

## نمود تحلیلی پالس‌های سرعت بر رفتار لرزه‌ای سیستم میان مرتبه ترکیبی قاب خمشی فولادی و پانل‌های مهاربندی واگرا

پارسا خزائی راد<sup>۱</sup>، سید علی مرتضوی<sup>۲</sup>، افشین مشکوة الدینی<sup>۳\*</sup>

۱- کارشناس ارشد مهندسی سازه، دانشکده فنی مهندسی، گروه عمران، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران

۲- کارشناس ارشد مهندسی سازه، دانشکده فنی مهندسی، گروه عمران، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران

۳- استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، گروه عمران، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران

### چکیده

سازه‌های ترکیبی قاب خمشی فولادی و پانل‌های مهاربندی شده به دلیل شکل‌پذیری مناسب در کنار سختی بالا جهت مقابله با نیروهای بزرگ دینامیکی ناشی از زلزله‌ها، سیستمی مناسب برای سازه‌های میان مرتبه می‌باشند. در این مطالعه، خصوصیات رفتار لرزه‌ای دو سازه ۱۰ طبقه با سیستم ترکیبی قاب خمشی-پانل‌های مهاربندی واگرا و قاب خمشی-پانل‌های مهاربندی واگرای زیپ‌دار تحت اثر زمین‌لرزه‌های قدرتمند حوزه نزدیک مورد بررسی قرار گرفته است. اندازه و تغییرات پارامترهای پاسخ لرزه‌ای مدل‌های مطالعاتی بر پایه انجام تحلیل‌های غیر خطی تاریخچه زمانی محاسبه گردیده است. مدل‌های مطالعاتی مطابق با ضوابط طرح لرزه‌ای ویرایش چهارم آیین‌نامه ۲۸۰۰ و مباحث ششم و دهم مقررات ملی ساختمان طراحی شده‌اند. بر پایه نتایج این پژوهش؛ دانسته شده که وجود پالس‌های بزرگ و پیوسته در تاریخچه زمانی زلزله‌های نیرومند، پارامترهای پاسخ سازه را به شدت تحت تأثیر قرار می‌دهد. ساختار مطالعاتی این پژوهش دربرگیرنده روند تحلیلی مربوط به نمودارهای پوش بیشینه دررفت، شتاب و سرعت طبقات سازه‌های مطالعاتی و همچنین تاریخچه زمانی دررفت طبقات و نیروی محوری ستون‌ها است. نمودارهای تاریخچه زمانی دررفت طبقات، هم‌ارز بودن تغییرات ناگهانی این پارامتر با پالس اصلی سرعت را نشان می‌دهد. بررسی نتایج نشان می‌دهد که علاوه بر وجود پیچیدگی توصیفی در پاسخ‌ها، نیازهای لرزه‌ای تحت رکوردهای حوزه نزدیک گسل، دارای نمود به مراتب بزرگ‌تری نسبت به رکوردهای دور از گسل می‌باشد. روند تشکیل مفاصل پلاستیک از نظر نوع و محل، بسته به عملکرد سیستم مقاوم سازه‌ای، تحت تأثیر ماهیت رانندگی رکوردهای نیرومند زلزله قرار دارد.

کلمات کلیدی: سیستم دوگانه فولادی، مهاربند واگرای زیپ‌دار، رکورد حوزه نزدیک، رفتار غیرخطی، پاسخ لرزه‌ای

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	10.22065/JSCE.2017.98930.1330	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
doi:	10.22065/JSCE.2017.98930.1330	۱۳۹۸/۰۴/۰۱	۱۳۹۶/۱۰/۰۴	۱۳۹۶/۱۰/۰۴	۱۳۹۶/۰۹/۲۵	۱۳۹۶/۰۶/۳۱
				*نویسنده مسئول:		
				پست الکترونیکی:		
				افشین مشکوة الدینی		
				meshkat@khu.ac.ir		

## Analytical Aspects of Velocity Pulses on Seismic Behaviour of Mid-Rise Compound Skeleton of Steel Moment Frame and Eccentrically Braced Panels

Parsa Khazaei Rad<sup>1</sup>, Sayed Ali Mortazavi<sup>2</sup>, Afshin Meshkat-Dini<sup>3\*</sup>

1- MS.c. in Structural Engineering, Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, Kharazmi University, Tehran, Iran

2- MS.c. in Structural Engineering, Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, Kharazmi University, Tehran, Iran

3- Assistant Professor, Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, Kharazmi University, Tehran, Iran

### ABSTRACT

Steel moment frame and bracing panels compound structures are suitable systems for medium-height resistant skeletons due to their desirable ductility along with high rigidity when facing large dynamic forces caused by earthquakes. In this research, the seismic behavior of two 10-story buildings with compound systems of moment frame/eccentrically braced frames as well as moment frame/eccentrically braced frame with zipper elements are evaluated. The evaluation and changes of the seismic response parameters of the studied models are based on performing nonlinear time history analyses. The studied models are designed according to the fourth edition of seismic design provisions in Code 2800, plus the 6th and 10th issues of the Iranian National Building Regulations. Following the results of this research, it has been recognized that the existence of large coherent pulses in the time history of powerful earthquakes affects the response parameters of the building to a great extent. The results of this research includes the analytical process in the graphs related to maximum push of the drift, floors acceleration and velocity of the studied structural models and also the time history of story's drift and axial force of the columns. The graphs of the story drift show the simultancy of the sudden changes of this parameter with the main velocity pulse. The results show that seismic responses and demands under near-field records have a bigger appearance than the corresponding effects obtained exposed to far-field records. The formation and development of plastic hinges in terms of type and location, based on the performance of resistant structural system, are influenced by the random nature of strong earthquake records.

### ARTICLE INFO

Received: 22/09/2017

Revised: 16/12/2017

Accepted: 25/12/2017

### Keywords:

Dual steel structure,  
Eccentric bracing,  
Zipper columns,  
Seismic response,  
Near field record,  
Velocity pulse,  
Time history response.

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/JSCE.2017.98930.1330

\*Corresponding author: Afshin Meshkat-Dini

Email address: meshkat@khu.ac.ir

## ۱- مقدمه

به طور کلی ماهیت ارتعاشات زمین تحت اثر زلزله‌های با بزرگای مومنتوم کوچک‌تر از  $1.4$  نسبت به جنبش‌های نیرومند در حوزه نزدیک یک گسل فعال، دارای تفاوت آشکاری می‌باشد. رکوردهای نیرومند ثبت شده در نزدیکی صفحه شکست گسل در مقایسه با موارد دور از گسل، دارای دامنه شتاب و مقادیر طیفی بزرگ‌تر در بازه فرکانسی به‌ویژه  $0.5$  تا  $1/5$  هرتز می‌باشند. اغلب این رکوردها بخصوص تحت اثر زمین‌لرزه‌های حاوی اثرات جهت داری پیشرو<sup>۱</sup>، دارای پالس‌های بزرگ و پرانرژی به‌ویژه در بخش‌های ابتدایی تاریخچه زمانی هستند. پدیدار شدن اثرات نیرومند جهت داری بر اثر نزدیکی میان مشخصه سرعت انتشار امواج برشی زلزله در محیط پیوسته و ناهمگن گسل، با مشخصه سرعت شکست ساختار زمین به وجود می‌آید [۱]. همچنین در تاریخچه زمانی بیشتر رکوردهای حوزه نزدیک، وجود پالس‌های بزرگ شبه سینوسی با پریود بلند ملاحظه شده است. نمود آشکار این ساختارهای پالس گونه، بیشتر در تاریخچه زمانی سرعت زمین می‌باشد.

نتایج مطالعات لرزه شناسی نشان می‌دهد که ساختار انتشار سه بعدی امواج برشی زلزله و نیز مکانیزم گسلش به گونه‌ای است که پالس‌های سرعت در تاریخچه زمانی مؤلفه عمود بر صفحه شکست گسل<sup>۲</sup> دارای نمود مشخص و بزرگ‌تری نسبت به مؤلفه موازی صفحه مذکور<sup>۳</sup> هستند. همانند معیارهای توضیح داده شده فوق، تاریخچه زمانی تغییر مکان زمین نیز حاوی پالس‌های پر دامنه و بلند مدت، با ساختار شبه سینوس دو سویه و نیز شبه نیم سینوس یک سویه است. نمود این ساختارهای موجی شکل نیز به صورت موجک‌های مشخص و با پریود بزرگ (بیش از ۲ ثانیه) می‌باشد. متناظر با پالس‌های پیوسته سرعت، نمود پالس‌های تغییر مکان نیز در دو راستای موازی و عمود بر صفحه شکست گسل، دارای شکل به نسبت متفاوتی است. متناظر با مؤلفه شتاب TR، تغییر مکان‌های موجی شکل دوسویه به شکل یک پالس تغییر مکان بلند مدت، به‌ویژه در راستای عمود بر صفحه شکست گسل پدیدار می‌شود. این پالس‌های تغییر مکان در مقایسه با موارد متناظر حاصل از مؤلفه موازی صفحه شکست گسل به مراتب بزرگ‌تر می‌باشند [۲].

شایان ذکر است که در طراحی سازه‌ها، رویکرد عمومی و سنتی شامل طراحی بر اساس معیار مقاومت است که پس از به دست آوردن تخمینی برش پایه در سازه و توزیع آن در ارتفاع، ظرفیت مورد نیاز اعضا به دست می‌آید. این روش به دلیل بیان رفتار اجزای سازه تنها از طریق پارامتر مقاومت، طرح لرزه‌ای با قابلیت عملکردی مناسب و جامعی را به درستی ارائه نمی‌دهد [۳]. یکی از روش‌های مناسب در معیار سازی طراحی بر مبنای عملکرد، ارزیابی دامنه عددی تغییر مکان‌های سازه است. مشاهدات میدانی و مطالعات گذشته نشان می‌دهد که در بسیاری از موارد، تغییر شکل‌ها و جایجایی‌های بزرگ در المان‌های اسکلت مقاوم سازه تحت اثر زمین لرزه‌های نزدیک به گسل رخ می‌دهد. اضافه می‌شود که به دلیل پدید آمدن تغییر شکل‌های بزرگ، احتمال وارد شدن رفتار اعضا به حوزه غیرخطی افزایش می‌یابد. همچنین از آنجا که در ناحیه غیرخطی، تغییرات نیرو در اعضا و اتصالات نسبت به تغییر شکل‌ها اندک است، لذا طراحی بر اساس کنترل دو پارامتر نیاز تغییر مکان و دوران صحیح تر می‌باشد [۴].

در این مقاله؛ دو مدل ۱۰ طبقه با اسکلت مقاوم ترکیبی فولادی متشکل از قاب خمشی و مهاربندی واگرا در نظر گرفته شد. یکی از مدل‌ها علاوه بر پانل‌های مهاربندی واگرا، دارای المان‌های عمودی زیپ نیز می‌باشد. تعیین ابعاد کلیه مقاطع و اعضا در هر دو مدل مطالعاتی بر اساس ارزیابی دقیق ضوابط آیین نامه‌های طراحی صورت گرفته است. رفتار غیرخطی دینامیکی و نیز پارامترهای عملکرد لرزه‌ای هر دو مدل تحت رکوردهای نیرومند سه مؤلفه‌ای، ارزیابی تحلیلی شده است. ساختار نتایج این تحقیق در برگزیده تغییرات پارامتر برش پایه سازه‌های مطالعاتی و همچنین سطوح عملکردی آن‌ها با توجه به تشکیل مفاصل پلاستیک در حوزه تغییر شکل‌های بزرگ بر اساس معیارهای پذیرفته شده طراحی لرزه‌ای است. همچنین یک نگرش تحلیلی بر نمودارهای پوش تغییرات شتاب مطلق، سرعت نسبی طبقات در محل مرکز جرم CM طبقات و نیز دو پارامتر پاسخ تغییر مکان و دریافت جانبی سازه‌های مطالعاتی صورت گرفته است. بررسی تأثیرات المان‌های ستون زیپ موجود در پانل‌های مهاربندی واگرا EBF بروی دامنه نیروی محوری ستون‌های تکیه گاهی، نکته دیگر مطالعاتی این پژوهش می‌باشد.

