/5g$ به ترتیب در ساختارهای ۲۰، ۳۰ و ۴۰ طبقه است.

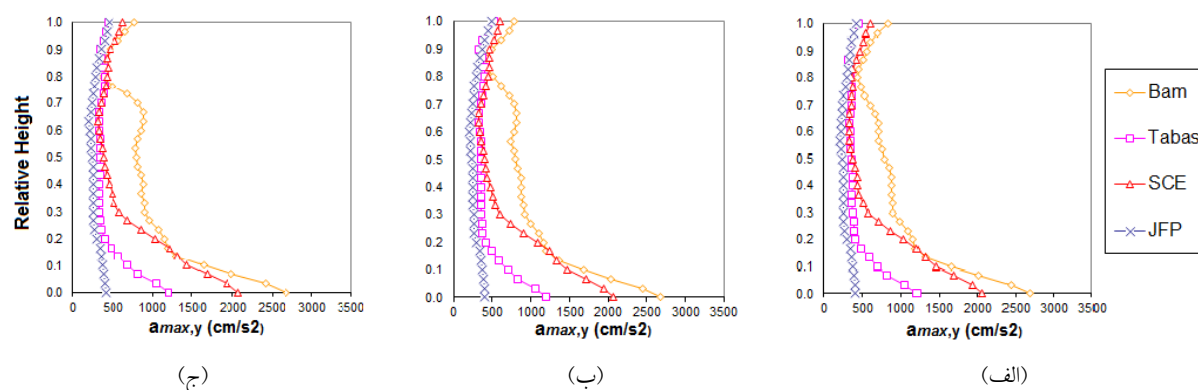
دارای مقادیر بزرگی است. روند صعودی بیشینه برش پایه با افزایش ارتفاع سازه‌های مطالعاتی در ساختارهای ۳۰ و ۴۰ طبقه نیز تندتر می‌شود. مقدار بیشینه برش پایه برای سه حالت مدولاسیون سازه‌ای هر یک از مدل‌های مطالعاتی (به طور جداگانه) تحت رکوردهای انتخابی، چندان تغییر نمی‌نماید. تنها تفاوت قابل توجه برای بیشینه برش پایه در سه اسکلت سازه‌ای ۴۰ طبقه و تحت رکورد BAM رخ داده است. نمودارهای پوش بیشینه شتاب مطلق طبقات در شکل‌های (۸) تا (۱۰) نمایش داده شده‌اند. این پارامتر پاسخ، دارای مقادیر بالا در تراز فنداسیون سازه‌های مطالعاتی است که گویای اثرات نیروهای اینرسی قابل توجه، به سبب وجود پالس مشخص در تاریخچه زمانی سرعت



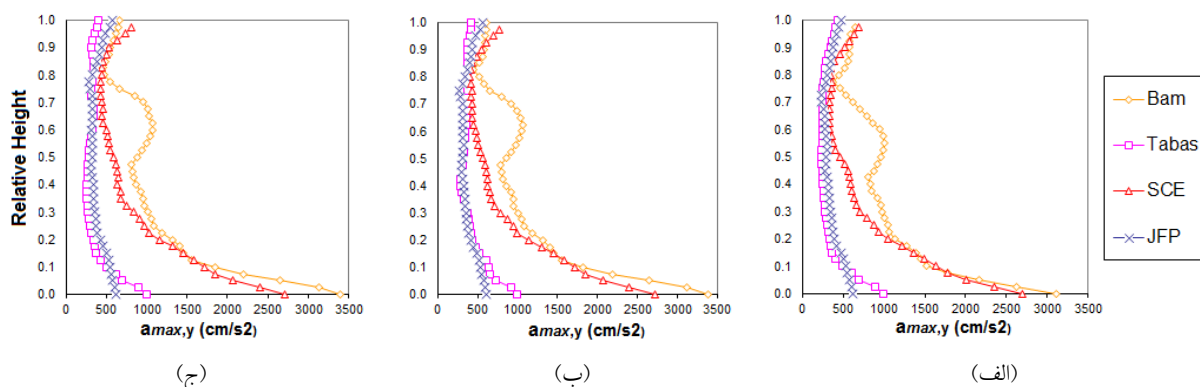
شکل ۷- بیشینه برش پایه در سازه‌های مطالعاتی دارای مدولاسیون اسکلت مقاوم به صورت ۴ طبقه‌ای، ۵ طبقه‌ای و یکنواخت



شکل ۸- پوش ماکزیمم شتاب مطلق طبقات در سازه‌های مطالعاتی ۲۰ طبقه: (الف) مدولاسیون یکنواخت، (ب) مدولاسیون ۵ طبقه‌ای و (ج) مدولاسیون ۴ طبقه‌ای



شکل ۹- پوش ماکزیمم شتاب مطلق طبقات در سازه‌های مطالعاتی ۳۰ طبقه: (الف) مدولاسیون یکنواخت، (ب) مدولاسیون ۵ طبقه‌ای و (ج) مدولاسیون ۴ طبقه‌ای

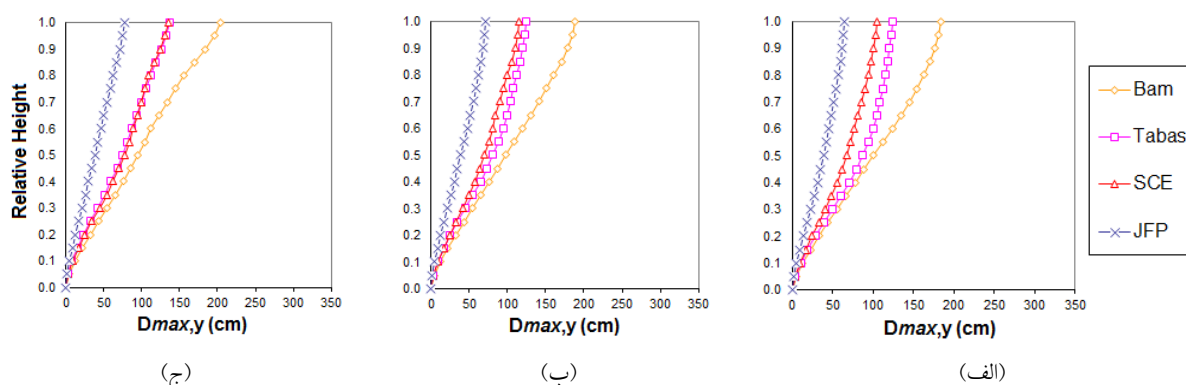


شکل ۱۰- پوش ماکزیمم شتاب مطلق طبقات در سازه‌های مطالعاتی ۴۰ طبقه: (الف) مدولاسیون یکنواخت، (ب) مدولاسیون ۵ طبقه‌ای و (ج) مدولاسیون ۴ طبقه‌ای

