



تأثیرگذاری دینامیکی کمربند سخت‌کننده پیرامونی در رفتار لرزه‌ای ساختمان‌های بلند فولادی با اسکلت قاب محیطی مهاربندی شده

محدثه صادق‌پور^۱، افشین مشکوه‌الدینی^{*۲}

۱- دانشجوی دکتری، مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود

۲- استادیار، مهندسی عمران، دانشگاه خوارزمی، تهران

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

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۳/۰۸، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۴/۳۱)

چکیده

هدف از این پژوهش، بررسی پارامترهای رفتار دینامیکی غیرخطی ساختمان‌های بلند فولادی دارای اسکلت مقاوم ترکیبی قاب محیطی مهاربندی شده با ساختار کمربند سخت‌کننده در طبقات فوقانی سازه است. بدین منظور، چهار مدل مطالعاتی سه بعدی ۳۰ طبقه طراحی شده‌اند. مدل شماره یک دارای اسکلت مقاوم بدون کمربند سخت‌کننده و سه مدل دیگر نیز حاوی یک کمربند سخت‌کننده در طبقات فوقانی، به ترتیب با آرایش یک، دو و سه طبقه می‌باشند. نتایج مطالعات عددی این پژوهش، با انجام یک مجموعه تحلیل‌های غیرخطی تاریخچه زمانی بر روی مدل‌های سازه‌ای فوق حاصل گردیده است. گروه زمین‌لرزه‌های سه مؤلفه‌ای انتخابی نیز شامل شش رکورد بسیار نیرومند حوزه نزدیک و یک رکورد حوزه دور می‌باشد. ارزیابی نتایج این پژوهش حاکی از آن است که کاربرد کمربند سخت‌کننده در اسکلت‌های بلندمرتبه قاب‌های محیطی مهاربندی شده، سبب افزایش قابل ملاحظه سختی و بالا رفتن قابلیت جذب انرژی جنبشی زلزله‌ها خواهد شد. این مساله نیز کاهش بزرگ در میزان تغییرمکان جانبی و دریافت دینامیکی سازه را در پی داشته و سبب افزایش استفاده از ظرفیت محوری ستون‌های پیرامونی پلان می‌گردد.

واژگان کلیدی

ساختمان بلند فولادی، رفتار غیرخطی، قاب محیطی مهاربندی شده، کمربند سخت‌کننده، زلزله حوزه نزدیک

Dynamic Effects of Belted Truss on Seismic Behavior of Steel Tall Buildings with Braced Tube Skeleton

M. Sadeghpour, A. Meshkat-Dini

Abstract

The aim of this research is to study the parameters of nonlinear dynamic behavior of steel tall buildings having a compound braced-tube resistant skeleton with belted trusses in higher levels. For this purpose, four 30-story studied models have been designed in 3D configuration. The first studied model has a resistant skeleton without a belted truss. Also, the remaining three structural models have a belted truss in higher levels with layouts of one, two and three stories, respectively. Numerical results of this research are acquired according to a set of time-history nonlinear analyses conducted on the studied models. The chosen ensemble of three-component ground motions includes six highly powerful near-field records and one far-field record. Assessment of this research results reveals that applying belted trusses in tall braced-tube skeletons would lead to a remarkable increase in stiffness and a rising trend in the resistant capability to absorb the earthquake kinetic energy. This issue also results in a large decrease in lateral displacement and dynamic drift of the structure and will therefore cause an increase in using the axial capacity of peripheral columns of the plan. It is worth mentioning that the application of skeletal configurations with belted trusses in high-rise buildings especially in areas with high seismicity, is a suitable and efficient design alternative compared to other structural systems.

Keywords

Steel tall building, Nonlinear behavior, Braced tube skeleton, Belted truss, Near-field record



بررسی و مطالعه اثرات حرکات نیرومند زمین در حوزه نزدیک گسل‌ها بر روی رفتار سازه‌های واقع شده در این مناطق، از موضوعات تحقیقاتی مبحث طراحی لرزه‌ای سازه‌ها و به‌ویژه ساختمان‌های بلند است. رکوردهای حوزه نزدیک به دلیل دارا بودن خصوصیات منحصر به فرد فیزیکی، خرابی و صدمات بسیاری را ایجاد نموده‌اند. ارزیابی سازه‌های آسیب دیده در حین زمین‌لرزه‌های بزرگ نمایانگر ایجاد خسارت‌های قابل توجه حتی در ساختمان‌های طراحی شده بر پایه اصول مهندسی است. ایجاد تخریبات گسترده سازه‌ای در زلزله‌های معروف نورتریج کالیفرنیا (۱۹۹۴)، بم (۲۰۰۳) و طبس (۱۹۷۸) و توسعه ساخت و سازه‌های میان‌مرتبه تا بلند، سبب ضرورت پرداختن به موضوعات و روند دقیق‌تر طراحی لرزه‌ای شده است.

وقوع زلزله‌ها می‌تواند آسیب‌های متفاوتی را بر حسب مقاومت و پایداری سازه‌ها سبب شود. پایدار و مقاوم بودن سازه‌ها در برابر زلزله برای جلوگیری از تخریب‌های کلی و یا جزیی از اهمیت زیادی برخوردار است. هر چه سازه باربر جانبی دارای شکل‌پذیری بیشتری باشد، قابلیت جذب انرژی نیز بالاتر خواهد بود. بدین مفهوم که نیروی جانبی زلزله باعث ایجاد تغییرشکل‌های بیشتری پیش از گسیختگی در سازه شده و بنابراین به منظور داشتن طرحی مقاوم در برابر زلزله‌های شدید، در نظر گرفتن قابلیت شکل‌پذیری و روند مناسب اتلاف انرژی در سازه‌ها امری ضروری است. این موضوع به‌ویژه در طراحی لرزه‌ای ساختمان‌های میان‌مرتبه تا بلند از اهمیت بسزایی برخوردار می‌باشد.

شایان ذکر است که برای ساختمان‌های بلند مرتبه باید به جهت مقابله با بارهای جانبی ایجاد شده توسط زلزله، یک سیستم یکپارچه مقاوم در نظر گرفته شود. همچنین همراه با طراحی و ساخت مصالح جدید، ابداع فرم‌های مختلف سازه‌ای را می‌توان مهم‌ترین عامل در امکان‌پذیر شدن ساخت این‌گونه سازه‌ها دانست. اسکلت مقاوم یک ساختمان بلند مرتبه باید ترکیبات مختلف بارهای قائم و جانبی را تحمل نماید. ملاحظات غیرسازه‌ای نیز می‌تواند تاثیر مهمی بر انتخاب فرم اسکلت مقاوم داشته باشد. هر چه ساختمان بلندتر و لاغرتر باشد، توجه به عوامل سازه‌ای دارای اهمیت بیشتری شده و در پی آن، دقت در انتخاب فرم سازه‌ای نیز در اولویت قرار می‌گیرد [۱]. سیستم‌های سازه‌ای گوناگونی برای اسکلت مقاوم ساختمان‌های بلند ابداع گردیده است. در این موضوع، دو سیستم قاب محیطی دارای

اتصالات خمشی و نیز پانل‌های مهاربندی شده، از کارآمدترین اسکلت‌های سازه‌ای برای استفاده در ساختمان‌های بلند می‌باشد. اسکلت پایه قاب خمشی محیطی، شامل چهار قاب صلب صفحه‌ای عمود بر هم است. رفتار سازه قاب خمشی محیطی همانند عملکرد یک طره قائم بسیار بزرگ بوده و ستون‌های دو وجه مخالف محور ختنی پلان نیز در حالت کشش و فشار عمل می‌کنند. همچنین قاب‌های موازی با راستای بار جانبی، تحت اثر خمش در صفحه خود، رفتار شکل‌پذیر نشان می‌دهند [۲ و ۳]. این رفتار به دلیل وجود انعطاف‌پذیری در تیرهای کناری اسکلت مقاوم ساختمان، باعث ایجاد لنگی برش و افزایش تنش در ستون‌های گوشه و کاهش تنش در ستون‌های میانی می‌گردد. تغییرشکل‌های مربوط به لنگی برش می‌تواند بر عملکرد اعضای غیرباربر سازه نیز اثرات نامطلوب داشته باشد. پدیده لنگی برش باعث ایجاد اعوجاج و تابیدگی در پیکره هر طبقه شده و تشدید تغییرشکل و تنش‌های محوری را در پی دارد [۴-۶].

نتایج مطالعات نشان می‌دهد که در رفتار ساختمان‌های بلند با سیستم قاب محیطی خمشی، پدیده لنگی برش باعث کاهش کارایی سازه می‌شود. همچنین، باید افزود که کاربرد کمربند خرپایی به عنوان یک عامل بهینه‌ساز رفتار لرزه‌ای، قابل توجه است. کمربند خرپایی، یک سیستم مهاربندی شده در موقعیت پیرامونی پلان سازه است که در ارتفاع حداقل یک طبقه اجرا می‌شود. چنانچه این بخش افزوده شده به اسکلت مقاوم سازه در وضعیت بهینه از لحاظ موقعیت و سختی قرار گیرد، تغییرمکان جانبی و پارامتر دریافت به مراتب کاهش خواهند یافت. همچنین، روند یکنواخت‌تر توزیع تنش محوری دینامیکی به ویژه در ستون‌های محیطی ایجاد خواهد شد [۷-۱۳].

نتایج پژوهش‌های پیشین حاکی از آن است که علی‌رغم عملکرد مناسب قاب محیطی خمشی در سازه‌های بلند، نسبت تنش‌های محاسباتی به تنش‌های طراحی در طبقات پایین‌تر این سازه‌ها از معیار مناسب برای طرح بهینه مقاطع، به دور است. این موضوع سبب مصرف مصالح اضافی و نیز افزایش وزن سازه می‌شود. شایان توجه است که به منظور بهبود شرایط فوق، در این پژوهش ویژگی‌های رفتاری سیستم ترکیبی قاب محیطی مهاربندی شده و کمربند خرپایی تبیین و ارزیابی شده است. این پژوهش، دربرگیرنده مطالعه ارتباط مشخصه‌های لرزه‌شناسی رکوردهای حوزه نزدیک حاوی پالس‌های بزرگ سرعت، با پارامترهای پاسخ دینامیکی غیرخطی قاب محیطی مهاربندی شده دارای کمربند سخت‌کننده است.



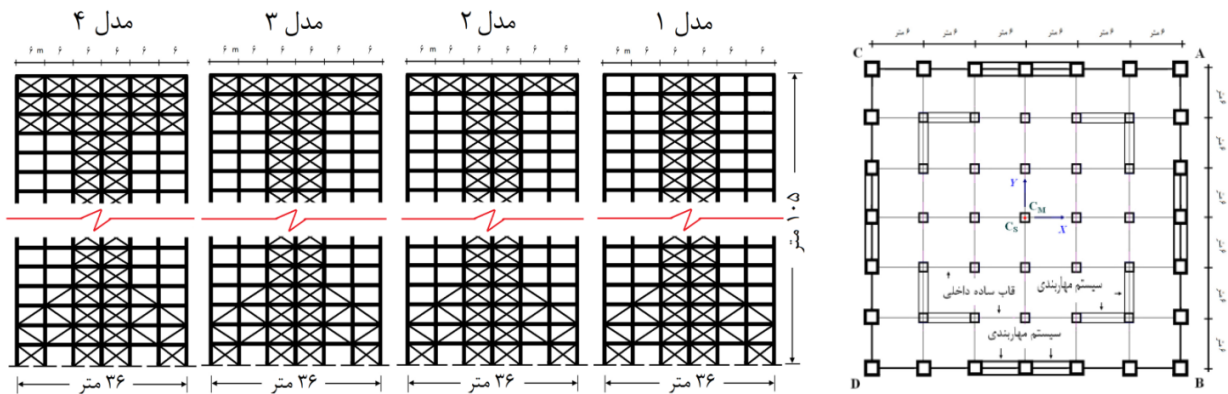
۲- طرح اسکلت سازه های مطالعاتی

سازه های فولادی ۳۰ طبقه مورد مطالعه در این پژوهش از نوع قاب محیطی مهاربندی شده و دارای کمربند سخت کننده، با پلان منظم است. روند طراحی بر اساس ضوابط استاندارد ۲۸۰۰ (ویرایش چهارم) و مباحث ششم و دهم مقررات ملی ساختمان صورت گرفته است [۱۶-۱۴]. پلان و نماهای هر چهار سازه مطالعاتی در شکل (۱) نشان داده شده اند. پلان سازه های مطالعاتی برای هر ۴ مدل به صورت یکسان بوده و دارای ۶ دهانه به طول ۶ متر در هر دو جهت x و y است. مدل اول، بدون کمربند سخت کننده است. سایر مدل ها به ترتیب دارای یک، دو و سه طبقه با پیکربندی کمربند سخت کننده در ترازهای فوقانی می باشند. خاک ساختمانی از نوع تیپ ۲ و منطقه پروژه در پهنه بندی با خطر نسبی زیاد فرض گردیده است.