<sup>1</sup>  $M_w < 4$

<sup>2</sup> Forward Directivity

<sup>3</sup> Fault Normal Component - TR

<sup>4</sup> Fault Parallel Component - LN

## ۲- رفتار قاب‌های مهاربندی شده واگرا

قاب‌های مهاربندی شده واگرا به عنوان یک سیستم مقاوم پایه، قابلیت ایستادگی در برابر بارهای لرزه‌ای را دارا می‌باشند. پانل‌های EBF در واقع سیستمی ترکیبی و متأثر از ویژگی‌های اسکلت قاب خمشی به همراه یک پیکره مهاربندی واگرا است. مشخصات ابعادی اعضای پانل‌های EBF در اسکلت‌های میان مرتبه، بر پایه وجود پارامتر شکل پذیری بالا در کنار مؤلفه‌های قابل توجه سختی و مقاومت، در فلسفه طراحی لرزه‌ای نوین معرفی می‌شوند. همچنین در اسکلت پانل EBF، یک المان تیر کوتاه در محل اتصال مهاربند واقع شده که تیر پیوند<sup>۵</sup> نامیده می‌شود. رفتار تیر پیوند در حین زمین لرزه‌های کوچک در محدوده الاستیک باقی می‌ماند. نکته دیگر آن که در هنگام لرزش‌های نیرومند زمین با وارد شدن نیروهای دینامیکی بسیار بزرگ به سازه، تیرهای پیوند با تحمل تغییر شکل‌های غیر الاستیک مانع از بروز وضعیت کمانش در اعضاء قطری پانل EBF می‌شوند. بدین لحاظ، معیار سازی روابط طراحی مربوط به تیر پیوند باید بر مبنای ایجاد دامنه تغییر شکل‌های بزرگ در این المان، همراه با حفظ ماهیت عملکرد الاستیک برای سایر اعضاء پانل‌های EBF باشد. نتیجه مهم از دیدگاه طراحی آن است که تیرهای پیوند ضمن حفظ رفتار پایدار هیسترتیک، باعث اتلاف بخش بزرگی از انرژی جنبشی زلزله گردد. بدین ترتیب، پانل‌های EBF علاوه بر توانایی اتلاف انرژی جنبشی به دلیل رفتار غیرخطی تیر پیوند، دارای سختی جانبی حاصل از وجود مهاربندها نیز می‌باشند [۵، ۶].

نتایج به دست آمده مطالعات نشان دهنده مشخصات رفتاری مناسب برای مهاربندهای واگرا تحت نیروهای جانبی استاتیکی است. همچنین پیرو مطالعات عددی نیز مشاهده شد که پارامترهای رفتار لرزه‌ای سیستم‌های مهاربندی شده واگرا با توجه به مشخصات تاریخچه زمانی رکورد اعمالی به سازه، بسیار تغییرپذیر است. افزون بر آن، نتایج مطالعات نشان داد که در سازه‌های میان مرتبه مهاربندی شده واگرا که بر اساس ضوابط منطبق بر معیار ظرفیت طراحی شده‌اند، احتمال پدیدار شدن فروریزش ناگهانی ناشی از نادیده گرفتن قابلیت لنگر پلاستیک تیرهای پیوند وجود دارد [۷-۱۰]. نکته دیگر آن که اضافه مقاومت قاب‌های مهاربندی واگرا با انواع آرایش‌های هندسی تیر پیوند، وابسته به طول این المان نیز می‌باشد. بدین لحاظ، طراحی سایر اعضاء بر مبنای ظرفیت مورد انتظار تیر پیوند متناسب با ضریب اضافه مقاومت نظیر طول نسبی آن، می‌تواند منجر به یک طرح اقتصادی سیستم شود [۱۱].

تعبیه ستون‌های دوخت (المان‌های زیپ) در اسکلت‌های مقاوم متشکل از پانل‌های مهاربندی واگرا باعث اجتناب از کاهش شدید پارامتر سختی طبقه در هنگام تسلیم المان‌های تیر پیوند می‌گردد. خصوصیات رفتاری پانل مهاربند واگرا زیپ‌دار<sup>۶</sup> امکان طراحی بر اساس ظرفیت را به نحو مؤثری فراهم می‌کند. نمود این مشخصه در آن است که المان‌های تیر پیوند، قبل از تشکیل مکانیزم خرابی وارد حوزه تغییر شکل‌های بزرگ و عملکرد غیر الاستیک شوند. به علاوه انتظار می‌رود رفتار این نوع سازه نسبت به سیستم مهاربند واگرای بدون حضور المان‌های عمودی زیپ، باعث افزایش نمود مشخصه رفتاری فوق گردد [۱۲]. تغییرات در ظرفیت برشی طبقات و کاهش مقاومت برشی بعد از کمانش، خساراتی را با توجه به اثرات زلزله‌های حوزه نزدیک در برخی از بخش‌های اسکلت مقاوم به جای می‌گذارند. هدف از اضافه کردن ستون‌های زیپ در پانل‌های EBF و ایجاد اتصال پیوسته مهاربند به تیر پیوند در حوزه تمرکز نیروهای دینامیکی، جلوگیری از تشکیل مکانیزم پلاستیک و وضعیت کمانش مهاربندها است. ملاحظه می‌شود که معیار اساسی در کاربرد ستون‌های زیپ در پانل‌های EBF، حفظ هر چه بیشتر ویژگی رفتار خطی اسکلت مقاوم تحت زلزله‌های قوی است. همچنین قابل پیش‌بینی است با تأمین رفتار شکل‌پذیر سازه، المان‌های مهاربند و زیپ‌ها تا حد امکان دچار وضعیت کمانش و یا تسلیم نشوند [۱۳-۱۵].

## ۳- نمود پالس‌های شتاب و سرعت در جنبش‌های نیرومند

با توجه به ساختار طیف فوریه رکوردهای حاصل از جنبش‌های حوزه نزدیک همانند شکل ۱، مشاهده می‌شود که مؤلفه‌های ارتفاعی در یک محدوده کوچک فرکانسی یا به نوعی در یک یا چند پرپود خاص، دارای حداکثر خود می‌باشند. وجود چنین مشخصاتی در ساختار طیفی زلزله‌های حوزه نزدیک، می‌تواند نمود بارزی برای وجود اثرات برجسته ناشی از تأثیرگذاری یک یا چند مود ارتعاشی در رفتار

<sup>۵</sup> Link Beam

<sup>۶</sup> Tied or Zipper Braced Frames-TBF

عمومی ساختمان‌های با پی‌ریز بیش از ۱ ثانیه باشد. بدین ترتیب ویژگی‌های رفتار لرزه‌ای ساختمان‌ها با اسکلت مقاوم میان مرتبه تا بلند، بیشتر تحت تأثیر فرایند انتشار امواج زلزله گذرنده از محیط پیوسته ساختگاه و ساختار سازه‌ای قرار خواهد گرفت. بدیهی است که در چنین شرایطی با نزدیکی پی‌ریز غالب حرکات نیرومند زمین به پی‌ریز نوسانات طبیعی سازه، مؤلفه‌های پاسخ لرزه‌ای به سمت تأثیرپذیری از پدیده تشدید سوق پیدا می‌کند. حصول این شرایط نیز باعث ایجاد تغییر مکان‌های بزرگ در سازه خواهد شد [۱۶، ۱۷].

لرزه شناسی رکوردهای حوزه نزدیک دارای ارتباط ساختاری با مشخصات تحلیلی طیف‌های متناظر پاسخ سیستم یک درجه آزادی می‌باشد. یک نکته خاص نیز موضوع مقیاس نمودن و بزرگ نمایی طیفی این رکوردها در مباحث طراحی بر مبنای عملکرد و فراهم آوردن ترازهای مختلفی از شکل‌پذیری برای سازه‌هایی که در نزدیک گسل واقع شده‌اند، است. نتایج مطالعات این زمینه، نشان داده است که پالس‌های سرعت پیوسته و پردامنه می‌توانند پارامترهای نیاز لرزه‌ای شدیدی را به ساختمان‌های میان مرتبه تا بلند تحمیل کنند. تأثیرپذیری عملکرد لرزه‌ای ساختمان‌های با پی‌ریز کوتاه نسبت به این‌گونه حرکات نیرومند زمین از حساسیت کمتری برخوردار است. هنگام وقوع زلزله نورتریج ۱۹۹۴ کالیفرنیا<sup>۷</sup>، شکست‌های بزرگ سازه‌ای در ساختمان‌های فولادی ساخته شده در نزدیک گسل مشاهده گردید. بعلاوه مشاهده اثرات پر قدرت جهت‌داری در ماهیت طیفی تعدادی از رکوردهای پر قدرت مربوط به زلزله‌های چای چای ۱۹۹۹ تایوان<sup>۸</sup>، دوز<sup>۹</sup> و کوچالی<sup>۱۰</sup> ۱۹۹۹، ترکیه، توجهات گسترده‌ای را نسبت به اثرات حرکات نیرومند زمین در حوزه نزدیک گسل بر روی اسکلت مقاوم سازه‌ها ایجاد نمود. بررسی موضوعی اثرات تشدید یافته  $P-\Delta$  در سازه تحت زمین لرزه‌هایی با اثر جهت‌داری پیشرو بسیار با اهمیت می‌باشد [۱۸، ۱۹].

همان‌طور که در شکل‌های ۱ و ۲ نشان داده شده؛ تاریخچه زمانی شتاب، سرعت و طیف فوریه مربوط به رکورد اصلی و قدرتمند زلزله ۱۹۷۸ طبس<sup>۱۱</sup> دارای ساختاری متفاوت از رکورد حوزه دور ایستگاه دلتا از زلزله ۱۹۷۹ امپریال والی<sup>۱۲</sup> است. حضور اسپایک‌های بسیار بزرگ و پردامنه شتاب و نیز پالس‌های پیوسته و بلند مدت سرعت در نگاشت‌های تاریخچه زمانی، یکی از بارزترین مشخصات رکوردهای حوزه نزدیک حاوی جهت‌داری پیشرو است. مطابق شکل ۱، تاریخچه زمانی سرعت هر دو مؤلفه LN و TR رکورد طبس دارای پالس‌هایی بزرگ بوده که در بازه زمانی کمتر از ۱۰ ثانیه رخ می‌دهند. این پالس‌های پیوسته سرعت، انرژی جنبشی بسیار زیادی را در قالب ضربات پر قدرت ناشی از جنبش هجومی زمین، به سازه تحمیل می‌نمایند. همچنین شکل ۳ نیز نمونه دیگری از موضوع فوق را در تاریخچه زمانی سرعت و طیف تجمعی انرژی جنبشی رکورد اصلی زلزله ۲۰۰۳ شهر بم نشان می‌دهد. نکته دیگر آنکه با توجه به ماهیت طیفی جنبش‌های دور از گسل، مشاهده می‌شود که در سراسر تاریخچه زمانی این گونه رکوردها هیچ‌گونه ساختار موجی شکل در هر دو مؤلفه موازی و نیز مؤلفه عمود بر صفحه شکست گسل وجود ندارد [۲۰].