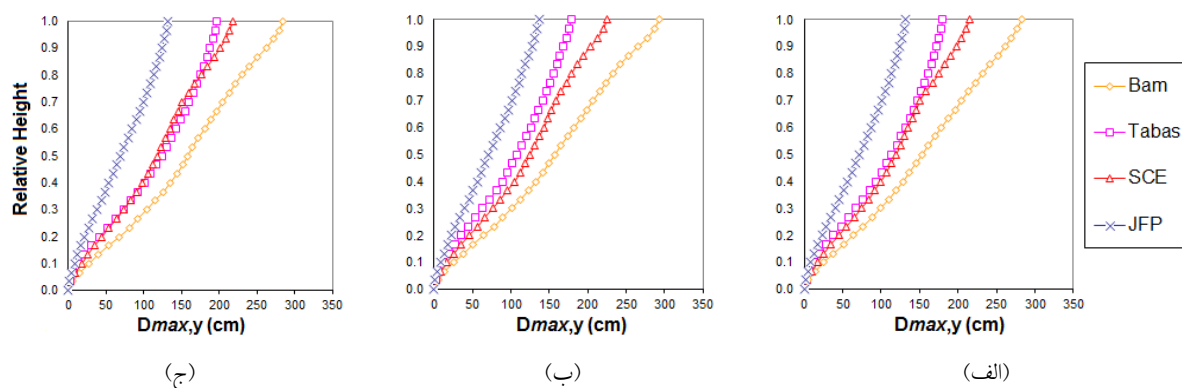
الف) دیده می‌شود، برای سازه ۲۰ طبقه با ساختار مدولاسیون ۴ طبقه‌ای، ماکزیمم دررفت تحت رکوردهای BAM، SCE و TAB در یک تراز فوقانی سازه رخ داده است. بیشینه این پارامتر پاسخ تحت اثر رکورد BAM در حدود ۴/۵ درصد می‌باشد. همچنین با کاربرد دو مدولاسیون ۵ طبقه‌ای و نیز یکنواخت برای اسکلت مقاوم، نمود اثرات دررفت جانبی در بخش‌های میانی و تحتانی سازه در حدود ۳۰۵ درصد می‌باشد، (شکل ۱۴-ب و ج).

ساختار نمودارهای شکل‌های (۱۵) و (۱۶) و نیز بررسی پارامترهای رفتار غیرخطی لرزه‌ای سازه‌های مطالعاتی ۳۰ و ۴۰ طبقه، نشان دهنده پدیدار شدن یک ناهمگونی گسترده برای نمودارهای پوش ماکزیمم دررفت جانبی بوده و نمودی از تأثیرات و اندرکنش پیچیده مودهای ارتعاشی متناظر با هر سه راستای اصلی اسکلت مقاوم را بیان می‌نماید. همچنین بروز روند افزایشی تقاضای دررفت در رفتار لرزه‌ای اسکلت مقاوم با هر سه مدولاسیون، بویژه در ترازهای نیمه بالایی سازه صورت پیدا می‌نماید.

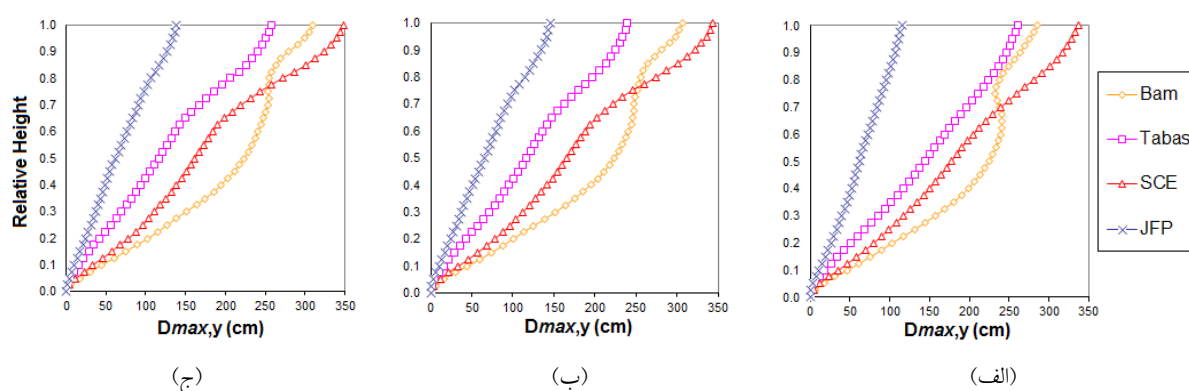
دو پارامتر حداکثر جابجایی و دررفت جانبی طبقات از عوامل مهم جهت ارزیابی لرزه‌ای سازه‌ها به شمار می‌روند. اندازه و چگونگی تغییرات این دو پارامتر پاسخ، تأثیر بسزایی بر طرح سازه به جهت انتخاب و رسیدن به آرایش بهینه اسکلت مقاوم ایفا می‌کند. نمودارهای مربوط به پوش ماکزیمم دو پارامتر تغییرمکان و دررفت جانبی طبقات مدل‌های مطالعاتی با سه مدولاسیون ۴، ۵ طبقه‌ای و نیز یکنواخت، در شکل‌های (۱۱) تا (۱۶) ارائه شده‌اند. ارزیابی مقادیر تغییرمکان‌های حاصل شده تحت اثر رکوردهای نیرومند حوزه نزدیک، گویای آن است که با بلندتر شدن ارتفاع اسکلت مقاوم، آهنگ افزایش این پارامتر پاسخ نیز در تمامی سازه‌های مطالعاتی بیشتر خواهد شد. ماکزیمم تغییرمکان جانبی ایجاد شده در رفتار لرزه‌ای غیرخطی سازه‌های ۲۰ و ۳۰ طبقه تحت رکورد BAM به ترتیب ۲۳۰ و ۲۸۰ سانتیمتر می‌باشد. همچنین ماکزیمم تغییرمکان جانبی مربوط به سازه ۴۰ طبقه نیز تحت رکورد SCE در حدود ۳۵۰ سانتیمتر در تراز بام ($z=H$) است. همان‌طور که در شکل (۱۴-ب)