بار مرده و زنده اعمال شده به سازه طبق استاندارد ملی ساختمان ایران (مبحث ششم - بارهای وارده به ساختمان)، به ترتیب برای تمام طبقات $0/5 t/m^2$ و $0/2 t/m^2$ و برای بام $0/5 t/m^2$ و $0/15 t/m^2$ می باشد. مقاطع و نیمرخ های طرح شده در جداول (۱) تا (۳) و شکل (۲) نمایش داده شده اند. همچنین در بررسی مشخصات طرح لرزه ای هر چهار مدل مطالعاتی، دو معیار محدودیت جابه جایی نسبی طبقات و رعایت اصل ستون

قوی- تیر ضعیف در نظر گرفته شده است. معیار شکل پذیری متوسط در طرح لرزه ای لحاظ گردیده و میرایی سازه به صورت کلاسیک فرض شده و مقدار ضریب میرایی برابر $\xi = 0.5\%$ می باشد.

پریود ۵ مود اول ارتعاش سازه های مطالعاتی در جدول (۴) ارائه شده است. ملاحظه می شود که به دلیل بیشتر بودن پریود مود اول انتقال نسبت به اولین مود پیچشی، سازه ها به صورت پیچشی سخت عمل می کنند. محل قرارگیری پریود سازه در طیف سه جانبه نشان دهنده چگونگی تاثیر پذیری سازه از مقادیر حداکثر سرعت، شتاب و جابه جایی می باشد. مقادیر طیفی متناظر برای سازه های کوتاه مرتبه که دارای پریود پایین هستند، بیشتر حساس به شتاب زمین بوده و نیز برای سازه های با پریود ارتعاشی بالا، حساس به جابه جایی است. نتایج پژوهش های لرزه شناسی نشان می دهد که طیف سه جانبه برخی از رکوردهای حوزه نزدیک دارای ناحیه کوچک حساس به سرعت و نیز دو ناحیه به نسبت بزرگ حساس به شتاب و تغییر مکان می باشد [۱۷]. طیف سه جانبه برای رکوردهای Tabas 1978 و SYL 1994 در شکل (۳) نشان داده شده است. ملاحظه می شود که محور طیفی پریود مود اول ارتعاش طبیعی هر چهار مدل مطالعاتی در بخش حساس به تغییر مکان زمین قرار می گیرد.



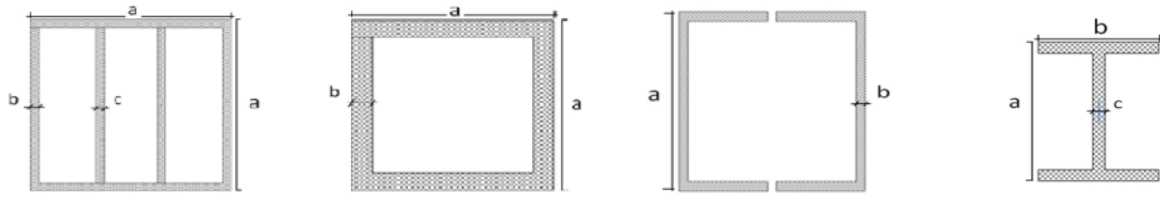
شکل ۱- پلان و نمای سازه های مطالعاتی - C_S و C_M به ترتیب مراکز جرم و برش طبقه می باشند. - (ابعاد: m)

جدول ۱- مشخصات مقاطع مهاربندها و کمربندهای سخت کننده مدل های مطالعاتی بر پایه شکل (۲)، (cm)

طبقه	۱-۵	۶-۱۰	۱۱-۱۵	۱۶-۲۰	۲۱-۲۵	۲۶-۳۰	کمربند سخت کننده انتهایی
مقطع	۲ UNP ۴۰	۲ UNP ۳۸	۲ UNP ۳۵	۲ UNP ۳۰	۲ UNP ۲۶	۲ UNP ۲۶	۲ UNP ۳۵

جدول ۲- مشخصات تیرهای سازه های مطالعاتی (شکل ۲))

طبقه	۳۰-۱	W۴۰×۵۰×۱/۵



مقطع ستون (ضخامت ورق: ۳ cm)

مقطع ستون

مقطع مهاربند و کمربند سخت کننده

مقطع تیر

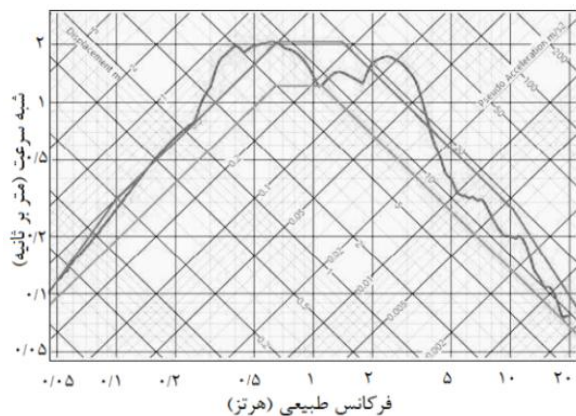
شکل ۲- نوع پروفیل اعضای سازه‌های مطالعاتی (جداول (۱) تا (۳))

جدول ۳- مشخصات مقاطع ستون‌های مدل‌های مطالعاتی پایه شکل (۲)، (cm)

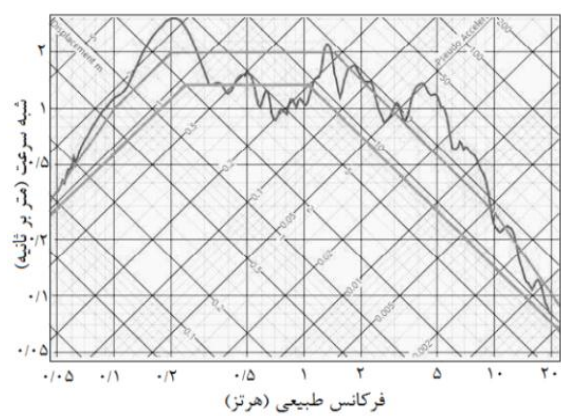
سایر ستون‌ها	ستون‌های کناری پانل‌های مهاربندی داخلی در محل اتصال دو طرفه مهاربند	ستون‌های کناری پانل‌های مهاربندی داخلی در محل اتصال یکطرفه مهاربندها	ستون‌های کناری مهاربندها در قاب محیطی پلان	طبقه
C: ۷۰x۳۳/۰	C: ۱۰۰x۲۲-۳/۵PL	C: ۸۰x۲۲-۳/۵PL	C: ۹۰x۲۲-۳/۵PL	۱-۵
C: ۶۵x۲۲/۰	C: ۸۰x۲۲-۳/۵PL	C: ۷۰x۲۲-۳PL	C: ۸۰x۲۲-۳/۵PL	۱۰-۶
C: ۶۰x۲۲/۰	C: ۷۰x۲۲-۳/۰PL	C: ۷۰x۲۲/۵	C: ۷۰x۲۲-۳PL	۱۵-۱۱
C: ۵۰x۲۱/۵	C: ۷۰x۲۲/۵	C: ۶۵x۲۲/۵	C: ۷۰x۲۲/۵	۲۰-۱۶
C: ۴۵x۲۱/۵	C: ۶۰x۲۲/۰	C: ۶۰x۲۲/۰	C: ۶۰x۲۲/۰	۲۵-۲۱
C: ۴۰x۲۱/۵	C: ۵۵x۲۱/۵	C: ۵۵x۲۱/۵	C: ۵۵x۲۱/۵	۳۰-۲۶

جدول ۴- پریود پنجم مود اول ارتعاشی سازه‌های مطالعاتی شکل ۱ (sec)

مید ۴ و ۵ (انتقالی) نسبت به محور X و Y	مود ۳ (پیچشی) حول محور Z	مود ۱ و ۲ (انتقالی) نسبت به محور X و Y	بیکربندی سیستم مقاوم
۰/۹۶۱	۲/۵۰۳	۳/۹۰۵	مدل ۱
۰/۸۳۴	۲/۱۵۳	۳/۳۷۶	مدل ۲
۰/۸۳۴	۲/۰۶۶	۳/۲۴۸	مدل ۳
۰/۸۰۷	۲/۰۰۷	۳/۱۵۹	مدل ۴



(ب) رکورد پر قدرت (SYL) از زلزله نورتریج ۱۹۹۴



(الف) رکورد اصلی زلزله طبس ۱۹۷۸

شکل ۳- طیف سه جانبه رکورد حوزه نزدیک متناظر با مولفه عمود بر صفحه شکست گسل (مولفه TR)

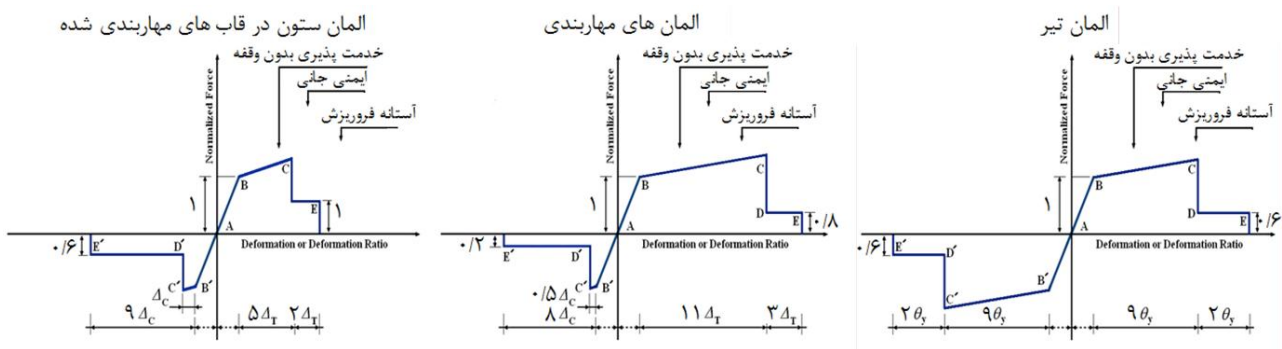


۳- مدل‌سازی رفتار هیستریزس

یک معیار کاربردی برای بررسی رفتار غیرخطی المان‌های سازه، تمرکز بر تعریف مشخصه‌های تحلیلی در موقعیت‌های احتمالی تشکیل و گسترش مفاصل پلاستیک است. همچنین لازمه انجام هرگونه تحلیل‌های غیرخطی، معرفی مشخصات مفصل غیرخطی (مفصل پلاستیک) است. این مفاصل در نقاطی از اعضا که احتمال تجاوز دامنه عددی کرنش‌های داخلی از کرنش‌های تسلیم وجود دارد، تعریف می‌شوند. رفتار واقعی اجزا در یک سازه حقیقی با عدم قطعیت‌های بیشماری روبرو است. موثرترین و بهترین راهکار آن است که دامنه تحلیلی و ویژگی‌های رفتار غیرخطی، تنها در بخش‌های دارای تمرکز شدید تنش در نظر گرفته شود. سایر قسمت‌های المان نیز در حوزه رفتار خطی باقی می‌ماند. پارامترهای تحلیلی مربوط به مدل‌سازی مفاصل پلاستیک و ویژگی‌های رفتار غیرخطی اعضا (شکل (۴))، براساس ضوابط گزارش‌های FEMA ۳۵۶ و FEMA ۴۴۰ تنظیم

شده است [۱۹-۱۸].

مفاصل پلاستیک با ساختار اندرکنشی خمشی M برای المان‌های شاه تیر لحاظ گردیده و عملکرد لرزه‌ای در کشش و فشار بصورت یکسان فرض شده است. قابلیت رفتار غیرخطی المان‌های مهاربند نیز بر اساس تعریف مفصل نامتقارن P با ویژگی‌های رفتار محوری در حوزه تغییرشکل‌های بزرگ تعریف گردیده است. همچنین دو ساختار اندرکنشی P (منطبق با رفتار در مود کمانش) و PMM (مانند مدل رفتار غیرخطی شاه تیرها) برای ستون‌ها با ویژگی‌های متفاوت عملکردی در کشش و فشار بکار برده شده است. مدل‌های تحلیلی برای توصیف رفتار غیرخطی مفاصل ذکر شده فوق در شکل (۴) نشان داده شده‌اند. همچنین، رفتار همگی المان‌های تیر و ستون مربوط به قاب‌های داخلی دارای اتصالات مفصلی، برای هر چهار مدل مطالعاتی در حوزه خطی فرض می‌شود.