بررسی مطالعات انجام شده در خصوص دامنه و طیف جنبش‌های قوی زمین از دیدگاه دو معیار دامنه زمانی و انرژی آزاد شده، نشان می‌دهد که پیکره زمین شناختی منطقه ساختگاه، نقش اصلی را در نحوه توزیع و گسترش گسیختگی در مکانیزم گسل ایفا می‌نماید. بدین لحاظ، ساختار طیفی و ماهیت فیزیکی رکوردهای نیرومند ثبت شده در چندین ایستگاه لرزه نگاری واقع در ناحیه نزدیک به صفحه شکست گسل و حوزه مرکز سطحی یک زلزله بزرگ، بشدت تحت تأثیر شرایط زمین شناسی گسل و فرایند انتشار امواج برشی SH و SV در زوایای مختلف است. نمایش برداری فرایند انتشار امواج برشی، نمود به نسبت دقیق‌تری را برای تحلیل مؤلفه‌های مختلف یک رکورد شتاب زلزله به دست می‌دهد. تحلیل سه مؤلفه شتاب یک رکورد زلزله در راستاهای موازی و عمود نسبت به صفحه شکست گسل و همچنین عمود بر صفحه ساختگاه، بر همین اساس صورت می‌گیرد [۲۱، ۲۲].

رکوردهای حوزه نزدیک انتخابی در این پژوهش شامل سه رکورد زلزله ۲۰۰۳ بم، رکورد ایستگاه SCE از زلزله ۱۹۹۴ نورتریج و رکورد ایستگاه LGP از زلزله ۱۹۸۹ لوماپریتا<sup>۱۳</sup> بوده و حاوی اثرات نیرومند جهت‌داری پیش‌رونده هستند. همچنین به منظور مقایسه پارامترهای رفتار لرزه‌ای سازه‌های مطالعاتی، شتاب نگاشت رکورد حوزه دور از ایستگاه MRP زلزله ۱۹۹۴ نورتریج نیز انتخاب شده است.

<sup>7</sup> The 1994 Northridge earthquake

<sup>8</sup> The 1999 Chi-Chi earthquake

<sup>9</sup> The 1999 Düzce earthquake

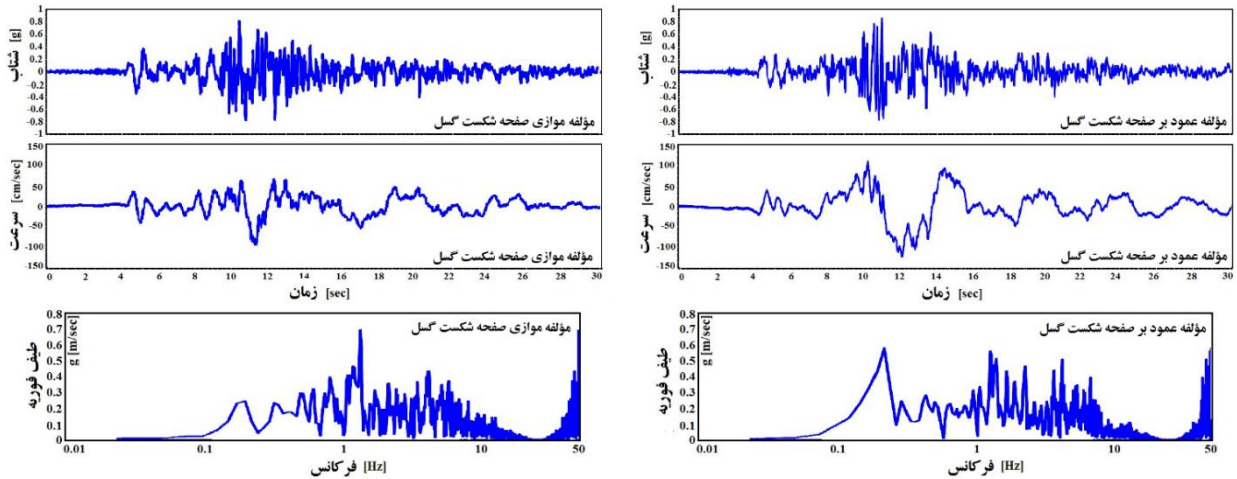
<sup>10</sup> The 1999 Kocaeli earthquake

<sup>11</sup> The 1978 Tabas earthquake

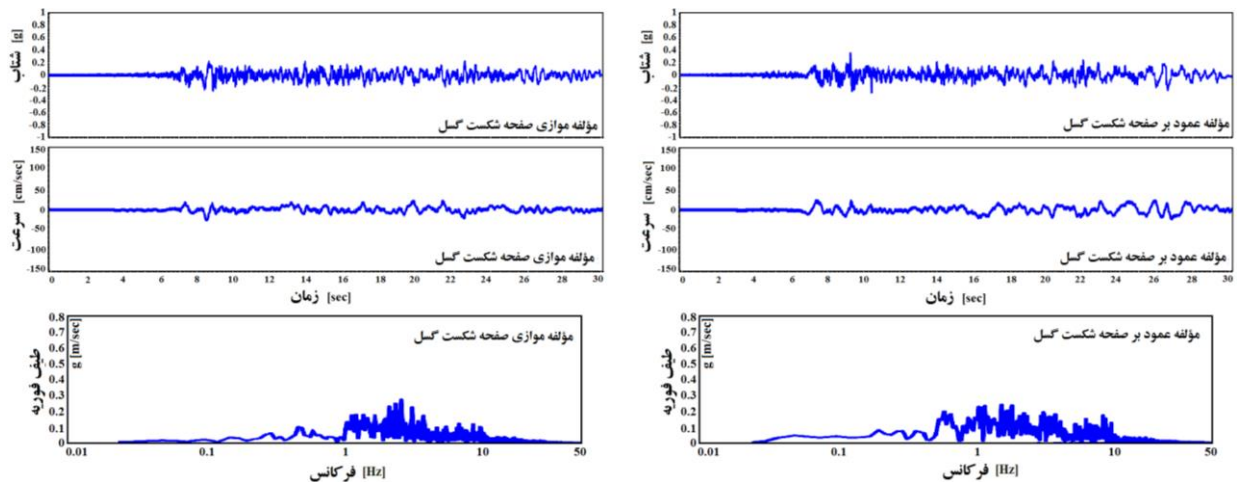
<sup>12</sup> The 1979 Imperial Valley earthquake - Delta (DLT)

<sup>13</sup> The 1989 Loma Prieta earthquake

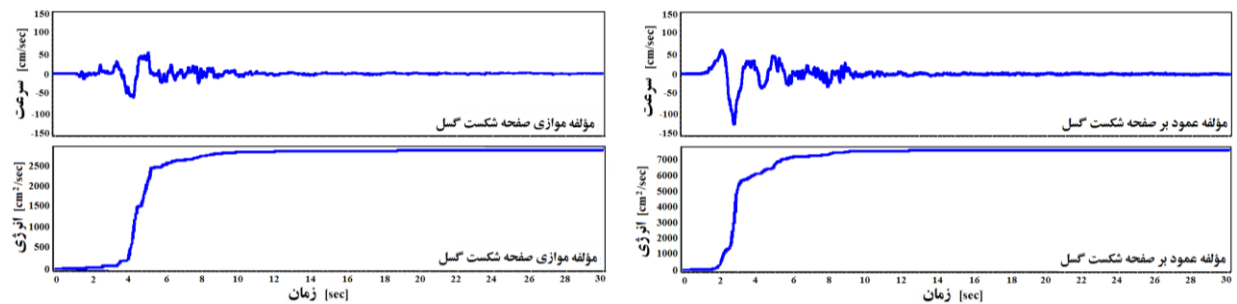
تاریخچه زمانی سه مؤلفه‌ای شتاب، سرعت مربوط به رکوردهای انتخابی در شکل ۴ نشان داده شده است. مشخصات طیفی رکوردهای مذکور، مانند حداکثر شتاب، سرعت و نیز بیشینه جابجایی زمین و همچنین بزرگای مومنتوم زمین لرزه (Mw) در جدول ۱ مشهود می‌باشد. مشخصات رکوردهای داده شده در این جدول بر اساس اطلاعات سایت اینترنتی مرکز تحقیق مهندسی زلزله اقیانوسیه<sup>۱۴</sup> [۲۳] تهیه شده است.



شکل ۱: تاریخچه زمانی شتاب، سرعت و طیف فوریه مربوط به رکورد نیرومند اصلی زلزله ۱۹۷۸ طبس

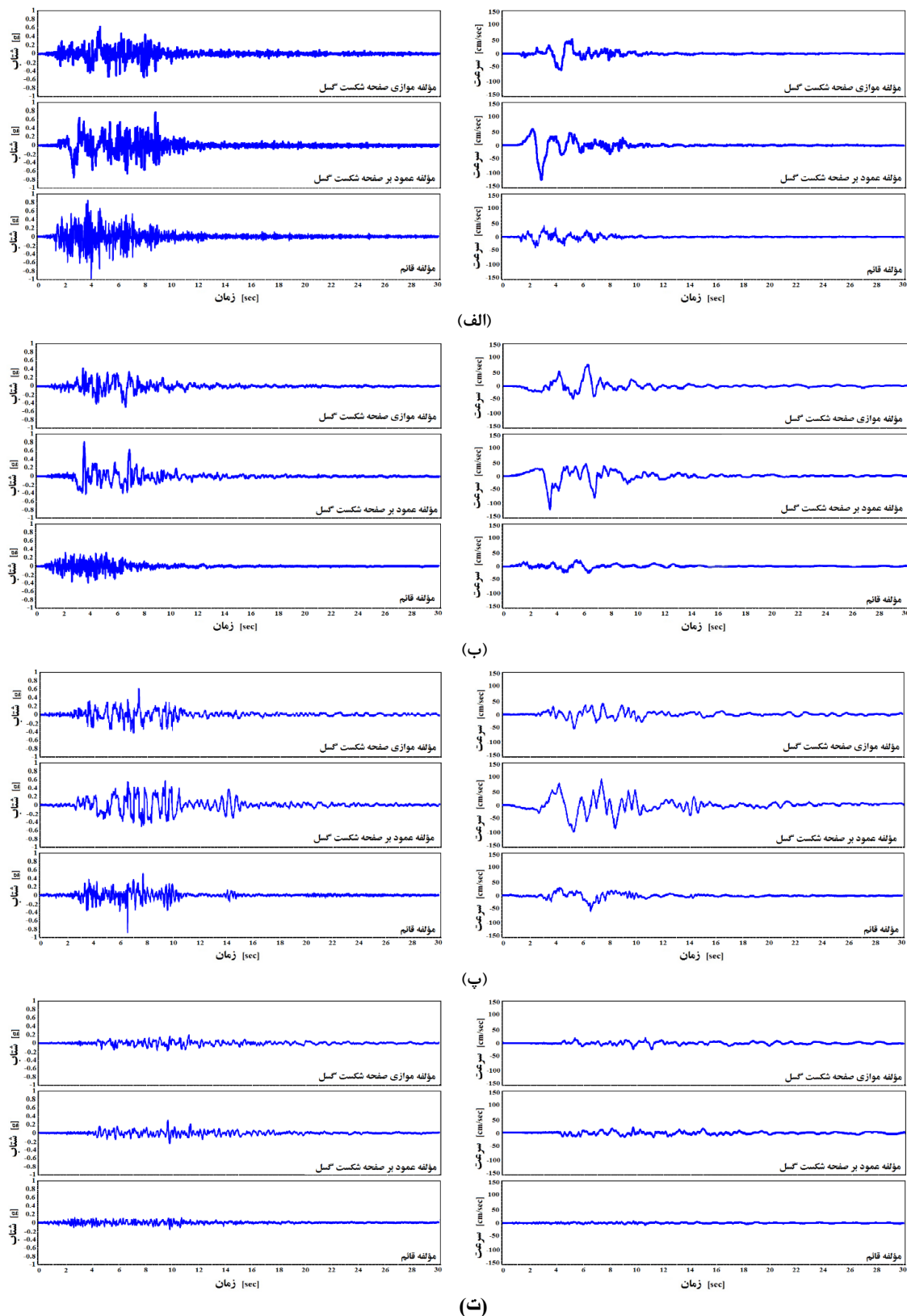


شکل ۲: تاریخچه زمانی شتاب، سرعت و طیف فوریه مربوط به رکورد حوزه دور دلتا از زلزله ۱۹۷۹ امپریال ولی، کالیفرنیا