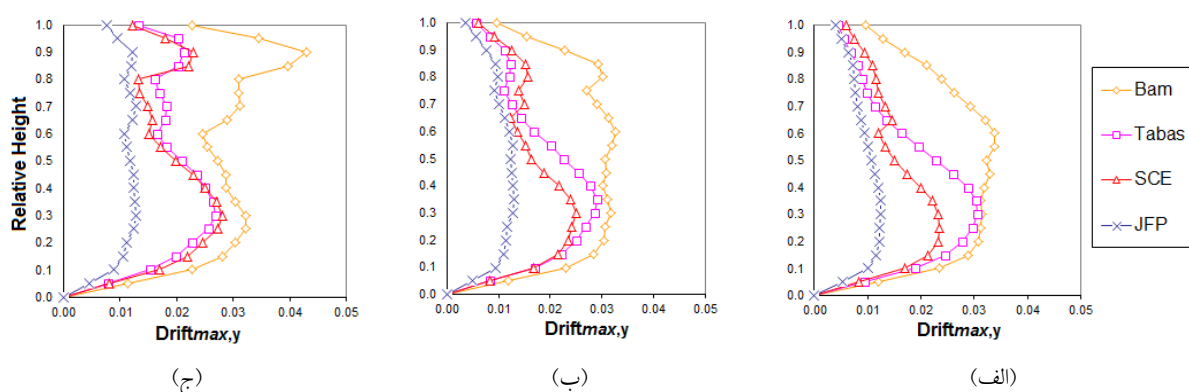
شکل ۱۱- پوش ماکزیمم تغییرمکان طبقات در سازه‌های مطالعاتی ۲۰ طبقه: (الف) مدولاسیون یکنواخت، (ب) مدولاسیون ۵ طبقه‌ای و (ج) مدولاسیون ۴ طبقه‌ای



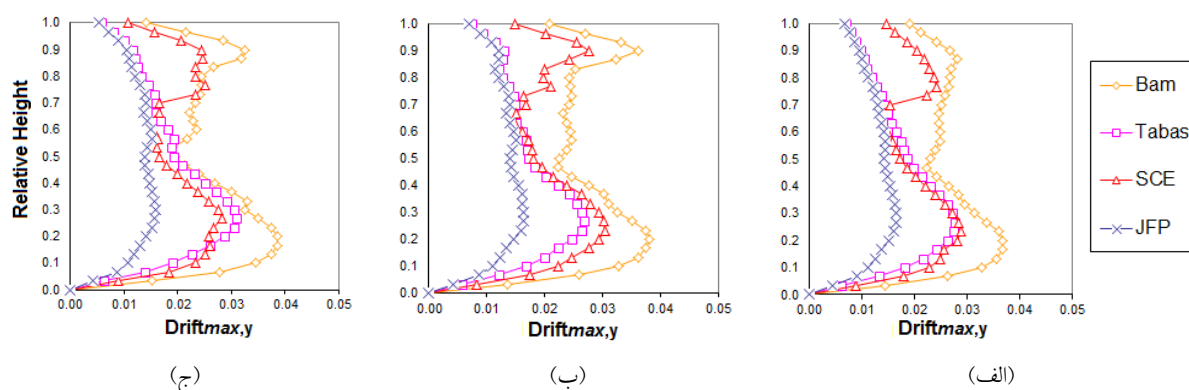
شکل ۱۲- پوش ماکزیمم تغییر مکان طبقات در سازه‌های مطالعاتی ۳۰ طبقه: (الف) مدولاسیون یکنواخت، (ب) مدولاسیون ۵ طبقه‌ای و (ج) مدولاسیون ۴ طبقه‌ای



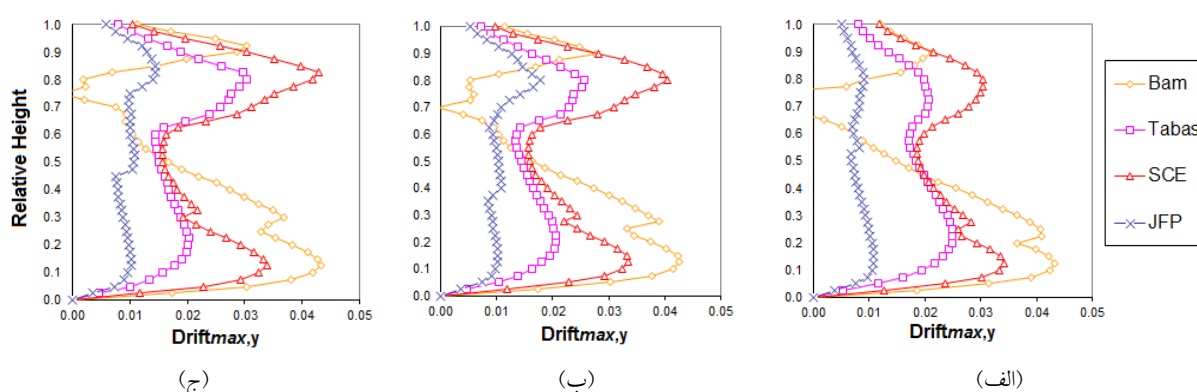
شکل ۱۳- پوش ماکزیمم تغییر مکان طبقات در سازه‌های مطالعاتی ۴۰ طبقه: (الف) مدولاسیون یکنواخت، (ب) مدولاسیون ۵ طبقه‌ای و (ج) مدولاسیون ۴ طبقه‌ای



شکل ۱۴- پوش ماکزیمم دریفت طبقات در سازه‌های مطالعاتی ۲۰ طبقه: (الف) مدولاسیون یکنواخت، (ب) مدولاسیون ۵ طبقه‌ای و (ج) مدولاسیون ۴ طبقه‌ای



شکل ۱۵- پوش ماکزیمم دررفت طبقات در سازه‌های مطالعاتی ۳۰ طبقه: (الف) مدولاسیون یکنواخت، (ب) مدولاسیون ۵ طبقه‌ای و (ج) مدولاسیون ۴ طبقه‌ای



شکل ۱۶- پوش ماکزیمم دررفت طبقات در سازه‌های مطالعاتی ۴۰ طبقه: (الف) مدولاسیون یکنواخت، (ب) مدولاسیون ۵ طبقه‌ای و (ج) مدولاسیون ۴ طبقه‌ای

بخش فوقانی سازه، بیشتر نمایان می‌گردد. همچنین در بررسی رفتار لرزه‌ای سازه ۳۰ طبقه نیز تغییرات یاد شده در حالت کاربرد مدولاسیون یکنواخت نسبت به ۵ طبقه‌ای، میزان ۶/۶۶ درصد افزایش را نشان می‌دهد (جدول ۱۰). بر طبق جدول ۱۱) عدد متناظر حاصل از ارزیابی پاسخ لرزه‌ای سازه‌های ۴۰ طبقه نیز به حدود ۵۰ درصد می‌رسد. مجموعه نتایج فوق بیان‌گر آن است که تغییرات پارامتر دررفت تا حدود ارتفاع نسبی ۰/۳ افزایشی بوده و پس از آن دچار یک روند نزولی و صعودی می‌شود.