شکل ۴- مدل رفتار غیرخطی اعضا بر اساس FEMA ۳۵۶ و FEMA ۴۴۰، [۱۹-۱۸]

۴- جنبش‌های زمین در حوزه نزدیک گسل

نخستین نشانه‌های تحلیلی حرکات نیرومند زمین در حوزه نزدیک گسل، در دو زلزله Kern County (۱۹۵۲) و نیز Parkfield (۱۹۶۶) کالیفرنیا شناسایی گردید [۲۰]. همچنین با گسترش دامنه پژوهش‌های لرزه‌شناسی، مهم‌ترین و برجسته‌ترین مطالعات تا سال ۱۹۷۸ توسط Housner و همکارانش [۲۱]، Bolt [۲۲]، و Bertero و همکارانش [۲۳] انجام گرفت. Housner و همکارانش دریافته‌اند که تاریخچه زمانی رکوردهای نیرومند حوزه نزدیک مربوط به زلزله‌های بزرگ، می‌تواند شامل پالس‌های به نسبت بلند مدت و پراثری باشد. همچنین دانسته شد که این زلزله‌ها دارای بزرگای متفاوت بوده و همچنین حاوی پالس‌های با دامنه متغیر می‌باشند، بطوری که پتانسیل تخریبی بالایی را ایجاد می‌نمایند. همچنین پالس‌های پردامنه و

مشخص سرعت مربوط به جنبش نیرومند زمین که ناشی از فرآیند لغزش و شکست سریع در مکانیزم گسل می‌باشند، برای نخستین بار توسط Bolt براساس مطالعه حرکات ثبت شده در هنگام وقوع زلزله پرقدرت San Fernando (۱۹۷۱) شناخته شد. خصوصیات جنبش‌های حوزه نزدیک به طور مستقیم وابسته به مکانیزم چشمه لرزه‌ای، جهت گسیختگی گسل نسبت به ساختگاه و نیز جهت لغزش گسل می‌باشند. مهم‌ترین ویژگی متمایزکننده در این موضوع، تولید پالس‌هایی به علت اثرات جهت‌داری (Directivity) و نیز تغییر مکان ماندگار زمین است. نتایج مطالعات لرزه‌شناسی نشان می‌دهند که پالس‌های مذکور شامل یک یا چند ساختار موجی شکل مشخص در رکورد شتاب و همچنین در هر دو تاریخچه زمانی سرعت و تغییر مکان زمین می‌باشند. بدیهی است که پالس‌های مذکور تحت اثرات



نیرومند جهت‌داری پیش‌رونده یا همان شکست پیش‌رونده گسل ایجاد می‌گردند. نمود فیزیکی پالس‌های ناشی از اثرات جهت‌داری، با شکل حرکت تولید شده توسط جابه‌جایی ماندگار زمین متفاوت هستند. جهت‌داری یک پدیده دینامیکی است و بطور مشخص، یک جابه‌جایی ماندگار با نمود و اندازه بزرگ ایجاد نمی‌کند. بطور کلی تاریخچه زمانی سرعت متناظر با آن حاوی یک پالس مشخص دو سویه است. همچنین فرآیند جابه‌جایی ماندگار (حرکت پرتابی) زمین نیز دارای ماهیت حاکم استاتیکی بوده و تاریخچه زمانی سرعت متناظر با آن حاوی یک پالس یکطرفه خواهد بود. نتایج پژوهش‌ها نشان می‌دهد که ویژگی‌های پاسخ دینامیکی سازه‌های میان‌مرتبه تا بلند تحت اثر رکوردهای نیرومند حوزه نزدیک که حاوی اثرات جهت‌داری هستند، به روشنی می‌تواند متأثر از اثرات مشارکت موده‌های ارتعاشی بالاتر باشد [۲۸-۲۴].

وجود پالس‌های پر دامنه و بلند مدت در تاریخچه زمانی سرعت رکوردهای نیرومند حوزه نزدیک باعث می‌شود که بخش عمده‌ای از انرژی زلزله در بازه زمانی یک یا دو پالس بزرگ، با روند بسیار تند به سازه وارد شود. بر خلاف فرآیند فوق، روند آزاد شدن انرژی جنبشی یک رکورد حوزه دور، تمام محدوده زمانی ارتعاشات زمین را پوشش می‌دهد. فرآیند بسیار سریع اعمال انرژی زلزله به سیستم مقاوم سازه‌ها در یک مدت زمان به نسبت کوتاه، سبب تشکیل و گسترش سریع مکانیزم مفاصل غیرخطی در سیستم برابر جانی، همراه با وارد شدن ویژگی‌های رفتاری اعضای اصلی سازه به حوزه غیرخطی خواهد شد [۲۹].

همچنین، از دیگر اثرات حضور پالس‌های پرنانرژی در تاریخچه زمانی این‌گونه زلزله‌ها، انتقال نسبی حداکثر دامنه پاسخ طیفی سازه‌های میان‌مرتبه، به محدوده ابتدایی بخش حساس به سرعت زمین طیف سه‌جانبه و نیز حصول مقادیر به نسبت بالا برای PGV/PGA می‌باشد. افزون بر آن، هر دو ناحیه طیفی حساس به شتاب و بویژه تغییر مکان زمین نیز به لحاظ دامنه زمانی، عریض می‌گردند. چنین ویژگی سبب نمود بیشتر اثرات انتشار امواج زلزله در اسکلت مقاوم ساختمان‌های میان-مرتبه و بخصوص بلند خواهد شد. همچنین افزایش نسبی برش پایه، افزایش نیاز شکل‌پذیری و اثرات موده‌های ارتعاشی بالاتر را نیز به دنبال خواهد داشت [۲۹].

یکی دیگر از ویژگی‌های رکوردهای نیرومند حوزه نزدیک، بزرگتر بودن نسبت عددی بیشینه شتاب مولفه قائم به بیشینه شتاب مولفه افقی در مقایسه با رکوردهای حوزه دور است. دانسته شده که نسبت شتاب قائم به افقی، متغیر بوده و مقدار آن

در مناطق نزدیک چشمه‌های لرزه‌زا، به‌ویژه در هنگام وقوع زلزله‌های با بزرگای بیش از ۵ می‌تواند به محدوده بزرگتر از ۱ نیز برسد. نسبت میانگین حاصل شده از مطالعات، در حدود $\frac{1}{3}$ است که به طور معمول در آیین‌نامه‌ها در نظر گرفته می‌شود. لازم به توضیح است که افزایش نسبت مذکور در خاک‌های نرم نسبت به سایر ساختگاه‌ها بیشتر می‌باشد [۳۰].

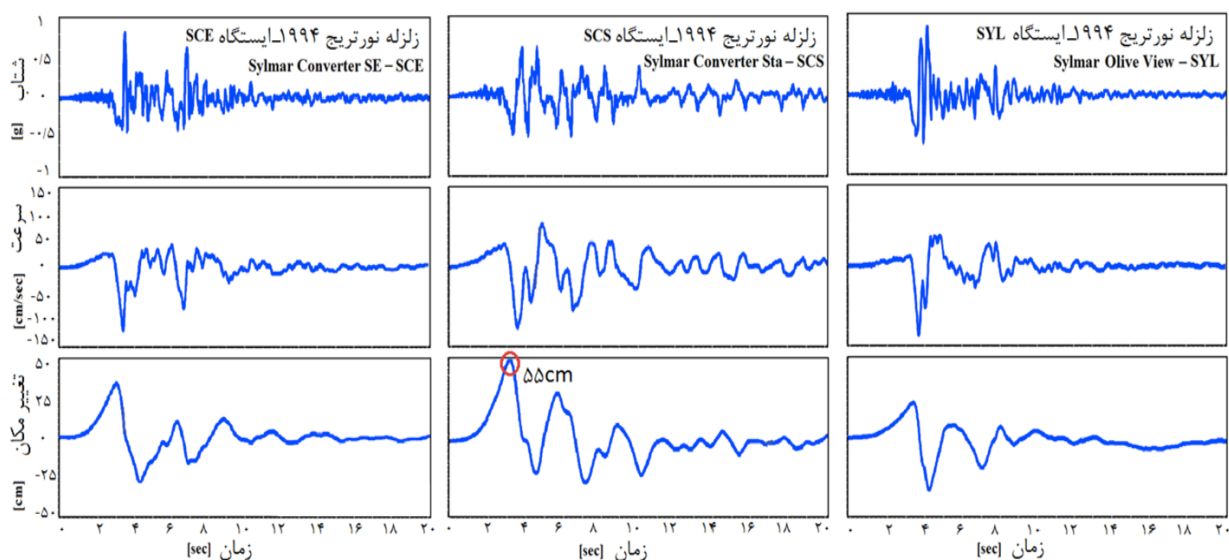
شکل (۵) تاریخچه زمانی شتاب، سرعت و تغییر مکان مولفه عمود بر صفحه شکست گسل (مولفه TR) متناظر با رکوردهای SCE، SCS و SYL را نشان می‌دهد. نمود مشخص اثرات نیرومند جهت‌داری پیش‌رونده (یا فرآیند شکست پیش‌رونده) مربوط به گسل امتداد لغز سن‌آندریاس، در تاریخچه زمانی هر سه رکورد مذکور ملاحظه می‌شود. با دقت در تاریخچه شتاب زمین، ملاحظه می‌شود که رکورد SYL دارای بیشترین مقدار پارامتر PGA بوده و مقدار این پارامتر برای مولفه TR برابر $0.843g$ است. این مقدار برای رکوردهای SCE و SCS به ترتیب $0.828g$ و $0.612g$ می‌باشد. سرعت افقی بیشینه زمین از دیگر پارامترهای توصیف جنبش‌های پالس‌گونه نیرومند حوزه نزدیک است. دامنه تغییرات این پارامتر برای یک مجموعه رکورد ثبت شده در حوزه نزدیک (کمتر از ۱۵ کیلومتر) یک گسل لرزه‌زا، به نسبت زیاد است. نمود اثرات بسیار نیرومند جهت‌داری پیش‌رونده و نیز اثرات نه‌چندان قوی شکست پس‌رونده گسل (اثرات جهت‌داری پس‌رونده) پیامد این موضوع می‌باشد.

نمود اثرات جهت‌داری پس‌رونده در یک گسلش امتداد لغز، بصورت عکس اثرات شکست پیش‌رونده بوده و کاهش قابل توجه برای دامنه پالس‌های سرعت را در تاریخچه زمانی هر دو مولفه موازی صفحه شکست گسل (مولفه LN) و نیز مولفه عمود بر آن (مولفه TR) خواهد داشت. بطور کلی نمود اثرات جهت‌داری پیش‌رونده در تاریخچه هر دو مولفه LN و TR یک رکورد نیرومند زلزله، دارای دامنه عددی و بازه‌های زمانی نزدیک به هم می‌باشد. همچنین بطور معمول، تنها یک کاهش به نسبت کوچک در نمایش ظاهری ساختارهای پالس‌گونه موجود در تاریخچه زمانی مولفه LN این‌گونه رکوردها ملاحظه می‌شود. همچنین پارامتر PGV نیز به عنوان یک مشخصه طیفی در شناخت رکوردهای زلزله در نظر گرفته می‌شود. با دقت در سه تاریخچه سرعت در شکل ۵ دیده می‌شود که رکورد SYL با PGV برابر با $129/86 \text{ cm/s}$ دارای بیشترین مقدار این پارامتر است. همچنین مقادیر متناظر PGV برای رکوردهای SCE و SCS نیز به ترتیب $117/53$ و $118/19$ سانتیمتر بر ثانیه است.

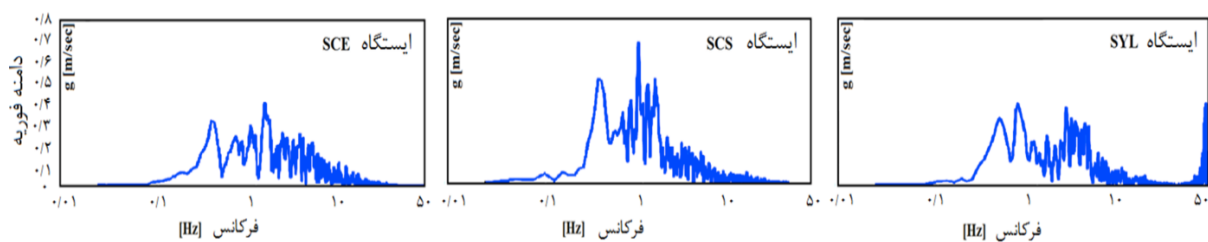


کاربرد و معیارسنجی پارامتر بیشینه جابه‌جایی زمین PGD، بیشتر برای رکوردهای نیرومند حوزه نزدیک مفهوم دارد. احتمال قرارگیری محور طیفی متناظر با یک و یا دو مود ارتعاشی نخست یک ساختمان بلند (با ضریب مشارکت مودی بالا) بویژه در محدوده حساس به تغییر مکان زمین در طیف سه‌جانبه مربوط به رکوردهای نیرومند حوزه نزدیک وجود دارد. بدیهی است که این محدوده طیفی با بازه فرکانس‌های پایین متناظر با پیوند پالس‌های بزرگ و پیوسته سرعت تطابق داشته و همچنین متناظر با دوره تناوب مودهای ارتعاشی هر دو راستای X و Y یک ساختمان بلند نیز می‌باشد. بدین لحاظ، وقوع اثرات با مقیاس بزرگ تشدید دینامیکی در رفتار لرزه‌ای این‌گونه سازه‌ها، دور از انتظار نخواهد بود. رکورد SCS با PGD برابر $52/85$ cm دارای بیشترین مقدار این پارامتر بوده و رکوردهای SYL و SCE نیز به ترتیب دارای مقادیر PGD، $32/37$ cm و $34/33$ cm می‌باشند. تاریخچه زمانی شتاب زمین مربوط به رکوردهای نیرومند حاوی اثرات جهت‌داری پیش‌رونده، می‌تواند پالس پر دامنه و

پیوند بلند (۱ تا ۲ ثانیه) به همراه اسپایک‌های پر انرژی با گام زمانی کوتاه ($0/2$ تا $0/5$ ثانیه) را نمایش دهد. نمود این ویژگی در طیف فوری که معیاری برای سنجش انرژی متناظر با محتوای فرکانسی هر رکورد است، سبب پدیدار شدن مولفه ارتفاعی بزرگ به ازای یک باند مشخص فرکانس‌های پایین (کمتر از ۲ هرتز) تا میانه (کمتر از ۱۵ هرتز) خواهد شد. نگاشت طیف فوری رکوردهای حاوی اثرات جهت‌داری پیش‌رونده، از حالت باند گسترده (Broad Band) خارج شده و به صورت ساختارهای ترکیبی موجک مانند قرار گرفته در یک باند باریک (Narrow Band) فرکانس‌ها در می‌آید. بدین ترتیب در طیف فوری این زلزله‌ها به جای آن که مولفه‌های ارتفاعی (متناظر فرکانس) در یک محدوده بزرگ پیرویدیک دارای حداکثر مقادیر خود باشند، در یک محدوده بسیار کوچک و یا به عبارتی در یک یا چند پیروید خاص دارای ماکزیمم خواهند بود. شکل (۶) طیف فوری متناظر با رکوردهای SCE، SCS و SYL را نمایش می‌دهد.