شکل ۳: تاریخچه زمانی سرعت و طیف تجمعی انرژی جنبشی مربوط به رکورد اصلی و قدرتمند زلزله بم ۲۰۰۲

<sup>14</sup> PEER Ground Motion Database – Pacific Earthquake Engineering Research Center



شکل ۴: تاریخچه زمانی شتاب و سرعت رکوردهای سه مؤلفه‌ای؛ (الف) زلزله ۲۰۰۳ بم، (ب) رکورد SCE از زلزله ۱۹۹۴ نورتریج (کالیفرنیا)، (پ) رکورد LGP از زلزله ۱۹۸۹ لوماپربتا (کالیفرنیا)، (ت) رکورد حوزه دور MRP از زلزله ۱۹۹۴ نورتریج

جدول ۱: مشخصات رکوردهای انتخابی

Mw	(cm) (PGD)	(PGV) (cm/s)	(PGA) (g)	رکوردهای زلزله	
6.6	20.7	59.6	0.635	مؤلفه موازی صفحه شکست گسل	بم ۲۰۰۳ BAM – 1.0 km
	37.4	123.7	0.793	مؤلفه عمود بر صفحه شکست گسل	
	10.11	37.66	0.999	مؤلفه قائم	
6.7	29.20	74.85	0.493	مؤلفه موازی صفحه شکست گسل	نور تریج ۱۹۹۴ SCE – 6.4 km
	34.33	117.53	0.828	مؤلفه عمود بر صفحه شکست گسل	
	7.38	24.33	0.376	مؤلفه قائم	
6.9	11.4	50.51	0.605	مؤلفه موازی صفحه شکست گسل	لوماپریتا ۱۹۸۹ LGP – 6.1 km
	54.14	95.87	0.963	مؤلفه عمود بر صفحه شکست گسل	
	36.65	57.56	0.889	مؤلفه قائم	
6.7	4.79	20.20	0.19	مؤلفه موازی صفحه شکست گسل	نور تریج ۱۹۹۴ MRP – 28 km
	4.24	20.70	0.29	مؤلفه عمود بر صفحه شکست گسل	
	0.9	7.90	0.16	مؤلفه قائم	

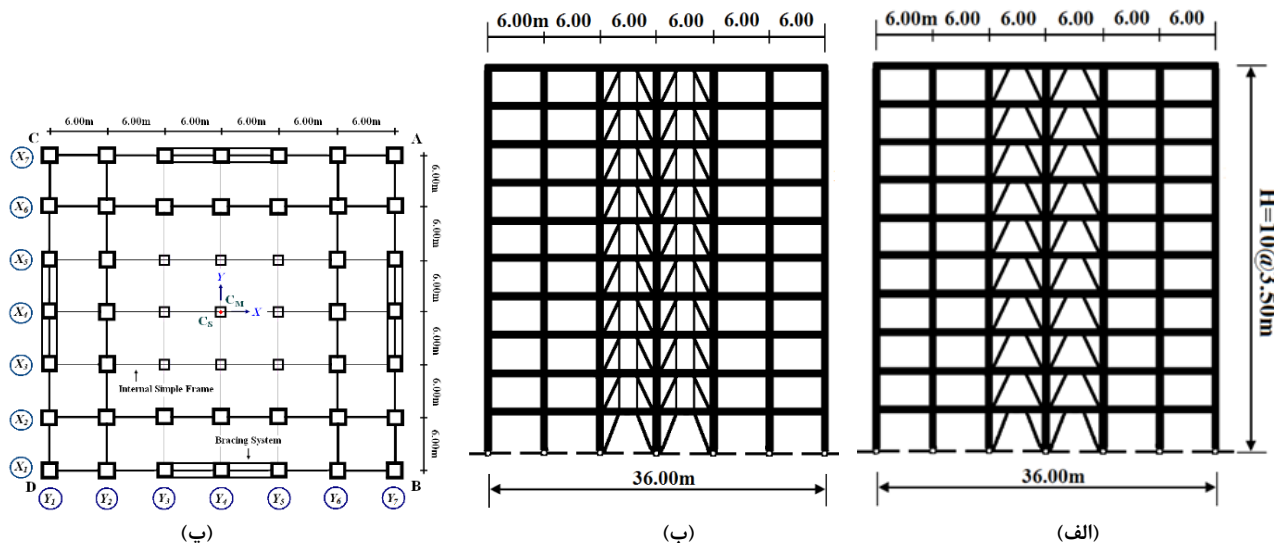
#### ۴- طرح لرزه‌ای اسکلت مقاوم با پانل‌های مهاربندی

مدل‌های مطالعاتی در این پژوهش شامل سازه‌های ۱۰ طبقه با اسکلت ترکیبی قاب خمشی به همراه پانل‌های مقاوم، در دو پیکربندی المان‌های مهاربندی واگرا و نیز واگرای زیپ‌دار در نظر گرفته شده است. همان‌طور که در شکل ۵ نشان داده شده، سازه‌ها به طور کامل در پلان و ارتفاع به صورت منظم می‌باشد. پلان سازه‌های مطالعاتی دارای شش دهانه به طول ۶ متر در هر دو جهت X و Y بوده و ارتفاع طبقات ۳/۵ متر است. دو دهانه میانی خطوط محوری محیطی پلان به صورت پانل‌های مهاربندی شده هستند. فاصله اتصال مهاربندها در محل شاه‌تیر پانل‌های EBF برابر با ۱ متر و همچنین از مرکز ستون مجاور تا محل اتصال مهاربند و شاه‌تیر نیز برابر ۲/۵ متر در نظر گرفته شده است. ساختار مهاربندی در یک مدل سازه مطالعاتی از نوع واگرای EBF و در مدل دوم به صورت پانل‌های واگرای زیپ‌دار است. توضیح آن‌که در محل اتصال بادبند و شاه‌تیر پانل‌های مهاربندی، ستون دوخت<sup>۱۵</sup> به کار رفته است (شکل ۵). همچنین جدای از قاب‌های مرکزی سازه که دارای اتصالات ساده هستند، قاب‌های واقع در گوشه‌های پلان سازه و دومین خط محور اسکلت مقاوم از نوع مدل‌های خمشی می‌باشند.

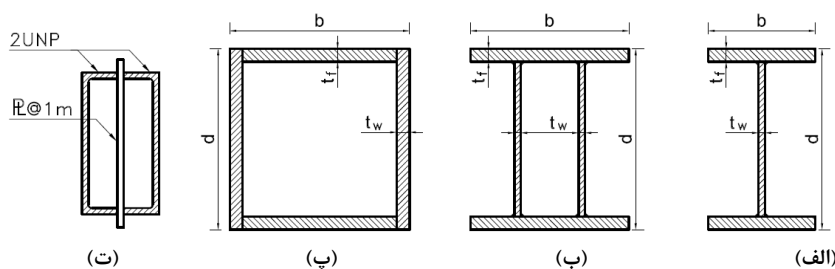
خاک ساختمانی از نوع تیپ ۲ و منطقه پروژه در پهنه‌بندی با خطر نسبی زیاد فرض گردیده است. ضریب رفتار برای سازه‌های مطالعاتی بر اساس آیین‌نامه ۲۸۰۰ (ویرایش چهارم) برابر با ۶ و معیار شکل‌پذیری متوسط در نظر گرفته شده است. بارگذاری سازه‌ها بر پایه مبحث ششم [۲۴] مقررات ملی ساختمان صورت گرفته و بدین منظور بار مرده و زنده اعمالی برای تمام طبقات به ترتیب ۰/۵ و ۰/۲ تن بر مترمربع و برای بام ۰/۵ و ۰/۱۵ تن بر مترمربع است. مشخصات مقاطع اعضاء سازه بر اساس استاندارد ملی ساختمان ایران (مبحث دهم مقررات ملی ساختمان) طراحی شده است. در روند طراحی مقاطع هر دو اسکلت مقاوم، علاوه بر رعایت محدودیت طول تیر پیوند در دهانه‌های مهاربندی‌شده، دو معیار محدودیت دررفت طبقات و رعایت اصل ستون قوی-تیر ضعیف در چشمه‌های اتصال قاب‌های خمشی نیز لحاظ گردیده است [۲۵، ۲۶]. اسکلت مقاوم سازه‌ها چنان طراحی شده که انتظار تشکیل مفصل پلاستیک در تیرهای پیوند، مقدم بر سایر اعضاء باشد. طرح نیمرخ اعضاء هر دو سازه مطالعاتی شکل ۵ در جدول ۲ تنظیم شده و به صورت سمبلیک در شکل ۶ مشخص است. همچنین برای اعضاء زیپ‌ر از المان UNP دابل شده مطابق با جدول ۳ استفاده شده است.

<sup>15</sup> Zipper Column Elements





شکل ۵: نما و پلان سازه‌های مطالعاتی؛ (الف) نمای اسکلت مقاوم سازه با سیستم ترکیبی قاب خمشی - مهاربند واگرا (مدل ۱)، (ب) نمای اسکلت مقاوم با سیستم ترکیبی قاب خمشی - مهاربند واگرای زیپ‌دار (مدل ۲)، (پ) پلان سازه‌ها، خطوط ضخیم نشان دهنده قاب‌های خمشی و خطوط نازک نشان دهنده قاب‌های ساده مفصلی هستند.  $C_M$  و  $C_S$  نیز موقعیت هر دو مرکز جرم و سختی طبقه می‌باشند.



شکل ۶: شمای نیمرخ‌های مورد استفاده در سازه‌های مطالعاتی؛ (الف) شاه تیر از نوع تیر ورق (با علامت اختصاری PG) و ضخامت جان  $tw=10mm$ ، (ب) شاه تیر دو جان از نوع تیر ورق (با علامت اختصاری 2WPG) و ضخامت جان  $tw=10mm$ ، (پ) ستون از نوع باکس (با علامت اختصاری BOX)، (ت) مهاربند و زیپ‌ر از نوع دابل ناودانی (با علامت اختصاری 2UNP) به همراه اسپیسر به فواصل ۱ متر

جدول ۲: مشخصات المان‌های ستون و شاه‌تیر، در هر دو مدل ده طبقه در شکل ۵ (ابعاد به cm)

شاه تیر	شاه تیر	شاه تیر	ستون	ستون	ستون	طبقه	قاب
Y3-Y4 Y4-Y5	Y2-Y3 Y5-Y6	Y1-Y2 Y6-Y7	Y1-Y2 Y6-Y7	Y2&Y6	Y1&Y7		
2WPG 54×36×2	PG 35×15×1.5	PG 50×25×2	BOX60×2 BOX55×2	BOX45×2 BOX40×2	BOX45×2 BOX40×2	۲-۱ ۴-۳	X1-X1 Y1-Y1
2WPG 50×34×2	PG 35×15×1.5	PG 50×20×2	BOX50×1.5	BO35×2	BO35×2	۶-۵	X7-X7 Y7-Y7
2WPG 45×30×1.8	PG 35×15×1.5	PG 45×20×2	BOX50×1	BOX35×2	BOX35×2	۸-۷	
2WPG 42×30×1.5	PG 35×15×1.5	PG 55×15×1.5	BOX40×1	BOX25×1.5	BOX25×1.5	۱۰-۹	
	PG 50×25×2			BOX45×2 BOX40×2		۲-۱ ۴-۳	X2-X2 Y2-Y2
	PG 50×20×2			BOX35×2		۶-۵	X6-X6 Y6-Y6
	PG 45×20×2			BOX35×2		۸-۷	
	PG 35×15×1.5			BOX25×1.5		۱۰-۹	