نمود متفاوت حاصل شده برای تغییرات بیشینه دررفت در اسکلت مقاوم سازه‌های مطالعاتی ۲۰، ۳۰ و ۴۰ طبقه، بیان‌کننده موقعیت‌های احتمالی تشکیل حوزه‌های غیرخطی است. همچنین، موقعیت‌های هندسی مربوط به دامنه بزرگ‌تر پارامتر دررفت نیز محل تشکیل و گسترش مفاصل پلاستیک را نشان

ارزیابی مقایسه‌ای برای تغییرات دررفت بر اساس کاربرد سه مدولاسیون مفروض برای سازه‌های ۲۰، ۳۰ و ۴۰ طبقه (شکل ۱۱) تحت چهار رکورد نیرومند حوزه نزدیک، در جدول ۹) تا ۱۱) ارائه شده است. تمرکز محاسباتی بر تغییرات دررفت در دو نیمه تحتانی و فوقانی سازه‌های مطالعاتی ۲۰، ۳۰ و ۴۰ طبقه می‌باشد. با توجه به نتایج جدول‌های مذکور برای سازه‌های ۲۰ و ۴۰ طبقه تحت رکورد JFP در قسمت تحتانی اسکلت مقاوم، تغییرات چندانی در مقدار دررفت برای حالت مدولاسیون ۵ طبقه‌ای نسبت به دو مدولاسیون ۴ طبقه‌ای و یکنواخت دیده نمی‌شود. مشخصات رفتار لرزه‌ای سازه‌های ۲۰ طبقه نیز نشان دهنده تغییرات دررفت اسکلت مقاوم با مدولاسیون ۵ طبقه‌ای نسبت به ساختارهای ۴ طبقه‌ای و یکنواخت، به ترتیب در حدود ۲۵ و ۲۲/۲۲ درصد است (جدول ۹). با افزایش ارتفاع مدل‌های مطالعاتی، روند تغییرات پارامتر دررفت به ویژه در

می‌دهد. با پیروی از این موضوع و همانطور که در شکل‌های (۱۷) و (۱۸) مشاهده می‌شود، مکانیزم مفصل پلاستیک نیز برای سازه ۲۰ طبقه با مدولاسیون ۴ طبقه‌ای در ترازهای تحتانی اسکلت مقاوم، متمرکز است. همچنین ملاحظه می‌شود که برای کاربرد دو مدولاسیون دیگر در اسکلت مقاوم سازه ۲۰ طبقه، مکانیزم مفصل پلاستیک در حدود ترازهای میانی و برخی ترازهای بالایی با دامنه غیرخطی بزرگ‌تر تشکیل شده است. سطوح عملکردی به ترتیب خدمت‌پذیری بدون وقفه^{۲۷}، ایمنی جانی^{۲۸} و آستانه فروریزش^{۲۹} نام دارند. تعریف دامنه‌های عددی مربوط به سطوح عملکردی فوق بر پایه گزارش‌های Fema صورت گرفته است.

نتایج تحلیلی نشان می‌دهد که تحت رکورد SCE (شکل ۵)) در هر دو بخش تحتانی و فوقانی اسکلت مقاوم ۳۰ طبقه، روند افزایش دررفت وجود دارد. شایان ذکر است که مکانیزم مفصل غیرخطی در اسکلت مقاوم سازه ۳۰ طبقه تحت رکورد TAB (شکل ۴))، با نمود مشخصی در طبقات پایینی شکل گرفته و همچنین تحت رکورد SCE نیز در هر دو قسمت تحتانی و فوقانی سازه، آرایش مفصل غیرخطی تشکیل شده است (شکل‌های (۱۹) و (۲۰)). مطابق شکل (۳) رکورد SCE دارای پالس بزرگ دامنه و کوتاه مدت با گام زمانی نزدیک به پریود مود پایه سازه‌های مطالعاتی ۳۰ طبقه است.

جدول ۹- درصد تغییرات پارامتر دررفت در پاسخ لرزه‌ای سازه‌های مطالعاتی ۲۰ طبقه

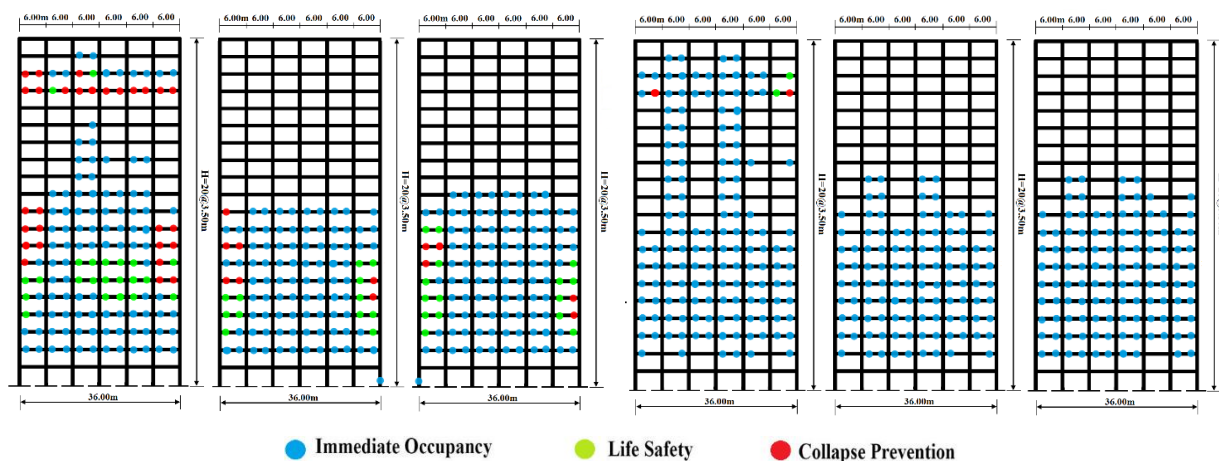
رکورد	تغییرات نسبی میان مدولاسیون‌های ۵ و ۴ طبقه‌ای		تغییرات نسبی میان مدولاسیون‌های ۵ طبقه‌ای و یکنواخت	
	نیمه تحتانی اسکلت	نیمه فوقانی اسکلت	نیمه تحتانی اسکلت	نیمه فوقانی اسکلت
Bam	۱۳/۳۳	۰	-۲۸/۵۷	-۳/۱۲
Tabas	-۱۶/۶۶	۳/۴۴	-۴۲/۸۵	۱۱/۵۳
SCE	-۶/۶۶	-۸	-۳۱/۸۱	-۱۰/۷۰
JFP	-۲۲/۲۲	۰	-۲۵/۰۰	۰