شکل ۵- تاریخچه زمانی شتاب، سرعت و جابه‌جایی رکوردهای SCE، SYL و SCS متناظر با مولفه عمود بر صفحه شکست گسل (مولفه TR)؛ هر سه رکورد در حوزه Sylmar جنوب کالیفرنیا و در هنگام زلزله نورتریج ۱۹۹۴ ثبت شده‌اند.



شکل ۶- طیف فوری رکوردهای SCE، SYL و SCS متناظر با مولفه عمود بر صفحه شکست گسل (مولفه TR)

طیف فوریه رکوردهای نیرومند حوزه نزدیک بویژه در محدوده فرکانس‌های پایین، دارای مولفه‌های ارتفاعی بسیار بزرگ بوده و در باند فرکانس‌های بالا متناسب با پریود مودهای بالاتر، حاوی مولفه‌های ارتفاعی به نسبت کوتاه است.

۵- رکوردهای سه مولفه‌ای انتخابی

با توجه به پراکندگی‌های زیاد در دامنه پاسخ دینامیکی سازه تحت اعمال رکوردهای مختلف زلزله، نیاز به استفاده از گروه جنبش‌های نیرومند زمین با ساختار فیزیکی به نسبت یکسان، امری ضروری است. معیار اصلی در انتخاب رکوردهای سه مولفه‌ای زلزله در این پژوهش، توجه به خصوصیات فیزیکی اثرات شکست پیش‌رونده گسل، پدیدار شدن ساختارهای پالس‌گونه شتاب، همچنین وجود پالس‌های پرنرژی و بلند مدت در تاریخچه زمانی سرعت است. تجمع آثار امواج برشی در مسیر پیش‌سوی گسیختگی گسل و وجود ساختارهای پالس‌گونه در تاریخچه زمانی رکوردهای پر قدرت حوزه نزدیک،

نشان‌دهنده روند شدید آزاد شدن انرژی جنبشی در یک مدت زمان کوتاه و در طی وقوع گسیختگی در ساختار گسل است. موضوع فوق علاوه بر اینکه باعث به وجود آمدن پدیده تشدید در رفتار سازه‌های بلند می‌گردد، سبب بروز واکنش لرزه‌ای با ویژگی ترد در المان‌های اسکلت مقاوم نیز خواهد شد. وقوع این امر در رفتار لرزه‌ای سازه‌های ساخته شده در نزدیک گسل، به علت احتمال بروز جنبش‌های نیرومند پالس‌گونه و ماهیت ضربه‌ای نیروهای دینامیکی، چندان دور از انتظار نیست.

رکوردهای انتخابی در این پژوهش شامل مجموعه‌ای از رکوردهای نیرومند است که در نواحی نزدیک و دور از گسل ثبت شده‌اند [۳۱]. مهمترین پارامترهای فیزیکی رکوردهای انتخابی نظیر بیشینه شتاب زمین (PGA)، بیشینه سرعت زمین (PGV) و بزرگای مومتوم (MW) به ترتیب در جدول (۵) نمایش داده شده است. رکورد MRP از نوع حوزه دور بوده و رکوردهای دیگر در طبقه‌بندی حوزه نزدیک قرار می‌گیرند.

جدول ۵- مشخصات طیفی رکوردهای انتخابی در این پژوهش

PGD/PGV (sec)	PGV/PGA (sec)	Magnitude Mw	بیشینه تغییر مکان، PGD (cm)	بیشینه سرعت، PGV (cm/s)	بیشینه شتاب، PGA (g)	مدت دوام، Duration (sec)	مولفه	زلزله
۰/۴۰	۰/۱۲	۷/۴	۳۹/۹	۹۷/۷	۰/۸۳۶	۳۰	LN	Tabas 1978
۰/۷۸	۰/۱۴		۹۴/۵	۱۲۱/۳	۰/۸۵۱		TR	Tabas City - 3.0 km
۰/۳۷	۰/۰۶		۱۷	۴۵/۵	۰/۶۸۸		UP	
۰/۳۴	۰/۰۹	۶/۶	۲۰/۷	۵۹/۶	۰/۶۳۵	۳۰	LN	Bam 2003
۰/۳۰	۰/۱۶		۳۷/۴	۱۲۳/۷	۰/۷۹۳		TR	Bam City - 1.0 km
۰/۲۶	۰/۰۳		۱۰/۱۱	۳۷/۶۶	۰/۹۹۹		UP	
۰/۲۰۴	۰/۱۳	۶/۷	۱۶/۴۱	۷۸/۲۴	۰/۶۰۴	۳۰	LN	Northridge 1994
۰/۲۵	۰/۱۶		۳۲/۲۱	۱۲۹/۳۵	۰/۸۴۳		TR	Sylmar (SYL) - 6.4 km
۰/۵۱	۰/۰۴		۹/۷۶	۱۹/۱۴	۰/۵۳۵		UP	
۰/۲۴	۰/۱۱	۶/۷	۴/۷۹	۲۰/۲	۰/۱۹	۳۰	LN	Northridge 1994
۰/۲۰	۰/۰۷		۴/۴۴	۲۰/۷	۰/۲۹		TR	Moorpark Fire Sta. (MRP) - 28 km
۰/۱۱	۰/۰۵		۰/۹۰	۷/۹	۰/۱۶		UP	
۰/۲۴	۰/۱۷	۶/۷	۲۴	۹۹/۳	۰/۵۹۳	۳۰	LN	Northridge 1994
۰/۴۱	۰/۲۶		۴۳/۰۶	۱۰۶/۲	۰/۴۲۴		TR	Jensen Filter Plant (JFP) - 6.1 km
۰/۲۶	۰/۰۸۷		۸/۸۹	۳۴/۱	۰/۴۰		UP	
۰/۴۲	۰/۱۶	۶/۵	۲۷/۱۸	۶۴/۷۱	۰/۴۱	۳۰	LN	Imperial Valley 1979
۰/۶۳	۰/۲۶		۷۰/۰۷	۱۱۰/۹۳	۰/۴۳۹		TR	Array E06 - 1.0 km
۰/۵۰	۰/۰۳۴		۲۷/۸۸	۵۵/۸۹	۱/۶۵۵		UP	
۰/۶۰	۰/۰۴	۷/۲	۲۳/۷۶	۳۹/۳۷	۰/۹۸۱	۳۰	LN	Landers 1992
۰/۸۹	۰/۱۴		۱۱۰/۲۹	۱۲۴/۶۱	۰/۹۰۱		TR	Lucerne Valley (LCN) - 1.1 km
۰/۵۳	۰/۰۶		۳۰/۵۷	۵۷/۶۹	۱/۰۲۳		UP	



همگی رکوردهای انتخابی در این پژوهش به صورت طبیعی سه مولفه‌ای در جهات X ، Y و Z اسکلت مقاوم و به صورت همزمان به سازه‌های مطالعاتی اعمال گردیده است (شکل (۱)). شتاب‌نگاشت رکوردهای نیرومند حوزه نزدیک، می‌تواند بیانگر رفتار واقعی زمین در لحظه شکست ساختار گسل باشد. مولفه موازی با صفحه شکست گسل (مولفه LN) در راستای X و همچنین مولفه نیرومندتر عمود بر صفحه شکست گسل (مولفه TR) در راستای Y پلان سازه و مولفه عمودی (مولفه UP) در جهت Z وارد گردیده است، جدول (۵)). مجموعه تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی تاریخچه زمانی برای تمامی سازه‌های مطالعاتی توسط دو نرم افزار SAP2000 و PERFORM3D انجام شده است [۳۲ و ۳۳].

۶- پاسخ غیرخطی سازه‌های مطالعاتی

تاکنون مطالعات فراوانی در زمینه رفتار خطی استاتیکی و دینامیکی ساختمان‌های بلند با چیدمان کمربندهای سخت‌کننده پیرامونی صورت گرفته است [۳۷-۳۴]. این پژوهش دربرگیرنده مشخصات رفتار دینامیکی غیرخطی سازه‌های مطالعاتی شکل (۱) تحت رکوردهای نیرومند زلزله است. مشخصات لرزه‌شناسی رکوردهای سه مولفه‌ای جدول (۵)، نمود روشنی از اثرات نیرومند جهت‌داری به همراه اسپایک‌های پرنانژی شتاب و پالس‌های پر دامنه سرعت است. نکته دیگر آن که برای رکوردهای حوزه نزدیک حاوی اثرات شکست پیشرونده گسل و فرآیند جهت‌داری پیش‌رو (Directivity Forward)، باند فرکانس‌های پرنانژی شتاب زمین در بازه ۰/۵ تا ۵ هرتز قرار دارد. ملاحظه می‌شود که بازه پریودیک متناظر دامنه فرکانسی فوق، دربرگیرنده زمان تناوب چند مود ارتعاشی نخست ساختمان‌های بلند است. نزدیک بودن پریود پالس بزرگ منفرد سرعت و یا پریود هر یک از چند پالس مشخص موجود در تاریخچه زمانی یک رکورد پر قدرت حوزه نزدیک، بویژه به محدوده زمان تناوب نخستین مود ارتعاشی انتقالی و همچنین اولین مود پیچشی، روند بسیار شدید رفتار لرزه‌ای را به دنبال خواهد داشت.

این موضوع، عاملی بر پدیدار شدن اثرات دامنه بزرگ تشدید دینامیکی در رفتار لرزه‌ای سازه‌های بلند است. وقوع این فرآیند در بازه زمانی رکوردهای زلزله حاوی اثرات جهت‌داری پیش‌رو، بصورت تدریجی مشخصات رفتار پیچشی سخت طرح شده برای اسکلت ساختمان بلند را به عملکرد پیچشی نرم (همراه با نزدیک شدن به وضعیت فروریزش) تبدیل می‌نماید. پدیدار

شدن ساختارهای موجی شکل در تاریخچه یک رکورد پر قدرت زلزله سبب ایجاد حرکت ضربه‌ای بسیار نیرومند زمین در منطقه نزدیک به صفحه شکست گسل می‌شود (شکل‌های (۷) و (۸)).

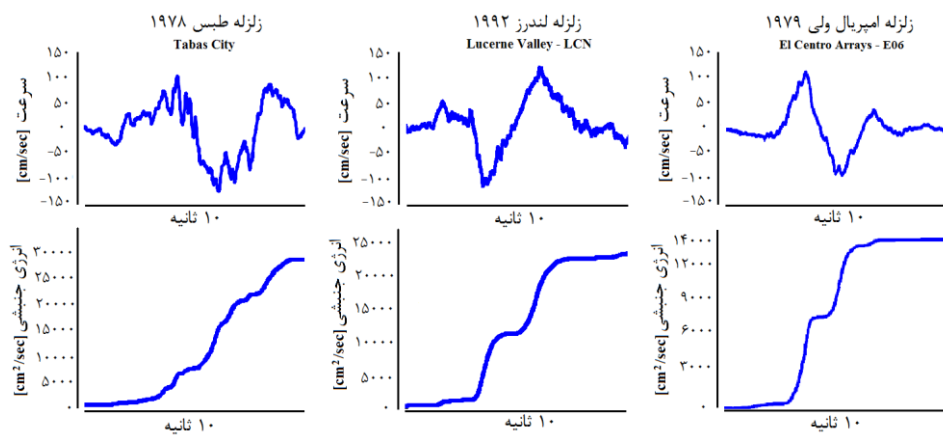
بر پایه هر دو شکل (۷) و (۸)، همگام با فراز و نشیب‌های موضعی در دامنه زمانی پالس‌های سرعت، یک روند جهشی در آزاد شدن انرژی جنبشی بوجود می‌آید. مطابق شکل (۷) ملاحظه می‌شود که تاریخچه زمانی سرعت زمین متناظر با مولفه TR رکوردهای نیرومند Tabas، LCN و E06 دارای پالس پر دامنه و بسیار بلند مدت است که ساختار عمومی تک موج شبه‌سینوس را نشان می‌دهد. دامنه تغییرات منحنی آزاد شدن انرژی جنبشی نیز بصورت یک روند افزایشی پیوسته و بلند مدت می‌باشد. نمود فیزیکی هر دو عامل سرعت و انرژی جنبشی طبق مطلب فوق، سبب پدیدار شدن جنبش هجومی زمین در شکل یک پالس بسیار بزرگ تغییر مکان خواهد بود.