ادامه جدول ۲:

قاب	طبقه	ستون Y1&Y7	ستون Y2&Y6	ستون Y1-Y2 Y6-Y7	شاه تیر Y1-Y2 Y6-Y7	شاه تیر Y2-Y3 Y5-Y6	شاه تیر Y3-Y4 Y4-Y5
	۲-۱	BOX55×2	BOX45×2	BOX55×2			
X3-X3 Y3-Y3	۴-۳	BOX50×2	BOX40×2	BOX50×2			
X4-X4 Y4-Y4	۶-۵	BOX50×1.5	BOX35×2	BOX50×1.5	PG35×15×1.5		
X5-X5 Y5-Y5	۸-۷	BOX50×1	BOX35×2	BOX50×1			
	۱۰-۹	BOX40×1	BOX25×1.5	BOX40×1			

جدول ۳: مشخصات مهاربندها و المان‌های زیبر در هر دو مدل ده طبقه در شکل ۵ (ابعاد به cm)

قاب	طبقه	مقطع مهاربندها Y3-Y4 & Y4-Y5	مقطع زیپ‌ها Y3-Y4 & Y4-Y5
	۱	2UNP 38	-
	۲	2UNP 38	2UNP 18
X1-X1 Y1-Y1	۴-۳	2UNP 35	2UNP 18
X7-X7 Y7-Y7	۶-۵	2UNP 32	2UNP 16
	۸-۷	2UNP 30	2UNP 16
	۱۰-۹	2UNP 26	2UNP 140

پریود سه مود اول ارتعاشی سازه‌های مطالعاتی در جدول ۴ ارائه شده است. بر اساس این جدول، برای هر دو مدل ده طبقه با سیستم ترکیبی قاب خمشی - مهاربندی شده واگرا و نیز مدل مطالعاتی دارای پانل‌های واگرای زیپ‌دار، پریود مود اول ارتعاش در حدود ۰/۸۹ ثانیه به دست آمده است. نکته دیگر آنکه برای هر دو سیستم موده‌های اول و سوم در جهت X و Y، از نوع انتقالی و مود دوم به صورت محوری است. همچنین به دلیل بیشتر بودن پریود مود اول انتقالی نسبت به اولین مود پیچشی (با پریود بسیار کوچک)، سازه‌ها به صورت پیچشی سخت رفتار می‌نمایند. نام‌گذاری کوتاه شده EBF-MRF و ZEBF-MRF به ترتیب مربوط به مدل‌های ۱ و ۲ در شکل ۵ می‌باشد.

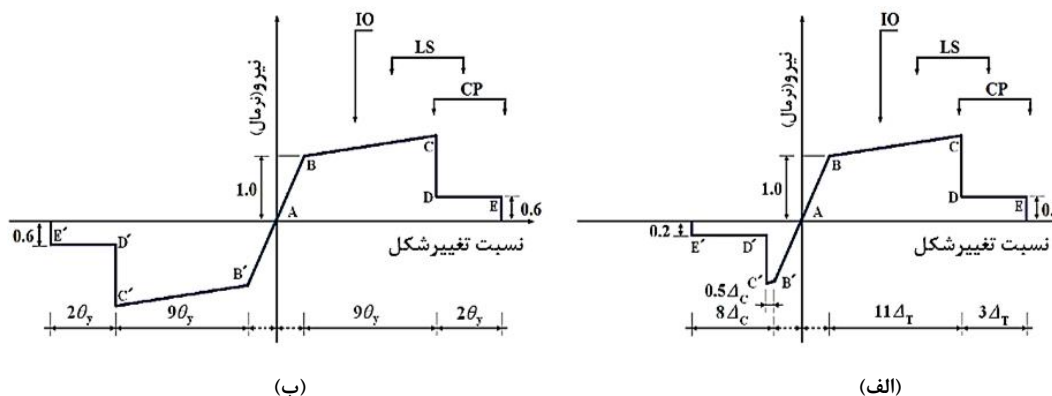
جدول ۴: مشخصات طیفی موده‌های ارتعاشی سازه‌های مطالعاتی

مدل سازه	مود ۱		مود ۲		مود ۳	
	پریود (sec)	فرکانس (cyc/sec)	پریود (sec)	فرکانس (cyc/sec)	پریود (sec)	فرکانس (cyc/sec)
EBF-MRF	1.115	0.896	0.799	1.251	0.382	2.622
ZEBF-MRF	1.136	0.880	0.799	1.251	0.391	2.555

## ۵- پاسخ لرزه‌ای سازه‌ها تحت رکوردهای انتخابی

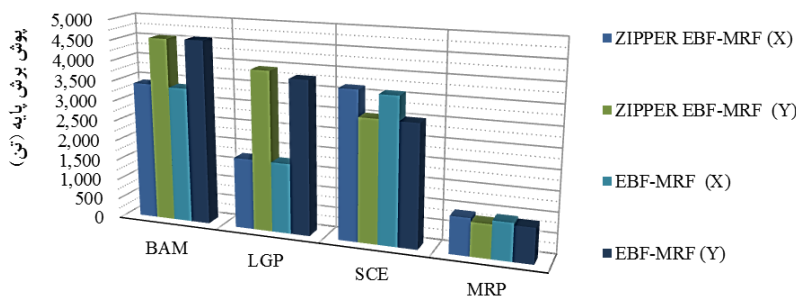
رفتار دینامیکی سازه‌های مطالعاتی شکل ۵ تحت مجموعه رکوردهای میدان آزاد انتخابی و با توجه به ماهیت نیرومند حوزه نزدیک آنها بررسی شده است. پارامترهایی نظیر بیشینه برش پایه، نیروی محوری ستون‌ها و بیشینه شتاب، سرعت، دررفت و تغییر مکان طبقات بر اساس نتایج تحلیل‌های دینامیکی غیر خطی تاریخچه زمانی به دست آمده است. همچنین برای ارزیابی اثر پالس‌های سرعت بر

رفتار سازه‌ها، تاریخچه زمانی نیروی محوری ستون‌ها و دررفت طبقات نیز تحت رکورد قدرتمند حوزه نزدیک بم ۲۰۰۳ نمایش داده شده است. نرم افزار مورد استفاده برای تحلیل‌های غیرخطی دینامیکی، SAP2000 می‌باشد [۲۷].  
توصیف رفتار غیرخطی اعضاء، محل و نوع تشکیل مفاصل بر اساس گزارش FEMA356 انجام شده است. بر این اساس مفاصل پلاستیک به صورت نیرو-دوران و تغییر شکل-دوران مشابه نمودارهای نشان داده در شکل ۷ برای مدل‌های تحلیلی تعریف شده است. همچنین در قاب‌های خمشی برای المان‌های تیر، مفاصل پلاستیک به صورت خمشی و برای ستون‌ها با اثر اندرکنش نیروی محوری و لنگر خمشی اختصاص داده شده است. به همین ترتیب در مدل قاب‌های ساده، مفصل خمشی در وسط تیرها و مفاصل غیرخطی محوری برای ستون‌ها در نظر گرفته شده است. قابلیت رفتار غیر خطی المان‌های مهاربند، در وسط دهانه آزاد بر پایه مفصل پلاستیک اندرکنشی محوری-خمشی PMM و در دو انتها نیز از نوع مفصل پلاستیک محوری P تعریف گردیده است. همچنین در ستون‌های زیپر و تیرهای پیوند نیز مفاصل غیرخطی خمشی لحاظ گردیده است [۲۸].



شکل ۷: مشخصات رفتار غیرخطی؛ (الف) مفصل پلاستیک P در مهاربندها، (ب) مفصل پلاستیک PMM در المان‌های تیر- ستون بر اساس FEMA356 [۲۸]

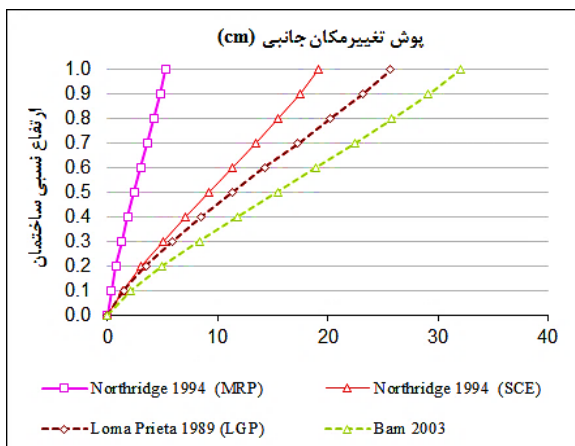
مقادیر بیشینه برش پایه تحت رکوردهای انتخابی در شکل ۸ نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، برش پایه تحت رکوردهای حوزه نزدیک به دلیل پدیدار شدن ساختارهای موج گونه در تاریخچه زمانی سرعت زمین، به‌ویژه برای مؤلفه عمود بر صفحه شکست گسل (مؤلفه TR) دارای مقادیر بزرگی می‌باشد. نکته دیگر آن که تأثیر پیکربندی اسکلت مقاوم سازه‌های مطالعاتی شکل ۵ بر اندازه برش پایه تحت اثر رکوردهای انتخابی، ناچیز است. حداکثر مقدار برش پایه تحت رکورد حوزه دور MRP در حدود ۹۲۴ تن می‌باشد. مقدار برش پایه در جهت Y پلان و هم راستا با مؤلفه TR متناظر با رکورد حوزه نزدیک BAM برابر با ۴۵۶۳ تن، بیشترین مقدار در مقایسه با نتایج حاصل از دیگر رکوردها است.



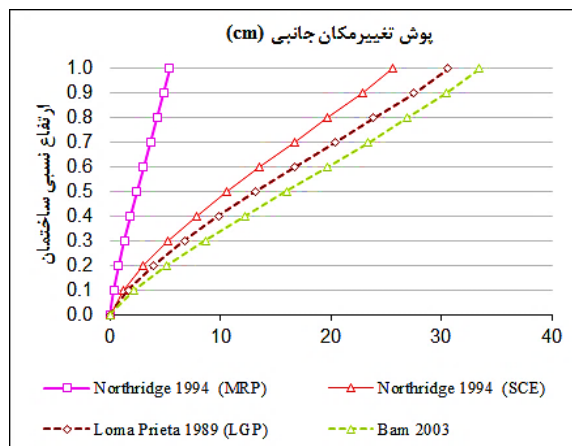
شکل ۸: بیشینه برش پایه سازه‌های مطالعاتی شکل ۵ در راستای X و Y پلان

نمودارهای پوش بیشینه تغییر مکان جانبی و نیز دررفت طبقات در مرکز جرم  $C_m$  و در راستای Y (هم جهت با مؤلفه عمود بر صفحه شکست گسل) به ترتیب در شکل‌های ۹ و ۱۰ نشان داده شده است. تحت هیچ یک از رکوردها، پارامتر دررفت طبقات سازه‌های

مطالعاتی از حد مجاز آیین نامه ۲۸۰۰ (ویرایش چهارم) بیشتر نشده و همچنین تغییرات این پارامتر برای سازه دارای مهاربندی واگرای زیپ دار (شکل ۵) با مقادیر کمتر و روند یکنواخت تر است. چگونگی این موضوع در پاسخ های سازه های شکل ۵ تحت رکورد BAM به خوبی ملاحظه می شود. نمود روند تغییرات پارامتر دررفت تحت رکوردهای حاوی پالس سرعت، همراه با اضافه شدن المان های زیپ به پانل های مهاربندی شده، بیشتر برای طبقات میانی سازه رخ داده است. به همین ترتیب دامنه تغییرات پارامترهای پاسخ لرزه ای نیز به نسبت افزایش می یابد.