جدول ۱۰- درصد تغییرات پارامتر دررفت در پاسخ لرزه‌ای سازه‌های مطالعاتی ۳۰ طبقه

رکورد	تغییرات نسبی میان مدولاسیون‌های ۵ و ۴ طبقه‌ای		تغییرات نسبی میان مدولاسیون‌های ۵ طبقه‌ای و یکنواخت	
	نیمه تحتانی اسکلت	نیمه فوقانی اسکلت	نیمه تحتانی اسکلت	نیمه فوقانی اسکلت
Bam	-۲۲/۲۲	-۲۶/۶۳	۱۲/۵۰	۰
Tabas	-۱۵/۳۸	۳/۸۴	۸/۳۳	-۱۳/۳۳
SCE	-۱۱/۱۱	۸/۰۰	-۶/۶۶	۷/۱۴
JFP	-۲۵/۰۰	۶/۶۶	۲۰/۰۰	۰

جدول ۱۱- درصد تغییرات پارامتر دررفت در پاسخ لرزه‌ای سازه‌های مطالعاتی ۴۰ طبقه

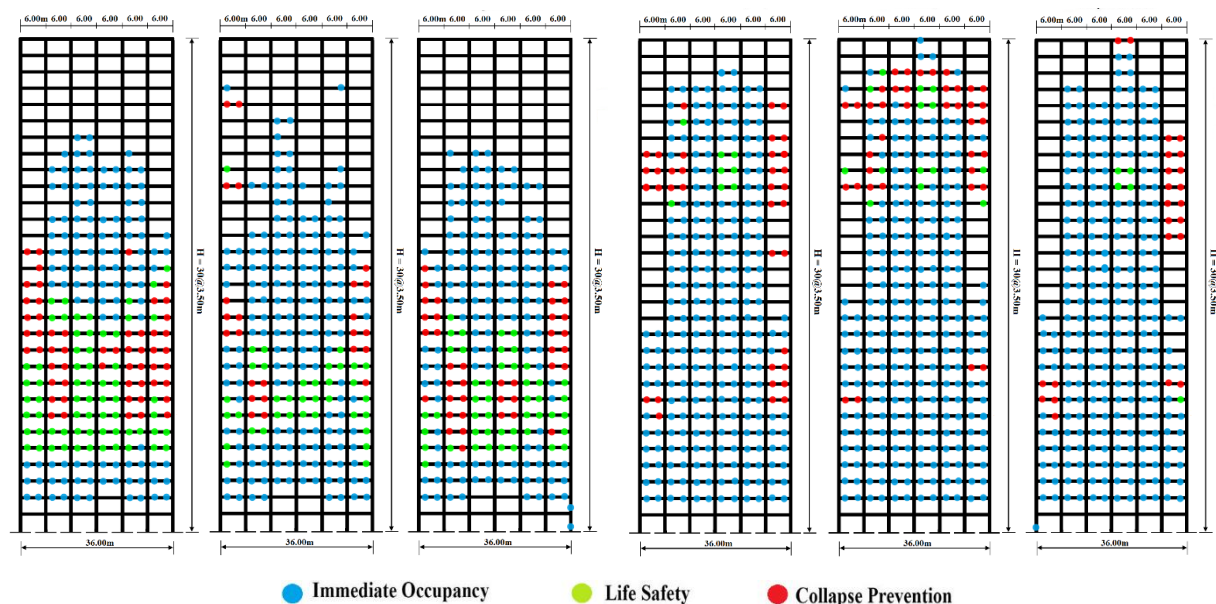
رکورد	تغییرات نسبی میان مدولاسیون‌های ۵ و ۴ طبقه‌ای		تغییرات نسبی میان مدولاسیون‌های ۵ طبقه‌ای و یکنواخت	
	نیمه تحتانی اسکلت	نیمه فوقانی اسکلت	نیمه تحتانی اسکلت	نیمه فوقانی اسکلت
Bam	-۲۲/۲۲	۲/۳۸	-۱۰/۰۰	-۲/۳۲
Tabas	-۲۰/۰۰	۲۰/۰۰	-۱۶/۶۶	۰
SCE	-۲۵/۰۰	۳/۰۳	-۴/۷۶	۰
JFP	-۴۷/۰۵	۰	۲۱/۴۲	۰



(الف) (ب) (ج) (الف) (ب) (ج)

شکل ۱۷- ساختار مفصل پلاستیک در سازه‌های مطالعاتی ۲۰ طبقه در انتهای بازه زمانی رکورد TAB: (الف) مدولاسیون یکنواخت، (ب) مدولاسیون ۵ طبقه‌ای و (ج) مدولاسیون ۴ طبقه‌ای (تعریف سطوح عملکرد بر اساس Fema 356 می‌باشد).

شکل ۱۸- ساختار مفصل پلاستیک در سازه‌های مطالعاتی ۲۰ طبقه در انتهای بازه زمانی رکورد SCE: (الف) مدولاسیون یکنواخت، (ب) مدولاسیون ۵ طبقه‌ای و (ج) مدولاسیون ۴ طبقه‌ای (تعریف سطوح عملکرد بر اساس Fema 356 می‌باشد).



(الف) (ب) (ج) (الف) (ب) (ج)

شکل ۱۹- ساختار مفصل پلاستیک در سازه‌های مطالعاتی ۳۰ طبقه در انتهای بازه زمانی رکورد TAB: (الف) مدولاسیون یکنواخت، (ب) مدولاسیون ۵ طبقه‌ای و (ج) مدولاسیون ۴ طبقه‌ای (تعریف سطوح عملکرد بر اساس Fema 356 می‌باشد).