مطابق شکل (۸) تاریخچه زمانی سرعت زمین متناظر با مولفه TR رکوردهای حوزه نزدیک و نیرومند Bam، SYL و JFP حاوی پالس‌های چند موجی و بلند مدت سرعت می‌باشد. نکته دیگر نیز وجود آرایش غیر هم‌زمان پدیدار شدن این ساختارهای موجی شکل است.

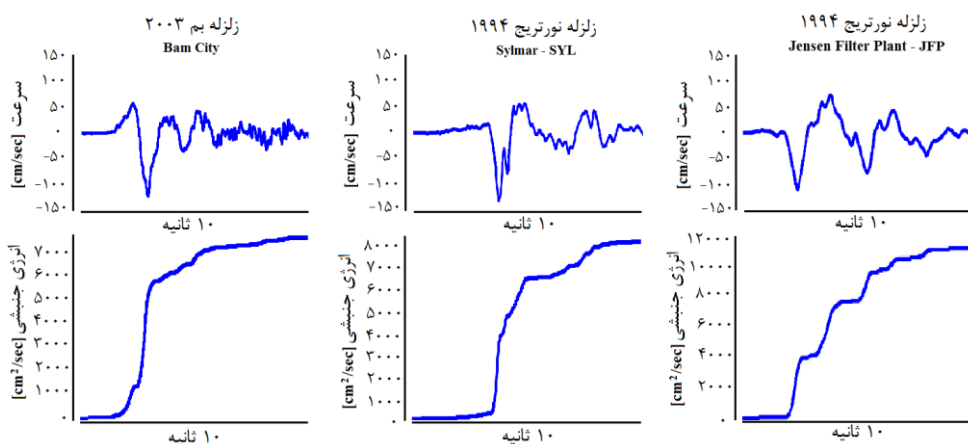
بدین ترتیب، نمایش رفتار ضربه‌ای زمین نیز بصورت ترکیبی از نیم موج‌های سینوسی با پریود به نسبت زیاد (بیش از ۱ ثانیه) خواهد بود. دامنه تغییرات در روند آزاد شدن انرژی جنبشی این‌گونه رکوردها، از ساختار فیزیکی پالس‌های سرعت پیروی می‌نماید. یک فرآیند جهشی پلکانی متناظر با موقعیت زمانی هر یک از پالس‌های جداگانه سرعت در تاریخچه زمانی آزاد شدن انرژی جنبشی حادث می‌شود. نمود فیزیکی این فرآیند نیز به صورت رفتار دینامیکی زمین در شکل چند ضربه پر قدرت و با فواصل بسیار کوتاه زمانی خواهد بود. ماهیت ضربه‌ای پالس‌های بزرگ تغییر مکان زمین سبب افزایش شدید پاسخ‌های لرزه‌ای ساختمان‌های بلند خواهد شد [۳۸].

نتایج مطالعات لرزه‌شناسی نشان می‌دهد که یک ارتباط فیزیکی دو جانبه میان فرآیند انتشار سه بعدی امواج زلزله و نیز مکانیزم گسیختگی گسل برقرار است. نمود اثرات متناظر این موضوع در پدیدار شدن دو گروه مشخص پالس‌های پر دامنه و بلند مدت سرعت می‌باشد که در شکل‌های (۷) و (۸) نمایش داده شده‌اند [۳۹ و ۴۰].





شکل ۷- روند آزاد شدن سریع انرژی جنبشی ناشی از ارتعاشات نیرومند زمین در بازه زمانی پالس منفرد سرعت؛ با ساختار پیوسته تک موج شبه سینوسی پردامنه و بلندمدت (مولفه TR)



شکل ۸- روند آزاد شدن سریع انرژی جنبشی ناشی از ارتعاشات نیرومند زمین در بازه زمانی پالس ترکیبی سرعت؛ با ساختار ترکیبی چند موج نیم سینوسی پردامنه و بلندمدت (مولفه TR)

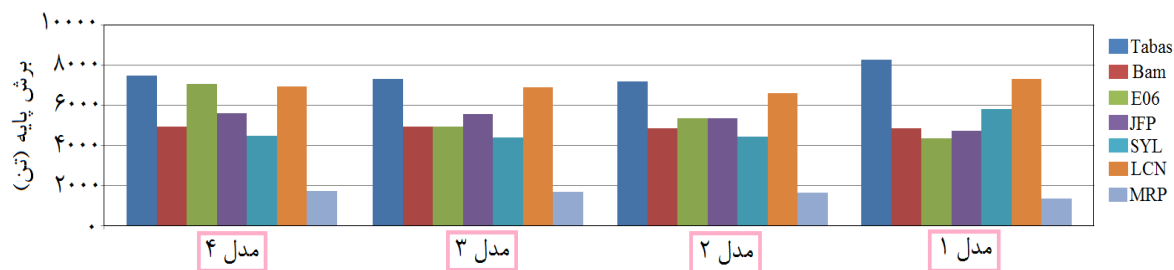
۶-۱- بررسی برش پایه

شکل (۹) بیشینه برش پایه مدل‌های مطالعاتی را تحت رکوردهای انتخابی نمایش داده است. بررسی نتایج نشان می‌دهد که پارامتر بیشینه برش پایه در مدل تحت رکوردهای حاوی پالس سرعت با پررود بلند، به میزان قابل توجهی نسبت به مقدار حاصل از رکورد حوزه دور MRP بیشتر است. همچنین، متوسط برش پایه تحت رکوردهای نیرومند Tabas، LCN و E06 که دارای یک پالس منفرد و بزرگ سرعت هستند، نسبت به میانگین حاصل از سه رکورد پر قدرت Bam، SYL و JFP، حاوی پالس پردامنه و چند موجی سرعت، بیشتر می‌باشد. رکورد نه چندان نیرومند و حوزه دور Moorpark (MRP) از زلزله نورتریج ۱۹۹۴ نیز مقادیر برش پایه بسیار پایین‌تری را نسبت به رکوردهای نشان داده شده در دو شکل (۷) و (۸) ایجاد نموده است.

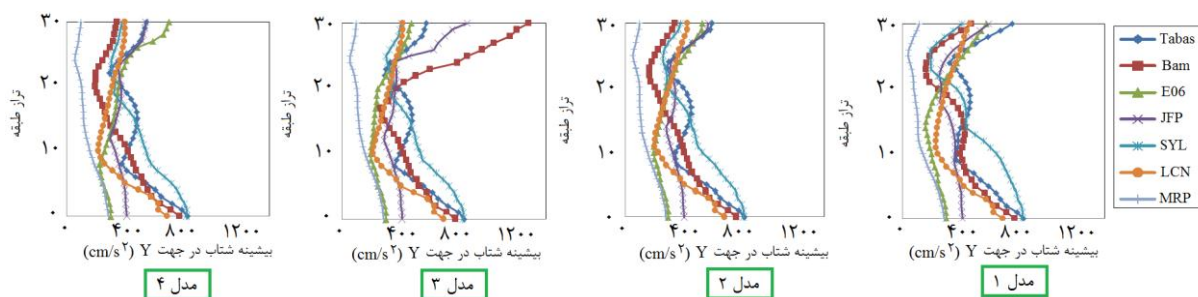
۶-۲- بررسی پوش بیشینه شتاب مطلق طبقات

این پارامتر پاسخ، به دلیل مقادیر بالای شتاب پایه ساختمان در محل فنداسیون و نیز پدیدار شدن ساختار موج‌گونه در تاریخچه زمانی سرعت زمین، به نسبت دارای مقادیر بزرگی می‌باشد. شکل (۱۰) نمودارهای بیشینه شتاب مطلق طبقات در راستای Y پلان را نمایش داده است. روند تغییرات پوش شتاب مطلق طبقات تا یک ارتفاع مشخص از سازه، بصورت کاهشی و پس از آن دوباره آهنگ افزایشی دارد. یک نمود مشخص به لحاظ تاثیرگذاری نوع پالس سرعت هر رکورد، وجود دامنه افزایشی ناشی از اثر مودهای ارتعاشی بالاتر است. همچنین ملاحظه می‌شود که با افزایش سختی کمر بند خرابایی فوقانی سازه، تغییرات چندان در بیشینه شتاب طبقات بویژه بخش بالایی اسلکت مقاوم بوجود نمی‌آید. ویژگی مذکور نسبت به هر دو گروه رکوردهای شکل‌های (۷) و (۸) یکسان است.





شکل ۹- مقادیر بیشینه برش پایه دینامیکی در راستای Y پلان (شکل (۱))



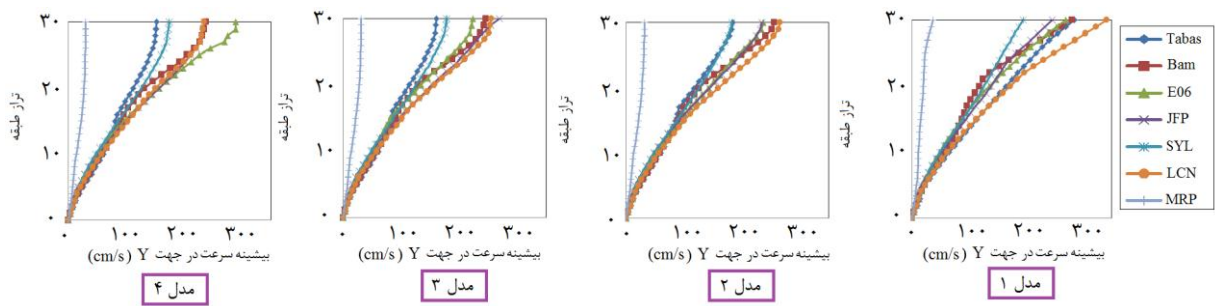
شکل ۱۰- پوش حداکثر شتاب مطلق طبقات در محل مرکز جرم G_m در راستای Y پلان (شکل (۱))

مربوط به مولفه TR دو رکورد Tabas و SYL به نسبت کوچکتر است.

ماهیت رانندگی و متفاوت رکوردهای فوق را می‌توان براساس نمودارهای تجمعی انرژی جنبشی در شکل‌های (۷) و (۸) ملاحظه نمود. دامنه ماکزیمم عددی این نمودارها متناظر با دو رکورد E06 و JFP، دارای نزدیکی نسبی بوده و بطور مشخص با کرانه عددی بالایی حاصل از نمودار مربوط به رکورد Bam متفاوت است. افزون بر آن، مشاهده می‌شود که پریرود مود اول ارتعاشی سازه‌های مطالعاتی ۲، ۳ و ۴ (جدول (۴)) دارای نزدیکی عددی با دو مقوله ساختارهای پالس‌گونه موجود در تاریخچه زمانی سرعت می‌باشند. مقوله نخست از بحث فوق، نزدیکی زیاد پریرود نیم‌گام پالس بزرگ مولفه TR مربوط به دو رکورد LCN و E06 (شکل (۷)) با میانگین پریرود ارتعاشی مود اول مدل‌های مطالعاتی ۲، ۳ و ۴ است. مقوله دوم بحث مذکور عبارت از برابری نسبی پریرود تک پالس مشخص سرعت رکورد Bam با گام زمانی حدود ۳/۲ ثانیه و همچنین پریرود دو پالس مشخص و پشت سر هم سرعت در مولفه TR رکورد JFP به ترتیب ۳/۵ و ۳/۱ ثانیه (شکل (۸))، با پریرود ارتعاشی مود اول مدل‌های مطالعاتی ۲، ۳ و ۴ است. همچنین به دلیل تقارن در بارگذاری و هندسه سازه‌های مطالعاتی، هر دو مقوله مذکور برای راستاهای X و Y بصورت یکسان است.