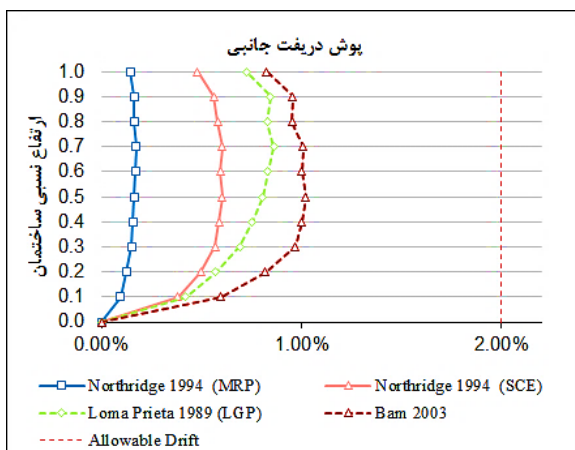


(ب)

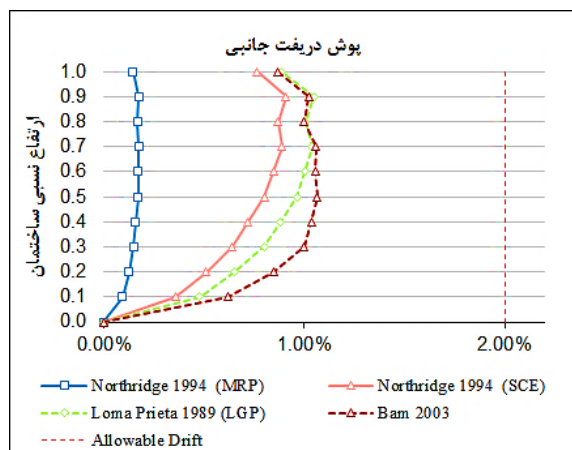


(الف)

شکل ۹: نمودار پوش حداکثر تغییر مکان جانبی سازه های مطالعاتی ۱۰ طبقه؛ (الف) سیستم دوگانه قاب خمشی - پانل های مهاربندی واگرا، (ب) سیستم دوگانه قاب خمشی - پانل های مهاربندی واگرای زیپ دار (شکل ۵)



(ب)

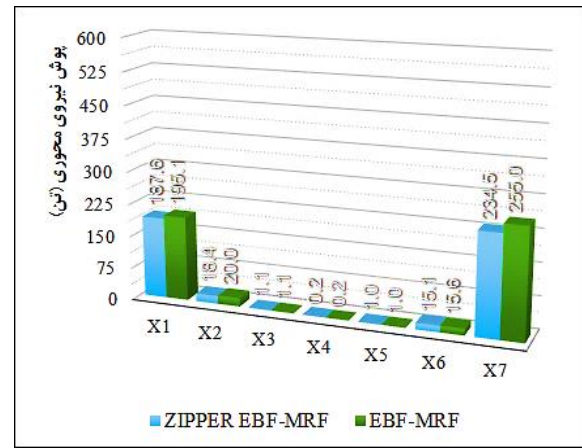
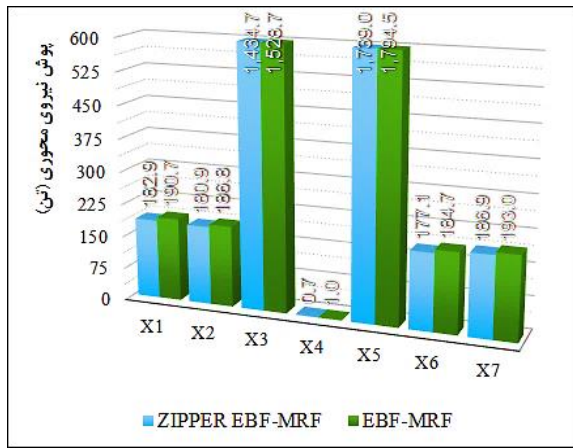


(الف)

شکل ۱۰: نمودار پوش حداکثر دررفت جانبی سازه های مطالعاتی ۱۰ طبقه؛ (الف) سیستم دوگانه قاب خمشی - پانل های مهاربندی واگرا، (ب) سیستم دوگانه قاب خمشی - پانل های مهاربندی واگرای زیپ دار (شکل ۵)

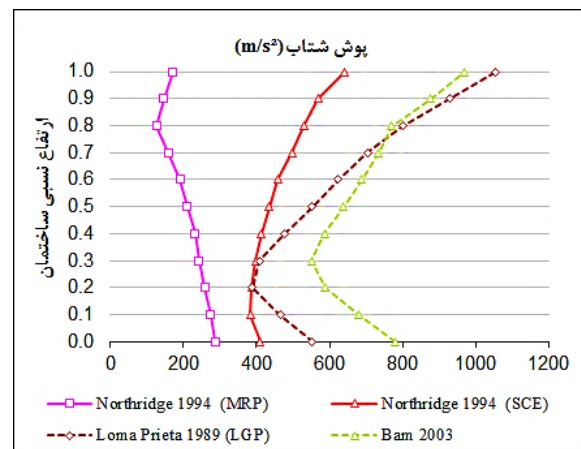
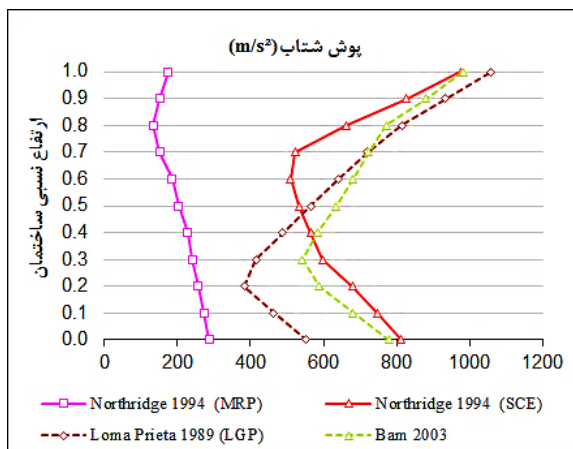
تغییر مکان نسبی بین دو تراز کف متوالی یا همان دررفت طبقه، به عنوان یک پارامتر اصلی در ارزیابی تقاضای لرزه ای سازه تعریف می شود. نتایج مطالعات قبلی بیانگر وجود یک ارتباط ساختاری میان پارامتر نیاز دررفت و تقاضای شکل پذیری است [۲۹]. ماهیت رفتار لرزه ای سازه ها در مورد رکورد حوزه دور MRP با هر دو ساختار پانل های مهاربندی، بسیار نزدیک به هم می باشد. پارامتر دیگر مطالعاتی، برآیند بیشینه نیروی محوری ستون های داخلی و پیرامونی پلان سازه در شکل ۵ است. توزیع بیشینه نیروی محوری ستون های طبقه اول در محور قاب اول و دوم جهت Y تحت رکورد BAM در شکل ۱۱ نشان داده شده است. در هر دو سازه بیشترین مقدار نیروی

محوری به ستون‌های قاب محیطی، به‌ویژه ستون‌های خارجی قاب‌های مهاربندی وارد می‌شود. اگرچه توزیع حداکثر نیروی محوری وارد به ستون‌های طبقه اول در هر دو مدل مطالعاتی تفاوت چندانی ندارد، سیستم دوگانه دارای پانل‌های مهاربندی واگرای زیپ‌دار به نسبت از توزیع متعادل‌تری برخوردار است.

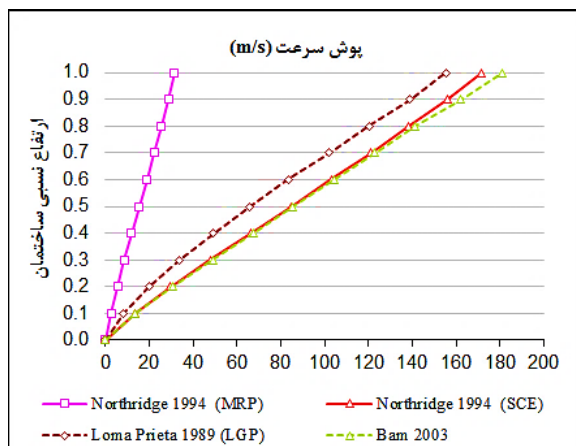


شکل ۱۱: بیشینه نیروی محوری ستون‌های طبقه اول؛ (الف) محور قاب اول پلان، (ب) محور قاب دوم پلان، تحت رکورد BAM (شکل ۵)

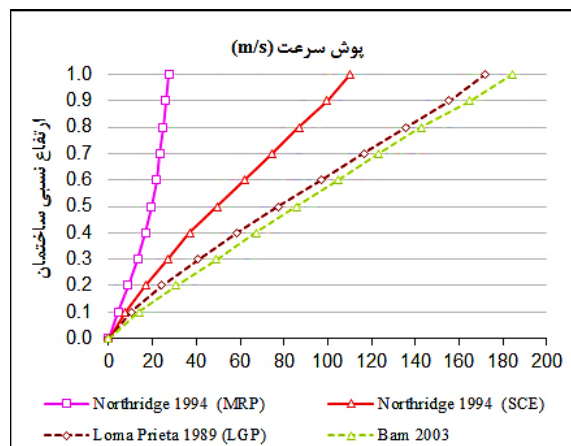
شکل‌های ۱۲ و ۱۳ به ترتیب نشان دهنده نمودارهای پوش بیشینه شتاب مطلق و سرعت نسبی مرکز جرم  $C_m$  طبقات در راستای Y پلان هستند. دامنه تغییرات پارامتر پاسخ شتاب مطلق طبقه، به دلیل اثرات نیرومند اندرکنش نیرویی ناشی از انتشار امواج زلزله در اسکلت مقاوم ساختمان و همچنین وجود پالس پیوسته در تاریخچه زمانی سرعت زمین، دارای مقادیر به نسبت بزرگ می‌باشد. این اثر در نمودارهای پوش بیشینه سرعت طبقات سازه‌ها نیز قابل مشاهده است. نتایج این پژوهش بیان گر آن است که برای سازه‌های مطالعاتی، کاربرد المان‌های زیپ‌دار در پانل‌های مهاربندی تحت رکورد حوزه دور MRP و رکوردهای حوزه نزدیک BAM و LGP، سبب تغییر چندانی در پارامتر پاسخ شتاب نخواهد شد. همچنین تحت رکورد SCE نیز اضافه شدن المان‌های زیپ‌دار موجب پدیدار شدن رفتار یکنواخت‌تر در طبقات سازه می‌شود. در خصوص پارامتر حداکثر سرعت طبقات نیز پاسخ‌های سازه تحت رکوردهای انتخابی به جز SCE، دارای تفاوت قابل توجهی نمی‌باشند.