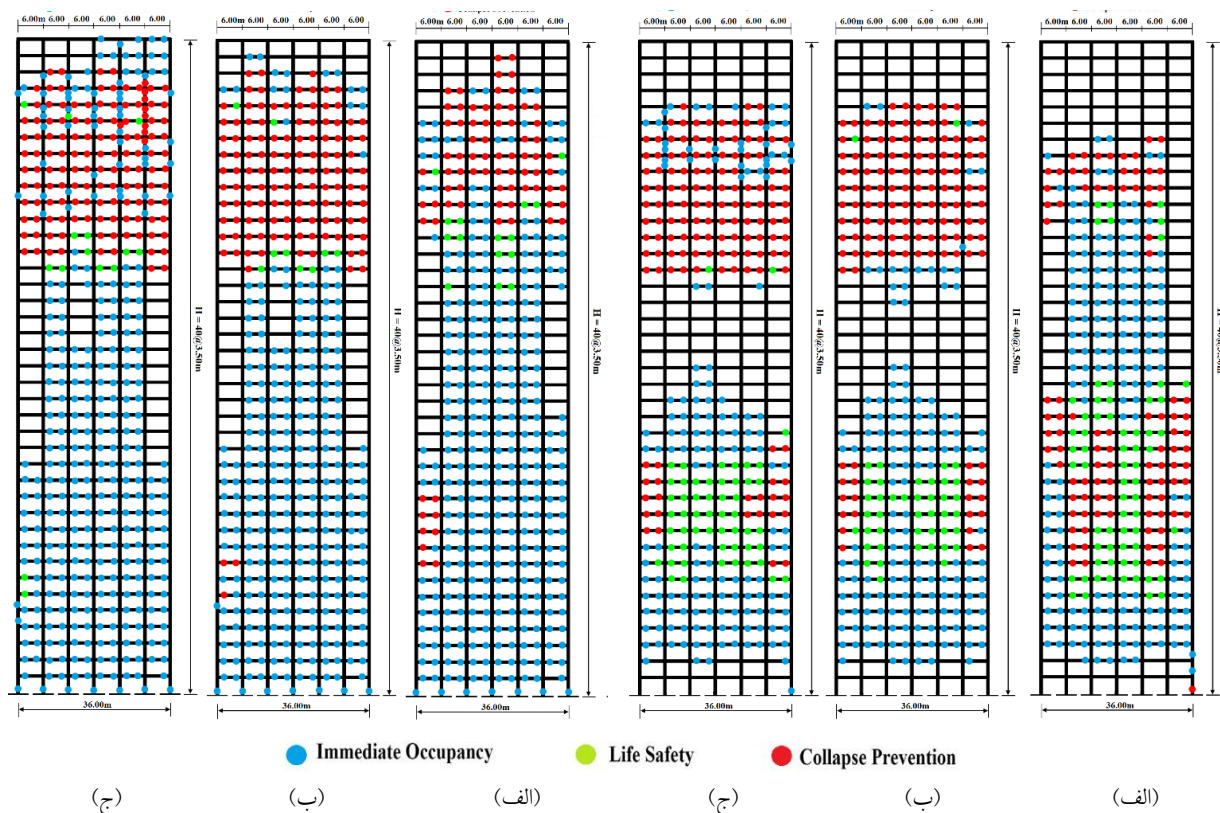
شکل ۲۰- ساختار مفصل پلاستیک در سازه‌های مطالعاتی ۳۰ طبقه در انتهای بازه زمانی رکورد SCE: (الف) مدولاسیون یکنواخت، (ب) مدولاسیون ۵ طبقه‌ای و (ج) مدولاسیون ۴ طبقه‌ای (تعریف سطوح عملکرد بر اساس Fema 356 می‌باشد).

تحت اثر اعمال دو رکورد TAB و SCE بر سازه‌های ۴۰ طبقه بیان‌گر آن است که در بخش‌های تحتانی و فوقانی، مقدار ماکزیمم نسبی حاصل گردیده و در نتیجه مفاصل غیرخطی در طبقات تحتانی و فوقانی شکل گرفته اند. با توجه به شکل‌های

تاریخچه زمانی رکورد TAB دارای یک پالس ترکیبی بسیار بلند مدت سرعت می‌باشد. تفاوت آرایش و دامنه عملکردی مفاصل غیرخطی تشکیل شده در اسکلت مقاوم سازه نیز بر همین اساس توصیف می‌گردد. روند تغییرات پارامتر دررفت

(۲۱) و (۲۲) آرایش و چیدمان مفصل غیرخطی در اسکلت سازه‌های مطالعاتی ۴۰ طبقه تحت رکورد TAB در دامنه عملکردی به مراتب بزرگتر نسبت به رکورد SCE قرار می‌گیرد. روند تغییرات دررفت نیز بطور نزدیکی از مشخصات فوق پیروی می‌نماید. نکته مهم دیگر آن که تحت اثر رکوردهای نیرومند انتخابی (جدول (۷)) به صورت تدریجی و تا حدود نیمه اول پالس سرعت، ویژگی‌های رفتار لرزه‌ای سازه‌های مطالعاتی با نمود جامع‌تر حوزه تغییرشکل‌های بزرگ هندسی است. با گذر از اوج پالس سرعت هر دو مولفه LN و به ویژه TR، ماهیت رفتار لرزه‌ای با شاخص بزرگتر غیرخطی هندسی-مادی خواهد بود. بروز این رفتار لرزه‌ای نیز به صورت کاهش سختی^{۳۰} و زوال مقاومت^{۳۱} اسکلت سازه است. تشکیل و گسترش مفصل غیرخطی در المان‌های اصلی سازه واقع خواهد شد. بدین ترتیب می‌توان تأثیرگذاری پالس‌های بزرگ و پر دامنه سرعت را در ایجاد تغییرات بزرگ سرعت نسبی طبقات سازه و

نیز پارامتر دررفت ملاحظه نمود. شایان ذکر است که با ضریب‌دار شدن مولفه‌های سه گانه شتاب زمین در یک رکورد نیرومند حوزه نزدیک، ساختارهای چند موجی با دامنه کوتاه تا متوسط نیز به پالس‌های بزرگ و پیوسته تبدیل خواهند شد. این پالس‌های بزرگ با ساختار شبیه امواج ترکیبی سینوسی در تاریخچه زمانی سرعت و تغییر مکان زمین ظاهر می‌شوند. بدین ترتیب، رفتار دینامیکی زمین در حوزه نزدیک گسل به صورت یک جنبش ضربه‌ای چندگانه و بسیار پرانرژی خواهد بود. نتیجه فرایند فوق بصورت ضربات متوالی به اسکلت مقاوم ساختمان است که با پدیدار شدن مکانیزم‌های گسترده غیرخطی با دامنه بزرگ در اسکلت مقاوم همراه خواهد بود. گسترش تدریجی اثرات نرم شدگی ناشی از کاهش سختی و زوال مقاومت در رفتار المان‌های اصلی سازه، سبب گذر سریع از سطح عملکرد ایمنی جانی و حاکم شدن وضعیت آستانه فروپاشی خواهد شد.



شکل ۲۱- ساختار مفصل پلاستیک در سازه‌های مطالعاتی ۴۰ طبقه در انتهای بازه زمانی رکورد SCE: (الف) مدولاسیون یکنواخت، (ب) مدولاسیون ۵ طبقه‌ای و (ج) مدولاسیون ۴ طبقه‌ای (تعریف سطوح عملکرد بر اساس Fema 356 می‌باشد.)