۳-۶- بررسی پوش بیشینه سرعت نسبی طبقات

شکل (۱۱) نمودارهای بیشینه سرعت نسبی طبقات در راستای Y پلان را نشان می‌دهد. بررسی کلی نمودار سرعت نشان‌دهنده یک روند افزایشی در راستای ارتفاع سازه است. وجود کمربند خرابایی از این روند افزایشی جلوگیری کرده و در محل‌هایی که این کمربند وجود دارد، نرخ افزایش سرعت طبقات کاهش یافته است. جدول (۶) ماکزیمم بیشینه سرعت در مدل‌های مطالعاتی برای هر یک از رکوردهای جدول (۵) و همچنین درصد کاهش این مقادیر نسبت به مدل بدون کمربند خرابایی را نشان می‌دهد. بر پایه جدول (۶)، ملاحظه می‌شود که پاسخ سازه‌های دارای پانل‌های مهاربندی با آرایش یک، دو و سه طبقه در پیکربندی کمربند سخت‌کننده فوقانی، به ترتیب دارای میانگین کاهش ۱۴/۶۹، ۱۶/۱۲ و ۱۹/۰۴ درصدی در میزان بیشینه سرعت نسبی طبقات نسبت به مدل بدون کمربند سخت‌کننده می‌باشند. کاهش پارامتر بیشینه سرعت نسبی طبقات برای مدل‌های دارای کمربند سخت‌کننده فوقانی (مدل‌های ۲، ۳ و ۴) تحت رکوردهای نیرومند Tabas، LCN و E06، دارای دامنه بزرگتری نسبت به نتایج متناظر حاصل از اعمال سه رکورد پرقدرت Bam، SYL و JFP است. بررسی نمودارهای شکل (۱۱) و نتایج جدول (۶)، نشان‌دهنده نزدیکی نسبی میان منحنی مربوط به مولفه TR رکوردهای LCN و E06 (شکل (۷)) و نیز رکوردهای Bam و JFP (شکل (۸)) می‌باشد. دامنه تغییرات نمودارهای



شکل ۱۱- پوش حداکثر سرعت نسبی طبقات در محل مرکز جرم C_m در راستای Y پلان (شکل (۱))

جدول ۶- مقایسه سرعت نسبی طبقات برای مدل‌های دارا و بدون کمر بند سخت کننده (cm/s)

MRP		LCN		SYL		JFP		E06		BAM		Tabas		مدل
درصد کاهش	بیشینه سرعت	درصد کاهش	بیشینه سرعت	درصد کاهش	بیشینه سرعت	درصد کاهش	بیشینه سرعت	درصد کاهش	بیشینه سرعت	درصد کاهش	بیشینه سرعت	درصد کاهش	بیشینه سرعت	
نسبت به مدل ۱	۳۷/۱۵	نسبت به مدل ۱	۳۴۱/۲۳	نسبت به مدل ۱	۱۹۵/۰۸	نسبت به مدل ۱	۲۴۵/۷۲	نسبت به مدل ۱	۲۶۹/۵۳	نسبت به مدل ۱	۲۸۰/۹۲	نسبت به مدل ۱	۲۸۴/۴۹	۱
۱۴/۶۹	۳۲/۲	۲۲/۱۰	۲۶۵/۸۲	۶/۴۸	۱۸۲/۴۳	۴/۶۴	۲۴۳/۳۳	۱۲/۲۷	۲۳۶/۴۷	۸/۹۴	۲۵۵/۸	۳۵/۱۱	۱۸۴/۶۱	۲
۱۶/۱۲	۳۱/۳۴	۲۵/۱۲	۲۵۵/۵۳	۸/۶۸	۱۷۸/۱۷	-۹/۵	۲۶۹/۰۷	۱۷/۰۶	۲۲۳/۵۴	۱۲/۷۳	۲۴۵/۱۷	۴۳/۱۵	۱۶۱/۷۳	۳
۱۸/۸۲	۳۰/۱۶	۳۱/۳۰	۲۳۴/۴۲	۱۰/۲۵	۱۷۵/۰۸	۴/۶۴	۲۴۳/۳۱	۶/۸۲	۲۵۱/۱۵	۱۵/۲۷	۲۳۸/۰۱	۴۶/۲۱	۱۵۳/۰۴	۴

۶-۴- بررسی تغییر مکان نسبی طبقات

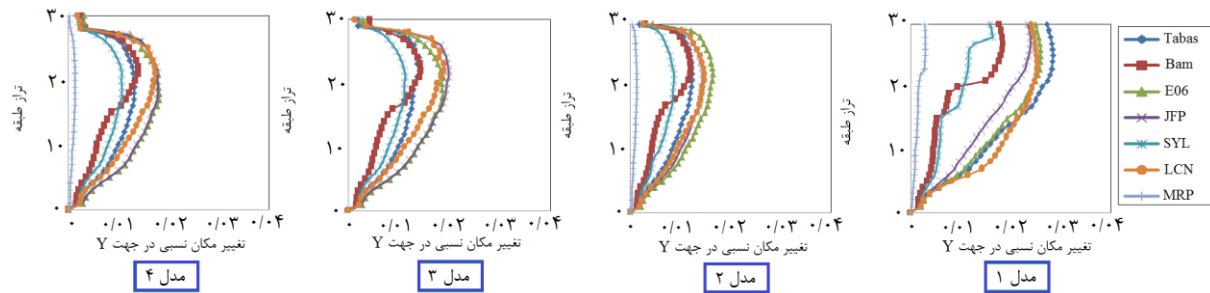
یکی از معیارهای مهم در طراحی ساختمان‌های بلند، ارزیابی و مطالعه روند تغییرات جابجایی نسبی (دریفت) طبقات سازه است. بدین ترتیب در صورت عدم برآورده شدن حد مجاز این پارامتر نیاز، سطح عملکرد لرزه‌ای متناظر با گستره پاسخ غیرخطی المان‌های اصلی سازه می‌تواند از حد ایمنی جانی نیز تجاوز کند. شکل (۱۲) پوش بیشینه تغییر مکان نسبی طبقات را برای مدل‌های مطالعاتی در راستای Y پلان که مولفه عمود بر صفحه شکست گسل (مولفه TR) در آن جهت وارد شده نشان می‌دهد. مدل بدون کمر بند سخت‌کننده، حد آیین‌نامه‌ای را که برای ساختمان‌های با زمان تناوب اصلی بیشتر و مساوی ۰/۷ sec برابر با ۰/۰۲ است، تصدیق نمی‌نماید. همچنین بیشترین نیاز دریفت در طبقات بالایی سازه اتفاق افتاده است.

بررسی نمودارهای تغییرات بیشینه دریفت طبقات، نشان‌دهنده پدیدار شدن کاهش چشمگیر در میزان این پارامتر بویژه در ترازهای دارای کمر بند سخت‌کننده و همچنین پایین‌تر آمدن محل وقوع بیشینه این پارامتر است. جدول (۷) ماکزیمم تغییر مکان نسبی سازه‌های مطالعاتی برای هر یک از رکوردهای جدول (۵) و همچنین درصد کاهش این مقادیر نسبت به مدل بدون کمر بند خرابایی را نشان می‌دهد.

نتایج حاکی از آن است که پاسخ سازه‌های مطالعاتی دارای پیکربندی کمر بند سخت‌کننده فوقانی بصورت مدل‌های یک، دو و یا سه طبقه، به ترتیب بیان‌گر میانگین کاهش ۳۰/۷۴، ۳۲/۰۹ و ۳۶/۶۱ درصدی در میزان دریفت طبقات نسبت به مدل بدون کمر بند سخت‌کننده می‌باشند. موضوع تاثیر گذاری ماهیت رانندوم رکوردهای هر دو شکل (۷) و (۸) همراه با توضیحات داده شده در بند ۶-۳، درباره ساختار منحنی‌های دریفت شکل (۱۲) نیز برقرار است (مدل‌های ۲، ۳ و ۴). بیشترین دامنه عددی پارامتر پاسخ دریفت تحت سه رکورد LCN و E06 (شکل (۷)) و نیز JFP (شکل (۸)) ایجاد گردیده است. نزدیکی نسبی منحنی تغییرات پارامتر دریفت برای هر سه رکورد مذکور، براساس شباهت ساختار پلکانی مشخص در نمودارهای تجمعی انرژی جنبشی (شکل‌های (۷) و (۸)) قابل ملاحظه است. ماهیت جنبش‌های نیرومند ضربه‌ای زمین برای رکوردهای LCN و E06 با دو پرش مشخص پلکانی انرژی تبیین می‌گردد. این روند برای رکورد JFP نیز با سه پرش مشخص پلکانی انرژی، متناظر است. همین مفهوم نیز برای تبیین تفاوت پاسخ دریفت متناظر با مولفه TR رکورد Bam و سه رکورد فوق برقرار می‌باشد. بر پایه شکل (۷)، شباهت ظاهری نمودارهای پالس سرعت و نیز انرژی جنبشی مربوط به دو رکورد Bam و SYL به نسبت

زیاد است. با این وصف، تفاوت قابل ملاحظه‌ای میان منحنی تغییرات دررفت ماکزیمم حاصل از این دو رکورد، بویژه از ترازهای بالاتر از طبقه ۱۵ دیده می‌شود. نمونه دیگری از تاثیرگذاری ماهیت راندم جنبش‌های نیرومند حوزه نزدیک در ایجاد تفاوت قابل ملاحظه برای پارامتر نیاز دررفت را می‌توان برای رکورد Tabas ملاحظه نمود. مطابق شکل (۷)، یک نمود پیوسته افزایشی در طول ۱۰ ثانیه برای آزاد شدن انرژی جنبشی این رکورد وجود دارد. این فرآیند نیز متناظر با یک پالس

مشخص شبه سینوسی بزرگ است. مقدار PGV مولفه TR این رکورد نیز تفاوت چندانی با سایر جنبش‌های حوزه نزدیک جدول (۵) ندارد. پالس پدرومانه و پیوسته سرعت Tabas، بزرگ‌ترین و پرانرژی‌ترین ساختار موجی‌شکل در تاریخچه زمانی رکوردهای جدول (۵) است. بیشینه پارامتر پاسخ دررفت تحت این رکورد، فقط برای سازه بدون کمر بند سخت‌کننده (مدل ۱) دارای بزرگ‌ترین مقادیر است.



شکل ۱۲- پوش حداکثر تغییر مکان نسبی طبقات در نقطه D در راستای Y پلان (شکل (۱))

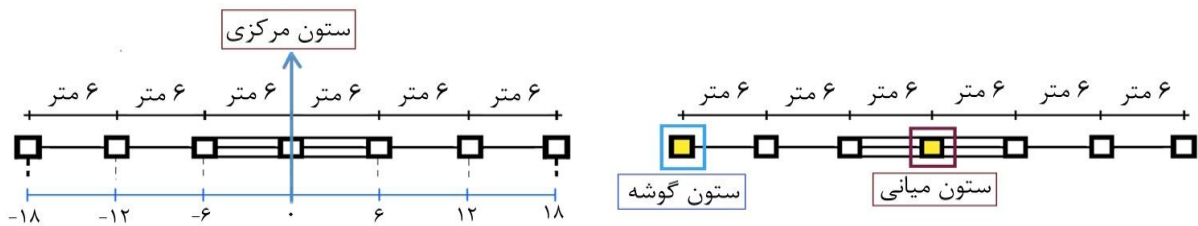
جدول ۷- مقایسه تغییر مکان نسبی برای مدل‌های دارا و بدون کمر بند سخت‌کننده

MRP		LCN		SYL		JFP		E06		BAM		Tabas		مدل
درصد	بیشینه	درصد	بیشینه	درصد	بیشینه	درصد	بیشینه	درصد	بیشینه	درصد	بیشینه	درصد	بیشینه	
کاهش	دررفت	کاهش	دررفت	کاهش	دررفت	کاهش	دررفت	کاهش	دررفت	کاهش	دررفت	کاهش	دررفت	۱
نسبت		نسبت		نسبت		نسبت		نسبت		نسبت		نسبت		
به مدل	۰/۰۰۳	به مدل	۰/۰۲۵۲	به مدل	۰/۰۱۶۵	به مدل	۰/۰۲۳۸	به مدل	۰/۰۲۵۹	به مدل	۰/۰۱۸۵	به مدل	۰/۰۲۸۴	
۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	
۴۵/۵۶	۰/۰۰۱۶	۲۶/۵۳	۰/۰۱۸۵	۳۳/۷۲	۰/۰۱۰۹	۲۳/۸۸	۰/۰۱۸۱	۲۰/۶۷	۰/۰۲۰۶	۱۸/۲۲	۰/۰۱۵۱	۴۵/۶۱	۰/۰۱۵۴	۲
۵۲/۹۱	۰/۰۰۱۴	۲۴/۵۶	۰/۰۱۹	۳۰/۹۷	۰/۰۱۱۴	۱۶/۲۶	۰/۰۱۹۹	۲۷/۶۲	۰/۰۱۸۸	۲۲/۱۲	۰/۰۱۴۴	۵۰/۲۲	۰/۰۱۴۱	۳
۵۶/۰۴	۰/۰۰۱۳	۳۱/۲۷	۰/۰۱۷۳	۳۴/۹۷	۰/۰۱۰۷	۲۵/۳۸	۰/۰۱۷۸	۳۰/۳۱	۰/۰۱۸۱	۲۴/۶۳	۰/۰۱۳۹	۵۳/۶۸	۰/۰۱۳۱	۴