شکل ۱۲: نمودار پوش بیشینه شتاب مطلق طبقات سازه‌های مطالعاتی ۱۰ طبقه؛ (الف) سیستم دوگانه قاب خمشی - پانل‌های مهاربندی واگرای، (ب) سیستم دوگانه قاب خمشی - پانل‌های مهاربندی واگرای زیپ‌دار (شکل ۵)

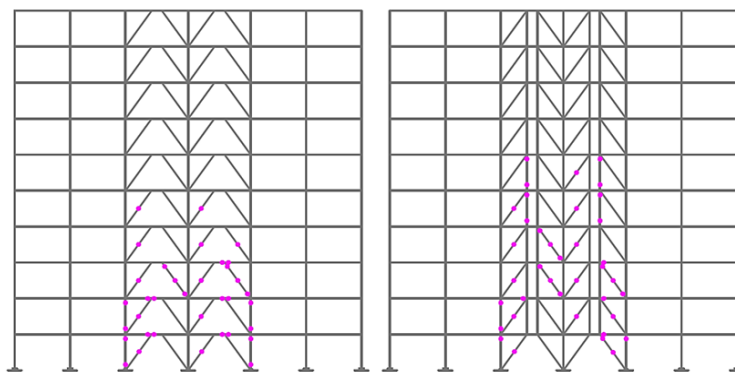


(ب)



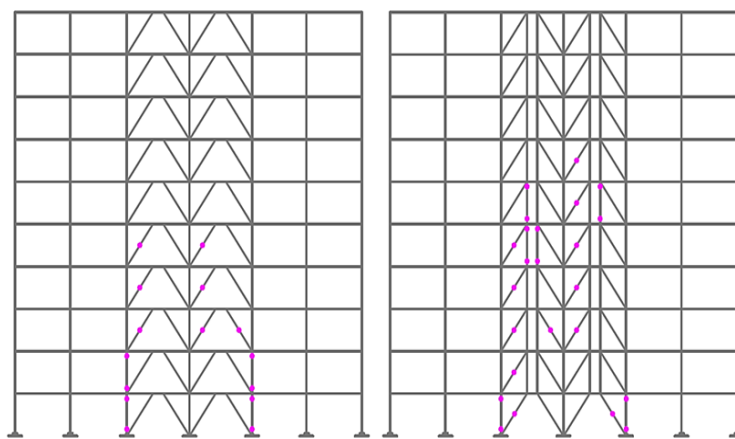
(ف)

شکل ۱۳: نمودار پوش بیشینه سرعت نسبی طبقات سازه‌های مطالعاتی ۱۰ طبقه: (الف) سیستم دوگانه قاب خمشی - پانل‌های مهاربندی واگرا، (ب) سیستم دوگانه قاب خمشی - پانل‌های مهاربندی واگرای زیپ‌دار (شکل ۵)



(ب)

(ف)



(ت)

(پ)

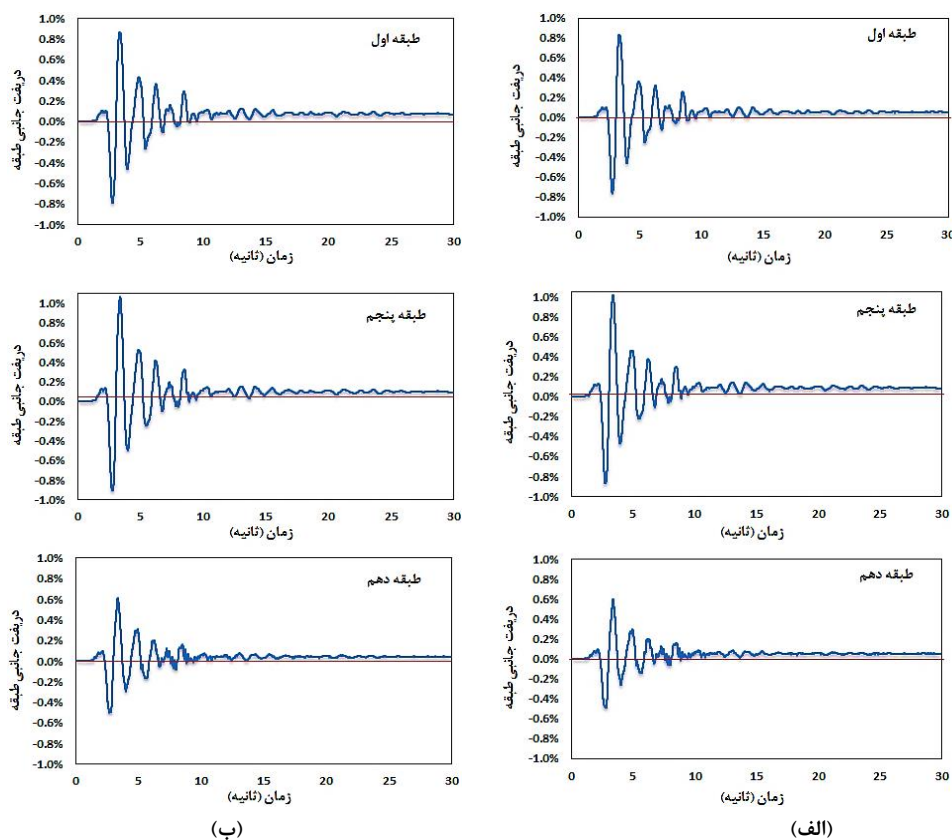
● (OP) خدمت‌رسانی بی وقفه ● (IO) قابلیت استفاده بی وقفه ● (LS) ایمنی جانی ● (CP) آستانه فروریزش ● (FR) فروریزش کلی ● (FR) فروریزش

شکل ۱۴: محل و آرایش تشکیل مفاصل پلاستیک سازه‌های مطالعاتی با توجه به شکل ۷: (الف) سیستم دوگانه قاب خمشی - پانل‌های مهاربند واگرای زیپ‌دار تحت رکورد BAM، (ب) سازه با سیستم دوگانه قاب خمشی - پانل‌های مهاربند واگرا تحت رکورد BAM، (پ) سیستم دوگانه قاب خمشی - پانل‌های مهاربند واگرای زیپ‌دار تحت رکورد LGP، (ت) سازه با سیستم دوگانه قاب خمشی - پانل‌های مهاربند واگرا تحت رکورد LGP

به منظور نمایش مفهومی اثر رکوردهای نیرومند حوزه نزدیک حاوی اثرات جهت داری پیش‌رونده و تأثیرات مخرب آن بر عملکرد لرزه‌ای اسکلت مقاوم سازه‌های مطالعاتی، محل و نوع مکانیزم مفاصل پلاستیک تشکیل شده تحت رکوردهای BAM (شکل ۳ و ۴-الف) و LGP (شکل ۴-ب) برای هر دو سازه مطالعاتی (شکل ۵) در جهت Y پلان، در شکل ۱۴ نشان داده شده است. تمامی مفاصل تشکیل شده در نقاط مورد بررسی در سطح عملکرد خدمت رسانی بی‌وقفه واقع شده‌اند. با این حال بر خلاف انتظار فلسفه طراحی تشکیل مفاصل پلاستیک در دهانه‌های مهاربندی، تنها محدود به نواحی تیر پیوند نشده است. این موضوع ناشی از ماهیت تصادفی رکوردهای نیرومند حوزه نزدیک و انتشار ناهمگون و با شدت امواج مکانیکی زلزله در اسکلت مقاوم سازه می‌باشد. مکانیزم مفاصل پلاستیک تشکیل شده تحت هر دو رکورد BAM و LGP در سازه دارای پانل‌های مهاربند و اگرای زی‌پدار، بیشتر در مهاربندهای طبقات بالاتر رخ داده است. این در حالی است که مفاصل تشکیل شده در سازه با پیکربندی مهاربندهای و اگرای در طبقات پایینی و بخصوص در ستون‌های دو طبقه اول متمرکز شده‌اند. در مقایسه اثرات پر قدرت جهت داری شکست نیز تحت رکورد BAM، تشکیل مفاصل بیشتری نسبت به رکورد LGP رخ داده است.

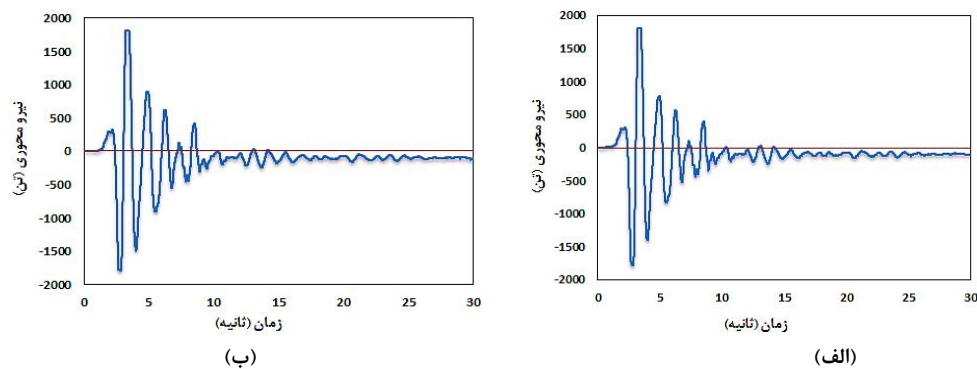
## ۶- ارزیابی تاریخیچه زمانی پاسخ لرزه‌ای سازه‌ها

شایان ذکر است که برای ارزیابی اثر پالس سرعت موجود در رکوردهای حوزه نزدیک بر رفتار سازه، تاریخیچه زمانی دریافت طبقات مدل‌های مطالعاتی شکل ۵ بررسی شده است. به این منظور، نمودار تاریخیچه زمانی دریافت طبقات اول، پنجم و دهم هر دو سازه مطالعاتی تحت رکورد BAM در نظر است. شکل ۱۵ نمودارهای مذکور را در محل مرکز جرم CM طبقات سازه در جهت Y، برای بازه زمانی ۳۰ ثانیه‌ای رکورد نشان می‌دهد. همان‌طور که در نمودارهای پوش دریافت طبقات سازه (شکل ۱۰) ملاحظه شد، بیشترین تغییر مکان نسبی در طبقات میانی سازه ایجاد می‌شود. مطابق شکل ۱۵ نیز بیشترین مقدار دریافت در طبقه پنجم رخ داده است. تاریخیچه زمانی پارامتر دریافت پدیدار شدن تغییر شکل ماندگار در طبقات هر دو سازه مطالعاتی تحت رکورد BAM را نشان می‌دهد.



شکل ۱۵: نمودار تاریخیچه زمانی دریافت طبقات اول، پنجم و دهم سازه‌های مطالعاتی ۱۰ طبقه تحت رکورد BAM؛ (الف) سیستم دوگانه قاب خمشی - پانل‌های مهاربندی و اگرای، (ب) سیستم دوگانه قاب خمشی - پانل‌های مهاربندی و اگرای زی‌پدار





شکل ۱۶: نمودار تاریخچه نیروی محوری ستون مجاور قاب مهاربندی طبقه اول سازه‌های مطالعاتی ۱۰ طبقه تحت رکورد BAM؛ (الف) سیستم دوگانه قاب خمشی - پانل‌های مهاربندی واگرا، (ب) سیستم دوگانه قاب خمشی - پانل‌های مهاربندی واگرای زیپ‌دار

بررسی دامنه تغییرات و نمودار تاریخچه زمانی نیروی محوری ستون‌ها نیز نشان دهنده پدیدار شدن یک نیروی محوری ماندگار در المان پس از عبور از پالس اصلی سرعت رکورد می‌باشد. نمونه‌ای از نمودار مذکور در شکل ۱۶ نشان داده شده است. حداکثر نیروی محوری المان ستون مذکور و نیز دریافت طبقه پنجم برای هر دو سازه مطالعاتی در جهت منفی و مثبت محور Y به ترتیب در حدود زمان ۲/۸ ثانیه و ۳/۴ ثانیه رخ می‌دهد. متناظر با این حدود در طبقات دیگر نیز اوج پارامتر دریافت طبقه پدیدار می‌شود. در واقع این نقاط اوج در دامنه اولین و بزرگ‌ترین جابجایی دینامیکی طبقات سازه قرار دارند. به‌طور میانگین دامنه اولین جابجایی بزرگ سازه در هنگام ارتعاشات شدید یک گام ۱/۳۶ ثانیه‌ای و در بازه زمانی ۲/۳۹ تا ۳/۷۵ ثانیه از رکورد BAM رخ می‌دهد. نمود نیروی محوری این دامنه نیز در نمودار تاریخچه زمانی نیروی محوری وارد بر ستون مجاور دهانه مهاربندی در طبقه اول، مشخص می‌باشد.