شکل ۲۲- ساختار مفصل پلاستیک در سازه‌های مطالعاتی ۴۰ طبقه در انتهای بازه زمانی رکورد TAB: (الف) مدولاسیون یکنواخت، (ب) مدولاسیون ۵ طبقه‌ای و (ج) مدولاسیون ۴ طبقه‌ای (تعریف سطوح عملکرد بر اساس Fema 356 می‌باشد.)

- [1] PEER Report 2017/06, 2017, Guidelines for performance based seismic design of tall buildings, Report as part of the Tall Buildings Initiative, University of California, Berkeley.
- [2] Naeim, F. (2001), "The seismic design handbook", 2th edition, Kluwer Academic Publisher.
- [3] Chen, W.F. (2003), "Earthquake engineering Handbook", CRC Press.
- [4] 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, Vol. 103, pp. 2591-2603.
- [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, Vol. 47, pp. 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, Vol. 52, pp. 13-26.
- [7] Tian, Y.J., Yang, Q. and Lu, M.Q. (2007), "Simulation method of near-fault pulse type ground motion", ACTA Seismologica, Vol. 20, pp. 80-87.
- [8] Mukhopadhyay, S. and Gupta, V.K. (2013), "Directivity pulses in near-fault ground motions-I: Identification, extraction and modeling", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 50, pp. 1-15.
- [9] Mukhopadhyay, S. and Gupta, V.K. (2013), "Directivity pulses in near-fault ground motions-II: estimation, extraction and modeling", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 50, pp. 38-52.
- [10] Malhotra, P.K. (1999), "Response of buildings to near-field pulse-like ground motions", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 28, pp. 1309-1326.
- [11] Somerville, P.G. (2003), "Magnitude scaling of the near fault rupture directivity pulse", Physics of the Earth and Planetary Interiors, Vol. 137, 201-212.
- [12] Bray, J.D. and Rodriguez-Marek, A. (2004), "Characterization of forward-directivity ground motions in the near-fault region", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 24, pp. 815-828.
- [13] 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, Vol. 7, pp. 236-247.
- [14] Yaghmaei-Sabegh, S. and Tsang, H.H. (2011), "An updated study on near-fault ground motions of the 1978 Tabas, Iran, earthquake ($M_w=7.4$)", Scientia Iranica. Transaction A, Civil Engineering, Vol. 18, pp. 895-905.
- [15] 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, Vol. 80, pp. 119-126.
- [16] Hall, J.F. (1995), "Parameter study of the response of moment-resisting steel frame buildings to near-source ground motions", Report No. EERL, pp. 95-08.
- [17] Iervolino, I., Manfredi, G. and Cosenza, E. (2006), "Ground motion duration effects on nonlinear seismic response", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 35, pp. 21-38.

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، عملکرد لرزه‌ای سه سازه قاب محیطی دسته شده ۲۰، ۳۰ و ۴۰ طبقه، به ترتیب با ارتفاع کلی ۷۰، ۱۰۵ و ۱۴۰ متر همراه با کاربرد مدولاسیون‌های ۴، ۵ طبقه‌ای و یکنواخت در اسکلت مقاوم، مورد مطالعه قرار گرفت. بر اساس ارزیابی نتایج تحلیل‌های دینامیکی تاریخچه زمانی غیرخطی تحت اثر رکوردهای مقیاس شده حوزه نزدیک، روند و چگونگی تغییرات پارامترهای پاسخ مدل‌های مطالعاتی بررسی گردید.

ملاحظه شد که با افزایش ارتفاع سازه و بالا رفتن دامنه زمانی پیرو مودهای ارتعاشی، مقادیر پارامترهای پاسخ سازه‌ها دچار تغییرات با روند افزایشی نسبی می‌گردد. همچنین، وجود ساختارهای متفاوت پالس و اسپایک‌های شتاب، همزمان با پالس‌های پیوسته سرعت نیز سبب بروز تغییرات ناهمگن در پارامتر برش پایه می‌شود. نکته دیگر آن که روند مذکور تحت رکورد نیرومند BAM مشخص‌تر است. تاریخچه زمانی هر دو مولفه LN و TR مربوط به این رکورد نیز حاوی یک پالس بزرگ و مشخص سرعت می‌باشد.

تغییرات مدولاسیون اسکلت مقاوم، تأثیر چندانی بر روی کاهش پارامتر دریافت سازه‌های مطالعاتی ۲۰ طبقه ندارد. روند افزایشی تغییرات ناهمگون این پارامتر پاسخ در راستای ارتفاع سازه‌های مطالعاتی با بیشتر شدن پیرو مود ارتعاشی پایه، دچار فزونی گردیده و دامنه این تغییرات در طبقات فوقانی سازه‌های مطالعاتی ۳۰ و ۴۰ طبقه به حدود ۵۰ درصد نیز رسید. بروز روند فوق، با یک نمود غیریکنواخت برای کاربرد هر سه مدولاسیون اسکلت مقاوم ملاحظه می‌شود. همچنین، دامنه ماکزیمم دریافت تحت رکوردهای نیرومند حوزه نزدیک، به طور نسبی و در یک بازه تغییرات کوچک، بیشتر در طبقات نیمه پایینی اسکلت سازه‌های مطالعاتی دیده شد.

آرایش مفصل غیرخطی با دامنه و سطوح عملکردی بزرگ‌تر نیز در گستره‌ای از بخش‌های بالایی و تحتانی اسکلت مقاوم تشکیل گردید. ناهمگونی آرایش تشکیل مفصل غیرخطی در اسکلت مقاوم با تغییرات پارامتر دریافت در راستای ارتفاع سازه، ارتباط نزدیک دارد. همچنین با توجه به مجموعه عوامل مشروح فوق، کاربرد مدولاسیون‌های ۴ و ۵ طبقه‌ای در اسکلت مقاوم سازه‌های بلند مرتبه قاب محیطی دسته شده می‌تواند وضعیت تعدیل یافته‌ای برای رفتار لرزه‌ای در حوزه نزدیک گسل، در پی داشته باشد.