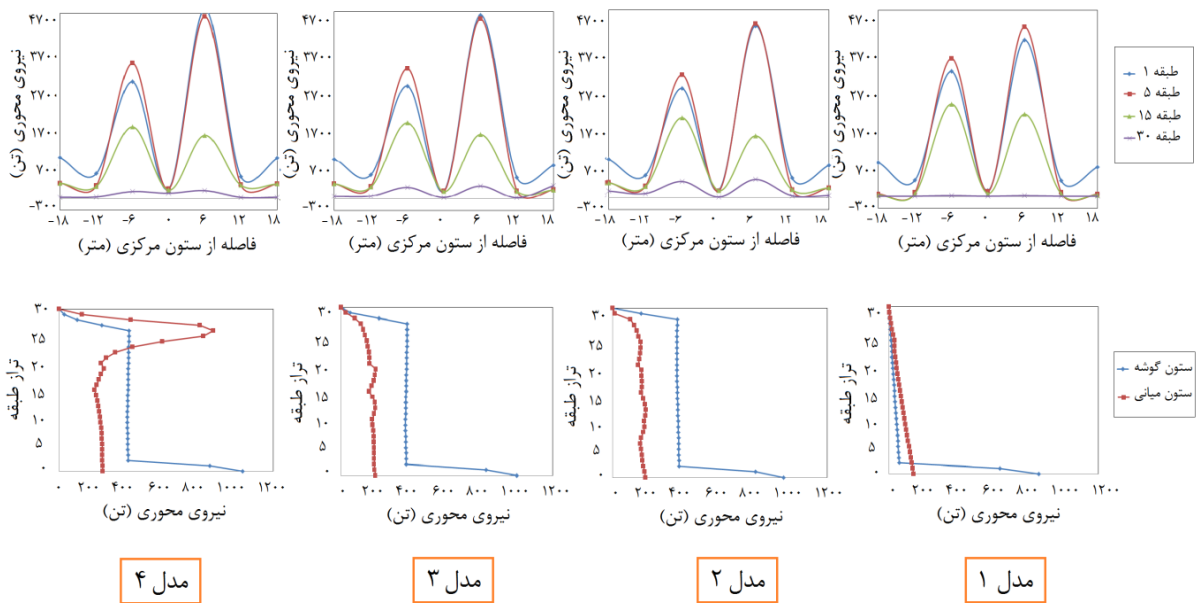
خاص اندازه نیروی محوری ستون‌های گوشه و میانی، بسیار نزدیک به هم خواهد شد. این نوع آرایش پخش بیشینه نیروی محوری دینامیکی دارای توزیع کمانی شکل است. با توجه به الگوی بار جانبی ناشی از فرآیند راندمم زلزله، مقدار بیشینه نیروهای محوری در المان‌های ستون طبقه اول اتفاق می‌افتد و در طبقه آخر به مقدار کمینه خود می‌رسد. اثرات صلیب بالای کمر بند سخت‌کننده فوقانی با پیکربندی یک، دو و نیز سه طبقه‌ای پانل‌های مهاربندی شده، سبب افزایش نسبی نیروی محوری دینامیکی المان‌های ستون بویژه در طبقه اول می‌شود. وجود کمر بند سخت‌کننده، سبب یک روند افزایش نسبی برای نیروی محوری در ستون‌های اسکلت مقاوم سازه

۶-۵- بررسی نیروی محوری دینامیکی ستون‌ها
بیشینه نیروی محوری دینامیکی ستون‌های انتخابی از سازه‌های مطالعاتی، بر پایه انجام تحلیل‌های غیرخطی تاریخچه زمانی و تحت رکوردهای سه مولفه‌ای حاصل گردیده‌اند. نمودارهای موجود در شکل‌های (۱۳) تا (۱۵)، نمایش بیشینه نیروی محوری تحت دو رکورد حوزه نزدیک و بسیار نیرومند Tabas و SYL برای یک خط قاب از پلان مدل‌های مطالعاتی است. براساس نتایج، نیروی محوری المان ستون گوشه و ستون‌های طرفین پانل‌های مهاربندی، به‌طور قابل ملاحظه‌ای بیشتر از نیروی محوری ستون‌های میانی است. این اختلاف در ستون‌های طبقات بالاتر کاهش می‌یابد، به‌گونه‌ای که در یک تراز ارتفاعی

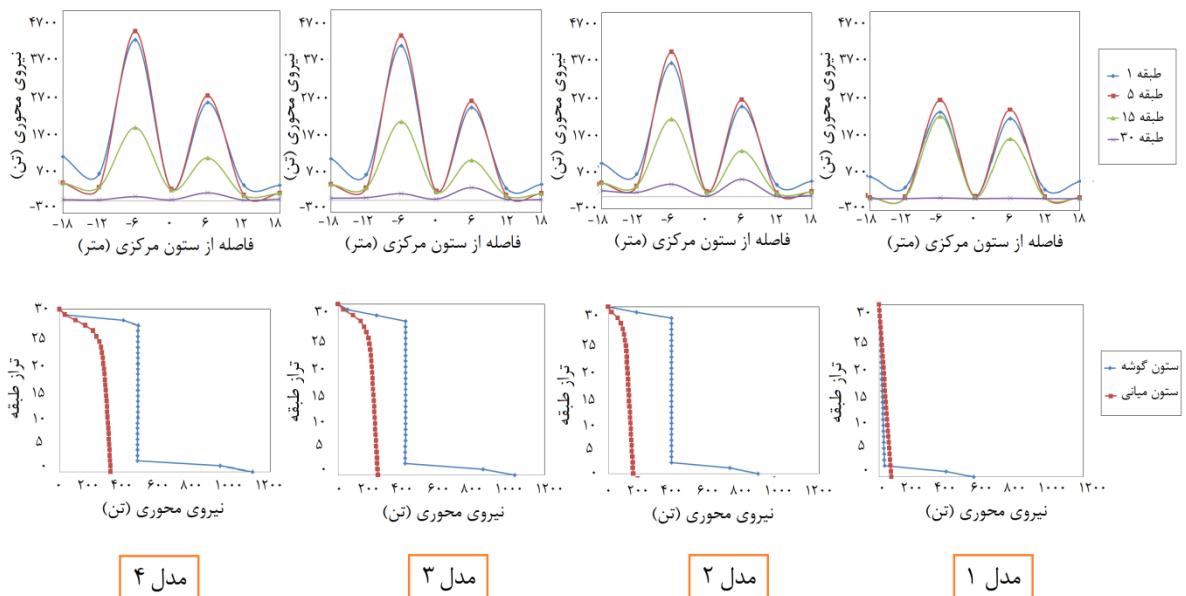




شکل ۱۳- آرایش قرارگیری ستون‌های مورد بررسی در قاب کناری پلان



شکل ۱۴- پوش نیروی محوری ستون‌ها تحت رکورد Tabas در راستای X پلان سازه قاب DB از شکل (۱)



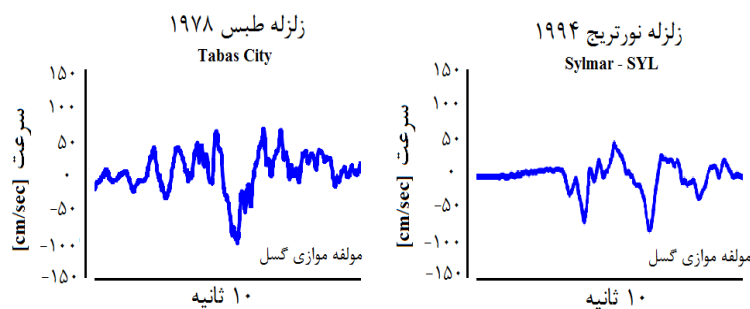
شکل ۱۵- پوش نیروی محوری ستون‌ها تحت رکورد SYL در راستای X پلان سازه قاب DB از شکل (۱)

می‌گردد. این موضوع نیز نشانه کارایی بهتر اسکلت مدل‌های مطالعاتی ۳، ۲ و ۴ است. افزون بر آن از میزان دررفت جانبی نیز به شدت کاسته خواهد شد.

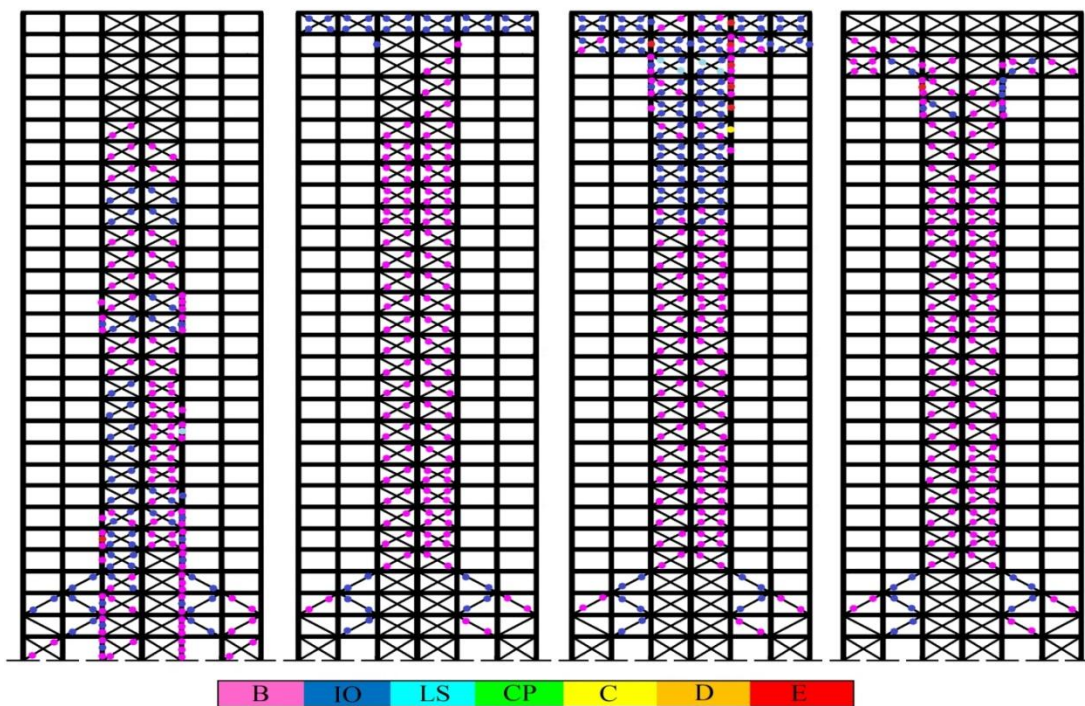
۶-۶- بررسی توزیع مفاصل پلاستیک در سازه

ساختار تشکیل مفاصل پلاستیک و نحوه توزیع آن‌ها در اسکلت سازه، بیان‌گر وضعیت‌های احتمالی وقوع مکانیزم‌های شکست و ناپایداری است. همچنین، نوع و روند شکل‌گیری مکانیزم‌های شکست نیز بر حساسیت رفتاری اسکلت مقاوم نسبت به اثرات خمشی ثانویه، شکل‌پذیری کلی و موضعی، میزان جذب انرژی جنبشی، دامنه پایداری سازه تا قبل از ایجاد خسارت و همچنین ناپایداری دینامیکی محلی و کلی سازه اثر می‌گذارد. بدیهی است

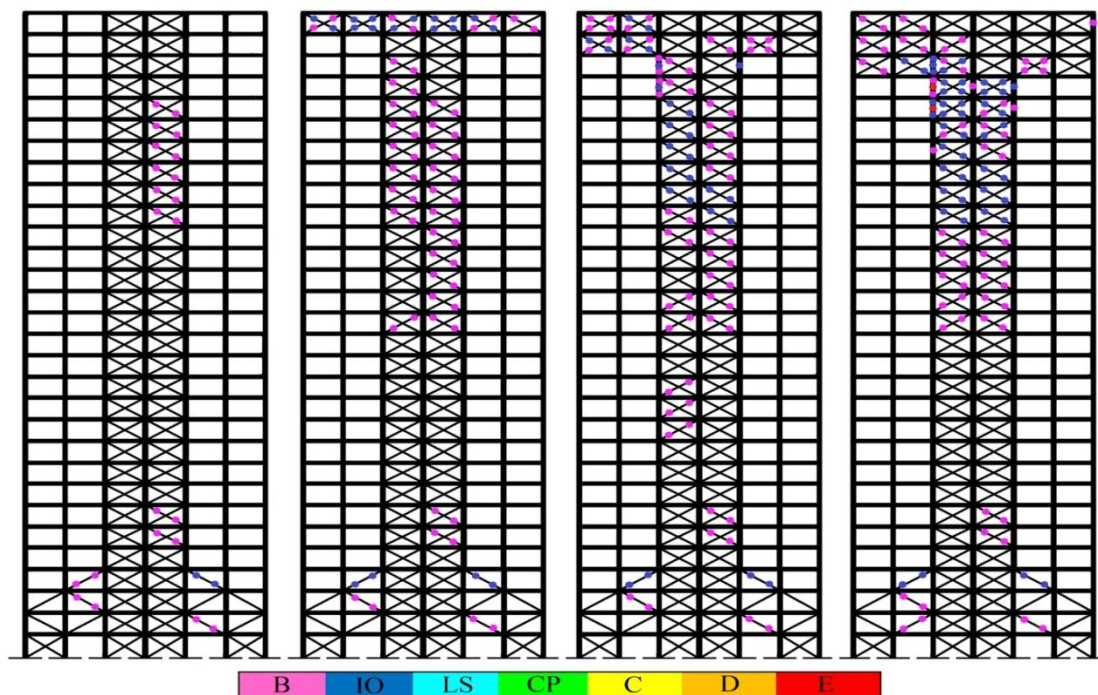
که در خصوص موارد فوق، نمود و ساختار فیزیکی پالس‌های سرعت موجود در تاریخچه زمانی هر دو مولفه LN و TR تاثیر مستقیم در آرایش، موقعیت و دامنه عملکرد غیرخطی مفاصل پلاستیک دارد. بازه زمانی پالس‌های مشخص سرعت، در واقع نشان‌دهنده موقعیت‌های وقوع حرکات ضربه‌ای زمین است. تشکیل ناحیه‌های تسلیم جدید در اسکلت مقاوم سازه، گسترش مشخص و سریع دامنه رفتار غیرخطی مکانیزم مفاصل پلاستیک نیز در همین بازه‌های زمانی صورت می‌گیرد. پالس ترکیبی سرعت موجود در تاریخچه زمانی مولفه موازی با صفحه شکست گسل (مولفه LN) مربوط به دو رکورد Tabas و SYL در شکل (۱۶) نمایش داده شده‌اند.