مطابق شکل ۳ می‌توان دو پالس بزرگ و پیوسته سرعت را در تاریخچه زمانی رکورد BAM تشخیص داد. پالس سرعت شبه سینوس متناظر با مؤلفه موازی با امتداد شکست گسل (مؤلفه LN) با پیوند نزدیک به ۲،۵ ثانیه، به مراتب کوچک‌تر و کم دامنه‌تر از پالس ترکیبی موجود در تاریخچه زمانی مؤلفه TR است. دامنه زمانی پالس ترکیبی سرعت مؤلفه TR نیز شامل دو قسمت است. بخش بزرگ‌تر و پر انرژی در بازه ۱،۲ تا ۴،۱ ثانیه قرار دارد و همچنین بخش کوچک‌تر نیز در محدوده ۴،۱ تا ۶،۲ ثانیه پس از آن است. افزون بر آن، یک مجموعه اسپایک‌های کوچک و کم دامنه سرعت نیز تا حدود ۴ ثانیه پس از هر دو پالس مشخص سرعت مؤلفه‌های LN و TR ملاحظه می‌شوند. طیف تجمعی انرژی جنبشی متناظر با مؤلفه‌های LN و TR رکورد BAM در هر دو بازه زمانی مشخص شده پالس‌های سرعت مذکور، دچار یک جهش بسیار شدید می‌شود. تأثیرات این جهش ناگهانی در قالب ایجاد تغییر مکان‌های جانبی به نسبت زیاد و برآیند نیروی محوری در حد تسلیم المان‌های ستون در طبقات اسکلت مقاوم خواهد بود. نمود روند یاد شده فوق به‌ویژه پس از گذر از اوج پالس پیوسته سرعت و در نیمه دوم آن شدید می‌باشد.

## ۷- نتیجه گیری

در پژوهش حاضر رفتار لرزه‌ای سازه‌های دوگانه ترکیبی قاب خمشی- مهاربند واگرا تحت رکوردهای دارای پالس‌های سرعت مطالعه گردید. همچنین مشخصات مهم جنبش‌های نیرومند زمین در حوزه نزدیک و دور از صفحه شکست گسل و نیز اثرات آن بر روی پاسخ لرزه‌ای سیستم‌های ترکیبی قاب خمشی- مهاربند واگرا و تأثیر نوع مهاربندی واگرای زیپ‌دار در این سازه‌ها مورد تحلیل قرار گرفت. مدل‌های مطالعاتی این پژوهش از نوع سیستم سازه‌ای ترکیبی قاب خمشی- مهاربند واگرا ۱۰ طبقه، همراه با تغییر در سیستم مهاربندی و اضافه شدن ستون‌های زیپ‌دار است. طراحی مدل‌ها بر اساس الزامات آیین‌نامه‌های موجود، توجه به اصل ستون قوی- تیر ضعیف و رعایت محدودیت مناسب طول تیر پیوند طراحی شده‌اند. مجموعه رکوردهای انتخابی به صورت سه مؤلفه‌ای به سازه‌های مطالعاتی اعمال گردیده است. گروه رکوردهای انتخابی حوزه نزدیک شامل جنبش‌های نیرومند زمین با ویژگی حضور پالس‌های پر دامنه و بلند مدت در تاریخچه زمانی سرعت می‌باشد. عملکرد لرزه‌ای سازه‌های مطالعاتی نیز از دیدگاه پارامترهای پاسخ تغییر مکان جانبی، دریافت و شتاب مطلق طبقات مورد ارزیابی قرار گرفت. با توجه به نتایج این تحقیق، مشاهده می‌شود که تحلیل و توصیف پارامترهای رفتاری ساختمان‌های میان مرتبه



تحت اثر رکوردهای حوزه نزدیک در هنگام وقوع زلزله‌های بزرگ دارای پیچیدگی بسیاری است. چنانچه به‌طور کلی می‌توان به نتایج زیر اشاره نمود:

- ۱- وجود پالس‌های پر دامنه و بلند مدت سرعت در تاریخچه زمانی یک رکورد، سبب القای انرژی جنبشی بسیار زیاد در یک محدوده زمانی به نسبت کوتاه به اسکلت مقاوم می‌شود. توجه به نمودارهای پاسخ لرزه‌ای نشان می‌دهد که اگرچه محدودیت دررفت حداکثر ۲ درصد برآورده شده، با این حال روند تشکیل مفاصل پلاستیک تحت اثر جنبش‌های قدرتمند، تنها به تیرهای پیوند محدود نشده است. تأثیرگذاری پالس یا پالس‌های سرعت موجود در تاریخچه زمانی یک رکورد نیرومند حوزه نزدیک در نمودارهای مربوط به پارامترهای پاسخ لرزه‌ای سازه‌های مطالعاتی، به‌روشنی مشاهده می‌شود.
- ۲- توجه به تاریخچه زمانی دررفت طبقات سازه‌ها تحت زلزله قدرتمند، نشان دهنده تغییرات ناگهانی این پارامتر در یک گام زمانی برابر با ۱/۳۶ ثانیه و هم‌ارز با پالس اصلی سرعت می‌باشد. همچنین، روند گسترش مکانیزم پلاستیک با آهنگ شدید نیز در حوزه پالس سرعت و به‌ویژه در بخش دوم آن واقع می‌شود.
- ۳- نتایج این پژوهش حاکی از آن است که کاربرد المان‌های زیپر در سازه‌های مطالعاتی سبب تغییر در پارامترهای اصلی پاسخ سازه نظیر دررفت می‌گردد. سازه با مهاربندی و اگرای زیپ‌دار از تغییر مکان‌های نسبی کوچک‌تر طبقات تحت رکوردهای حوزه نزدیک برخوردار است. به‌علاوه، محل و نوع مکانیزم مفاصل پلاستیک تشکیل شده تحت رکوردهای BAM و LGP در اسکلت مقاوم دارای المان‌های زیپر متفاوت می‌باشد.
- ۴- تمرکز رفتار غیرخطی در پیدایش و گسترش مفاصل پلاستیک در سازه دوگانه ترکیبی قاب خمشی-مهاربند و اگرای، به‌ویژه در طبقات پایین‌تر نسبت به مدل مطالعاتی دارای ستون‌های زیپ، ایجاد شده است. همچنین در سازه دارای المان‌های زیپر، از تمرکز این مفاصل در ستون‌های سازه به‌ویژه طبقه دوم به بالا، به‌طور نسبی کاسته شده است. روند تغییرات فوق به‌شدت تحت تأثیر ماهیت راندم رکوردهای نیرومند زلزله است.

## مراجع

- [1] Housner, G.W. and Trifunac, M.D.; (1967). Analysis of accelerograms Parkfield earthquake. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 57(6), 1193-1220.
- [2] Somerville, P.G., Smith, N.F., Graves, R.W. and Abrahamson, N.A.; (1997). Modification of empirical strong ground motion attenuation relations to include the amplitude and duration effects of rupture directivity. *Seismological Research Letters*, 68(1), 199-222.
- [3] Lee, K. and Foutch, D.A.; (2006). Seismic evaluation of steel moment frame buildings designed using different R-values. *Journal of Structural Engineering*, 132(9), 1461-1472.
- [4] Krawinkler, H. and Gupta, A.; (1998). Modeling issues in evaluating nonlinear response for steel moment frame structures. *The 11th European Conference on Earthquake Engineering*. Paris.
- [5] Roeder, C.W. and Popov, E.P.; (1978). Eccentrically braced steel frames for earthquakes. *Journal of the Structural Division*, 104(3), 391-412.
- [6] Hjelmstad, K.D. and Popov, E.P.; (1984). Characteristics of eccentrically braced frames. *Journal of Structural Engineering*, 110(2), 340-353.
- [7] Malley, J.O. and Popov, E.P.; (1984). Shear links in eccentrically braced frames. *Journal of Structural Engineering*, 110(9), 2275-2295.
- [8] Kasai, K. and Popov, E.P.; (1986). General behavior of WF steel shear link beams. *Journal of Structural Engineering*, 112(2), 362-382.
- [9] Popov, E.P. and Engelhardt, M.D.; (1988). Seismic eccentrically braced frames. *Journal of Constructional Steel Research*, 10, 321-354.
- [10] Foutch, D.A.; (1989). Seismic behavior of eccentrically braced steel building. *Journal of Structural Engineering*, 115(8), 1857-1876.
- [11] Farahani, S., Amin Mohebkah, A.; (2016). Overstrength of displacement-based designed eccentrically braced steel frames. *Journal of Structural and Construction Engineering (JSCE)*, 2(4), 48-61.
- [12] Rossi, P.P.; (2007). A design procedure for tied braced frames. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 36(14), 2227-2248.

- [13] Rossi, P.P. and Lombardo, A.; (2007). Influence of the link overstrength factor on the seismic behaviour of eccentrically braced frames. *Journal of Constructional Steel Research*, 63(11), 1529-1545.
- [14] Bosco, M. and Rossi, P.P.; (2009). Seismic behaviour of eccentrically braced frames. *Engineering Structures*, 31(3), 664-674.
- [15] Yang, C.S., Leon, R.T. and DesRoches, R.; (2008). Design and behavior of zipper-braced frames. *Engineering Structures*, 30(4), 1092-1100.
- [16] Mollaioli, F., Bruno, S., Decanini, L.D. and Panza, G.F.; (2006). Characterization of the dynamic response of structures to damaging pulse-type near-fault ground motions. *Meccanica*, 41(1), 23-46.
- [17] Moehle, J.P.; (2006). Seismic analysis, design, and review for tall buildings. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 15(5), 495-513.
- [18] Somerville, P.G.; (2005). Engineering characterization of near fault ground motions. *The NZSEE 2005 Conference*, Auckland.
- [19] Sehhati, R., Rodriguez-Marek, A., ElGawady, M. and Cofer, W.F.; (2011). Effects of near-fault ground motions and equivalent pulses on multi-story structures. *Engineering Structures*, 33(3), 767-779.
- [20] Tehranizadeh, M. and Meshkat-Dini, A.; (2007). Non-linear response of high rise buildings to pulse type strong ground motions. *The 2007 Conference of the Australian Earthquake Engineering Society*, Wollongong, Australia.
- [21] Trifunac, M.D. and Todorovska, M.I.; (2013). A note on the power of strong ground motion during the January 17, 1994 earthquake in Northridge, California. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 52, 13-26.
- [22] Kim, B., Hashash, Y.M., Rathje, E.M., Stewart, J.P., Somerville, P.G. and Campbell, K.W.; (2016). Subsurface shear wave velocity characterization using P-wave seismograms in central and eastern north America. *Earthquake Spectra*, 32(1), 143-169.
- [23] PEER Ground Motion Database – Pacific Earthquake Engineering Research Center. [Online] Available at: <http://peer.berkeley.edu/>
- [24] National Building Regulations Office, Ministry of Roads and Urban Development; (2014). "Iranian National Building Code: Design Loads for Buildings- Divisio 6". 3<sup>rd</sup> Edition. Tehran: Tosseh Iran Publisher.
- [25] National Building Regulations Office, Ministry of Roads and Urban Development; (2014). "Iranian National Building Code: Design and Construction of Steel Structures – Division 10". 4<sup>th</sup> Edition. Tehran: Tosseh Iran Publisher.
- [26] Permanent Committee for Revising the Iranian Code of Practice for Seismic Resistant Design of Buildings, (2014). "Standard No. 2800. Iranian Code of Practice for Seismic Resistant Design of Buildings". 4<sup>th</sup> Edition. Tehran: Road, Housing and Urban Development Research Center.
- [27] Computers and Structures, Incorporation. (1976-2010). SAP2000. Berkeley, CA. Retrieved from [www.csiberkeley.com](http://www.csiberkeley.com)
- [28] Agency, Federal Emergency Management. (2000). *Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings: Fema 356*: Createspace Independent Publication.
- [29] Kalkan, E. and Kunnath, S.K.; (2006). Effects of fling step and forward directivity on seismic response of buildings. *Earthquake Spectra*, 22(2), 367-390.