- [34] Yaghmaei-Sabegh, S. (2013), "Wavelet-based analysis for pulse period of earthquake ground motions", *International Journal of Engineering-Transactions A: Basics*, Vol. 26, pp. 1135-1144.
- [35] Tsang, H.H., Wilson, J.L., Lam, N.T. and Su, R.K. (2017), "A design spectrum model for flexible soil sites in regions of low-to-moderate seismicity", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 92, pp. 36-45.
- [36] Iranian Standard No. 2800, (2014), Iranian code of practice for seismic resistant design of buildings, fourth edition, Tehran, Iran. (In Persian)
- [37] Iranian National Building Code, 2014, Steel Structures – Issue 10, Tehran, Iran. (In Persian)
- [38] Azhdarifar, M., Meshkat-Dini, A. and Sarvghad-Moghadam, A. (2015), "Study on the seismic response parameters of steel medium-height buildings with framed-tube skeleton under near-fault records", *Electronic Journal of Structural Engineering (EJSE)*, Vol. 15, pp. 70-87.
- [39] Iranian National Building Code, 2014, Design Loads for Buildings - Issue 6, Tehran, Iran. (In Persian)
- [40] Ahmadi, A. (2015), "Assessment of the seismic drift in tall buildings subjected to near-field earthquake records containing forward directivity effects", MSc. Thesis, Kharazmi University.
- [41] Whitney, R. (2019), "Quantifying near fault pulses using generalized Morse wavelets", *Journal of Seismology*, Vol. 23, pp.1115-1140.
- [42] Afshari, K., Stewart, J.P. and Steidl, J.H. (2019), "California ground motion vertical array database", *Earthquake Spectra*, Vol. 35, pp. 2003-2015.
- [43] Rupakhety, R.b. and Sigbjornsson, R. (2011), "Can simple pulses adequately represent near-fault ground motions?", *Journal of Earthquake Engineering*, Vol. 15, pp. 1260-1272.
- [44] Rodríguez, A.A. and Miranda, E. (2015), "Assessment of building behavior under near-fault pulse-like ground motions through simplified models", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 79, pp. 47-58.
- [45] Çelebi, M., Ulusoy, H.S. and Nakata, N. (2016), "Responses of a tall building in Los Angeles, California, as inferred from local and distant earthquakes", *Earthquake Spectra (EERI)*, Vol. 32, pp. 1821-1843.
- [46] Zhang, H., Lian, M. and Su, M. (2020), "Study on the seismic performance of high-strength steel framed-tube structures with replaceable shear links", *Constructional Steel Research*, Vol. 171, pp.106131.
- [47] PEER Ground Motion Database, <http://peer.berkeley.edu/>
- [48] FEMA 356, 2000, Pre-Standard and Commentary for the seismic Rehabilitation of Buildings, Washington D.C. Federal Emergency Management Agency.
- [49] FEMA 440, 2005, Improvement of nonlinear static seismic analysis procedures (ATC-55 Project).
- [50] Azizi, Y. (2019), "Estimation of structural resilience based on fragility curves and uniformity of drift distribution in bundled tube structures under near-field earthquake", PhD Proposal Report, Kharazmi University.
- [51] PERFORM 3D, 2007, Nonlinear Analysis and Performance Assessment for 3D-Structures (CSI), Berkeley, California.
- [52] SAP2000, 2010, Integrated Software for Structural Analysis and Design (CSI), Berkeley, California.
- [18] Kalkan, E. and Kunnath, S. (2006), "Effects of fling step and forward directivity on seismic response of buildings", *Earthquake Spectra*, Vol. 22, pp. 367-390.
- [19] Mavroeidis, G.P. and Papageorgiou, A.S. (2010), "Effect of fault rupture characteristics on near-fault strong ground motions", *Bulletin of the Seismological Society of America (BSSA)*, Vol. 100, pp. 37-58.
- [20] Riahi, H.T., Amouzegar, H. and Fosoul, S.A.S. (2015), "Comparative study of seismic structural response to real and spectrum matched ground motions", *Scientia Iranica. Transaction A, Civil Engineering*, Vol. 22, pp. 92-106.
- [21] 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*, Vol. 33, pp.809-835.
- [22] 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 analyse earthquakes strong-motion waveforms", *Bulletin of Earthquake Engineering*, Vol. 16, pp. 2641-2651.
- [23] Taranath, B.S. (2005), "Wind and earthquake resistant buildings structural analysis and design", 1st edn, Department of Civil and Environmental Engineering, Georgia Institute of Technology, Atlanta.
- [24] Mollaioli, F., Bruno, S., Decanini, L.D. and Panza, G.F. (2006), "Characterization of dynamic response of structure to damaging pulse-type near-field ground motions", Vol. 41, pp. 23-46.
- [25] Narayan, S., Shrimali, M.K., Bharti, S.D. and Datta, T.K. (2018), "Collapse of damaged steel building frames because of earthquakes", *Journal of Performance of Constructed Facilities*, Vol. 32, pp.04017128.
- [26] Gunel, M.H. and Ilgin, E.H. (2007), "A proposal for the classification of structural system of tall buildings", *Building and Environment*, Vol. 42, pp. 2667-2675.
- [27] Ali, M.M. and Moon, K.S. (2007), "Structural developments in tall buildings: current trends and future prospects", *Architectural Science Review*, Vol. 50, pp.205-223.
- [28] Alhan, C. and Sürmeli, M. (2015), "Necessity and adequacy of near-source factors for not-so-tall fixed-base buildings", *Earthquake Engineering and Engineering Vibrations*, Vol. 14, pp. 13-26.
- [29] Krishnan, S. (2007), "Case studies of damage to 19-storey irregular steel moment-frame buildings under near-source ground motion", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 36, pp. 861-885.
- [30] 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*, Vol. 49, pp. 297-309.
- [31] 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 Jorals)*, Vol. 18, pp. 603-627.
- [32] Azhdarifar, M., Meshkat-Dini, A. and Sarvghd Moghadam, A.R. (2017), "Analytical Study of Interior Rigid Bents Arrangement on Seismic Response of Tall Buildings", *Journal of Seismology and Earthquake Engineering (JSEE)*, Vol. 19, pp. 247-260.
- [33] Kalkan, E. and Kunnath, S. (2008), "Relevance of absolute and relative energy content in seismic evaluation of structures", *Advances in Structural Engineering*, Vol. 11, pp. 1-18.



- ¹ Imperial Valley 1979
- ² Loma Prieta 1989
- ³ Landers 1992
- ⁴ Cape Mendocino 1992
- ⁵ Northridge 1994
- ⁶ Kobe 1995
- ⁷ Erzincan 1992
- ⁸ Kocaeli 1999
- ⁹ Tabas 1978
- ¹⁰ Bam 2003
- ¹¹ Strike slip fault
- ¹² Dip slip fault
- ¹³ Reverse oblique fault
- ¹⁴ Rupture propagation
- ¹⁵ Fault parallel component
- ¹⁶ Fault normal component
- ¹⁷ Narrow band
- ¹⁸ Framed tube
- ¹⁹ Web part
- ²⁰ Flange part
- ²¹ Shear lag
- ²² Vertical component
- ²³ Bundled tube
- ²⁴ Rupture directivity
- ²⁵ Forward directivity
- ²⁶ Pulse period
- ²⁷ Immediate occupancy
- ²⁸ Life safety
- ²⁹ Collapse prevention
- ³⁰ Stiffness deterioration
- ³¹ Strength degradation