شکل ۱۶- پالس مشخص ترکیبی سرعت متناظر با مولفه موازی صفحه شکست گسل (مولفه LN) مربوط به دو رکورد حوزه نزدیک Tabas ایران و SYL منطقه سیلمار از زلزله نورتریج ۱۹۹۴



شکل ۱۷- ساختار مفاصل پلاستیک تشکیل شده در راستای Y سازه‌ها تحت رکورد حوزه نزدیک Tabas (قاب DC از شکل (۱))



شکل ۱۸- ساختار مفاصل پلاستیک تشکیل شده در راستای Y سازه‌ها تحت رکورد حوزه نزدیک SYL (قاب DC از شکل (۱))

سرعت نسبی در طبقات کاهش می‌یابد. پاسخ سازه‌های مطالعاتی دارای کمر بند سخت‌کننده فوقانی با آرایش یک، دو و سه طبقه به ترتیب دارای میانگین کاهش ۱۴/۶۹، ۱۶/۱۲ و ۱۹/۰۴ درصدی در بیشینه سرعت نسبی طبقات نسبت به مدل بدون کمر بند سخت‌کننده می‌باشد.

همچنین مدل بدون کمر بند سخت‌کننده در سنجش پارامتر پاسخ دریافت سازه، حد مجاز آیین‌نامه ۲۸۰۰ برابر با ۰/۰۲ را برآورده ننموده است. کاربرد کمر بند سخت‌کننده علاوه بر این که باعث کاهش بزرگ در میزان دریافت می‌گردد، سبب پایین‌تر آمدن محل وقوع بیشترین دریافت محتمل نیز خواهد شد. ساختار پاسخ سازه‌های مطالعاتی حاوی پانل‌های یک، دو و سه طبقه در کمر بند سخت‌کننده فوقانی، به ترتیب دارای میانگین کاهش ۳۰/۷۴، ۳۲/۰۹ و ۳۶/۶۱ درصدی در میزان تغییر مکان نسبی طبقات نسبت به مدل بدون کمر بند سخت‌کننده است. همچنین محل وقوع بیشترین دریافت محتمل در مدل بدون کمر بند سخت‌کننده به طور تقریبی در تراز طبقه ۲۷ و در مدل‌های دارای کمر بند سخت‌کننده در تراز طبقه ۲۰ اتفاق می‌افتد.

دانسته شد که پوش تغییرات نیروی محوری ستون‌های واقع در صفحات محیطی پلان سازه مقاوم، دارای توزیع کمانی است. بدین ترتیب که نیروی محوری ستون‌های گوشه و طرفین مهار بند

همچنین پالس پیوسته، پردامنه و بلندمدت سرعت مولفه TR رکورد Tabas در شکل (۷) و همین مورد برای رکورد SYL نیز در شکل (۸) مشخص می‌باشند. براساس شکل‌های (۱۶) تا (۱۸) و تحت دو رکورد فوق، نمایش مفهومی ماهیت پرنرزی و ویران‌کننده اثرات بسیار قدرتمند جهت‌داری پیش‌رونده در تشکیل و گسترش مکانیزم مفاصل غیرخطی (مفاصل پلاستیک) نشان داده شده است. بطور مشخص ملاحظه می‌شود که تحت اثر رکورد سه مولفه‌ای Tabas مفاصل با دامنه رفتار غیرخطی بزرگ‌تر و نیز آرایش گسترده‌تر حوزه‌های اتصال المان‌ها با رفتار غیرالاستیک، ایجاد شده‌اند. تعاریف سطوح عملکردی نیز براساس رفرنس‌های ۱۸ و ۱۹ صورت گرفته است.

۷- نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، ارزیابی پارامترهای پاسخ لرزه‌ای ساختار سازه‌ای قاب محیطی مهاربندی شده و کمر بند سخت‌کننده با انجام یک مجموعه تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی بررسی گردید. بر پایه مطالعات این پژوهش، تبیین گردید که رکوردهای نیرومند حوزه نزدیک حاوی اثرات جهت‌داری پیش‌رونده در مقایسه با رکوردهای حوزه دور، دامنه عددی بزرگتری را برای برش پایه و تغییر مکان جانبی طبقات ایجاد می‌کنند. ملاحظه شد با افزودن کمر بند سخت‌کننده به سازه، نرخ افزایش بیشینه

Tehran, Iran.

- [15] Iranian National Building Code, (2014), Steel Structures - Issue 10, Tehran, Iran.
- [16] Iranian National Building Code, (2014), Design Loads for Buildings - Issue 6, Tehran, Iran.
- [17] Malhotra, P.K. (1999), "Response of Buildings to Near-Field Pulse like Ground Motion", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 28, pp.1309-1326.
- [18] FEMA 356, (1998), Federal Emergency Management.
- [19] FEMA 440, (2005), Federal Emergency Management.
- [20] Moustafa, A. and Takewaki, I. (2010), "Deterministic and Probabilistic Representation of Near-Field Pulse-Like Ground Motion", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 30, pp.412-422.
- [21] Hudson, D.E. and Housner, G.W., (1958), "An Analysis of Strong Motion Accelerometer Data from the San Francisco Earthquake of March 22, 1957", *Bulletin of the Seismological Society of America (BSSA)*, Vol. 48, pp. 253-268.
- [22] Bolt, B.A., (1971), "The San Fernando Valley Earthquake of February 9", 1971-Data on Seismic Hazards, *Bulletin of the Seismological Society of America (BSSA)*, Vol. 61, No. 2, pp.501-510.
- [23] Bertero, V.V., Mahin, S.A. and Herrera, R.A., (1978), "Aseismic Design Implications of Near-Fault San Fernando Earthquake Records", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 6, No. 1, pp. 31-42.
- [24] Stewart, J.P., Chiou, S., Bray, J.D., Graves, R.W., Somerville, P.G. and Abrahamson, N.A., (2001), "Ground Motion Evaluation Procedures for Performance-Based Design", Research Report Conducted under Grant No. EEC-9701568 from the National Science Foundation, University of California, Berkeley.
- [25] 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.
- [26] Dabaghi, M. and Der Kiureghian, A., (2018), "Simulation of Orthogonal Horizontal Components of Near-Fault Ground Motion for Specified Earthquake Source and Site Characteristics", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 47, No. 6, pp.1369-1393.
- [27] Tajmir Riahi, H., Amouzegar, H. and Ale-Saheb Fosoul, S.S., (2015), "Comparative Study of Seismic Structural Response to Real and Spectrum Matched Ground Motions", *Sharif University of Technology, Scientia Iranica, Transaction A, Civil Engineering*, Vol. 22, No. 1, pp.92-106.
- [28] 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.
- [29] Kalkan, E. and Kunnath, S.K., (2006), "Effects of Fling Step and Forward Directivity on Seismic Response of Buildings", *Earthquake Spectra*, Vol. 22, No. 2, pp. 367-390.
- [30] Durucan, C. and Durucan, A.R., (2016), "Ap/Vp Specific Inelastic Displacement Ratio for the Seismic Response Estimation of SDOF Structures subjected to Sequential Near Fault Pulse Type Ground Motion Records", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 89, pp. 163-170.
- [31] PEER Ground Motion Database, <http://peer.berkeley.edu/>.
- [32] CSI, (2010), Analysis Reference Manual for Sap2000. Berkeley, California, USA.
- [33] CSI, (2007), PERFORM3D - Structural Analysis Software, Berkeley-California, USA.

به طور قابل ملاحظه‌ای بیشتر از نیروی محوری ستون‌های میانی بدست می‌آید. مقدار بیشینه این نیروهای محوری در طبقات اول اتفاق می‌افتد و در طبقه آخر به مقدار کمینه خود می‌رسد. نیروی محوری المان‌های ستون در مدل‌های دارای کمربند سخت‌کننده به علت بالاتر بودن سختی نسبت به مدل پایه، بیشتر خواهد بود. بدین ترتیب می‌توان کاربرد ساختار مقاوم دارای کمربند سخت‌کننده را در اسکلت سازه‌ای ساختمان‌های بلند، به ویژه در نواحی با لرزه‌خیزی بالا به عنوان یک طرح جایگزین و کارآمد نسبت به دیگر سیستم‌های سازه‌ای معرفی نمود.

۸- مراجع

- [1] Stafford Smith, B. and Coull, A. (1991), "Tall Building Structures: Analysis and Design", New York, USA.
- [2] Khan, F.R. and Amin, N.R. (1973), "Optimal Design of Frame Tube Structures for Tall Concrete Buildings", *Engineering Structures*, Vol. 51, No. 3, pp. 85-92.
- [3] Azhdarifar, M. and Meshkat-Dini, A. (2016), "Study on the Seismic Response Parameters of Steel Modular Tube Mid-Rise Buildings under Effects of near Field Ground Motions", *Journal of Steel and Structure, Iranian Society of Steel Structures*, Vol. 17, pp.87-101. (In Persian)
- [4] 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, No. 3, pp. 297-309.
- [5] Leonard, J., (2007), "Investigation of Shear Lag Effect in High-Rise Buildings with Diagrid System", MSc. Thesis, Illinois Institute of Technology.
- [6] Bagheri, A.B. (2012), "Study the Effect of Using Different kind of Bracing System in Tall Steel Structures", *American Journal of Scientific Research*, Vol. 53, pp.23-34.
- [7] Abdi Moghadam, M. and Meshkat-Dini, A. (2018), "The Effect of Belt Truss Level on the Performance of Steel High-Rise Buildings subjected to Near-Field Earthquakes", *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, Vol. 49, No. 4, pp 665-678.
- [8] Wu, J.R. and Li, Q.S. (2003), "Structural Performance of Multi-Outrigger Braced Tall Buildings", *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, Vol. 12, pp.155-176.
- [9] Hoenderkamp, J.C.D. and Bakker, M.C.M., (2003), "Analysis of High-Rise Braced Frames with Outriggers", *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, Vol. 12, pp.335-350.
- [10] Herath, N., Haritos, N., Ngo, T. and Mendis, P., "Behavior of Outrigger Beams in High Rise Buildings under Earthquake Loads", *Australian Earthquake Engineering Society 2009 Conference*.
- [11] Ho, G.W. (2016), "The Evolution of Outrigger System in Tall Buildings", *International Journal of High-Rise Buildings*, Vol. 5, No. 1, pp.21-30.
- [12] Moon, K.S., (2016), "Outrigger Systems for Structural Design of Complex-Shaped Tall Buildings", *International Journal of High-Rise Buildings*, Vol. 5, No. 1, pp.13-20.
- [13] Shen, J., Wen, R., Akbas, B., Doran, B. and Uckan, E. (2014), "Seismic Demand on Brace-Intersected Beams in Two-Story X-Braced Frames", *Engineering Structures*, Vol. 76, pp. 295-312.
- [14] Iranian Standard No. 2800, (2014), Iranian Code of Practice for Seismic Resistant Design of Buildings, Fourth Edition,

- [34] Jahanshahi, M.R., Rahgozar, R. and Malekinejad, M., (2012), "A Simple Approach to Static Analysis of Tall Buildings with a Combined Tube-in Tube and Outrigger-Belt Truss System subjected to Lateral Loading", *International Journal of Engineering (IJE - Basics)*, Vol. 25, No. 3, pp. 289–299.
- [35] Sattar, M.A., Rao, S., Mohan, M. and Reddy, S., (2014), "Deflection Control in High Rise Building Using Belt Truss and Outrigger Systems", *International Journal of Applied Science Engineering and Management*, Vol. 3, No. 6, pp. 44–53.
- [36] Shivacharan, K., Chandrakala, S., Narayana, G. and Karthik, N., (2015), "Analysis of Outrigger System for Tall Vertical Irregularities Structures subjected to Lateral Loads", *International Journal of Research in Engineering and Technology*, Vol. 4, No. 5, pp. 84–88.
- [37] Nicoreac, M. and Hoenderkamp, J.C.D. (2012), "Periods of Vibration of Braced Frames with Outrigger", *Procedia Engineering*, Vol. 40, pp. 298–303.
- [38] Barati, F. and Meshkat-Dini, A. (2017), "Assessment of Nonlinear Dynamic Response of Mega Braced Tube Structural Systems under Strong Ground Motions", *Sharif Journal of Civil Engineering*, Vol. 33–2, pp. 133–146. (In Persian)
- [39] 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. Doi: 10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0001125
- [40] Xu, J., Spencer, B.F.J., Lu, X., Chen, X. and Lu, L. (2017), "Optimization of Structures subject to Stochastic Dynamic Loading", *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, Vol. 32, pp. 657–673.

