

## مطالعه اثرات جهت‌داری در رفتار لرزه‌ای اسکلت‌های ترکیبی دارای پیکربندی مهاربندی واگرا با دستک سخت کننده

سعید کیایی نژاد<sup>۱</sup>، افشین مشکوه‌الدینی<sup>۲\*</sup>، علی معصومی<sup>۲</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی زلزله، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران

۲- استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران

۲- استاد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران

### چکیده

اسکلت دوگانه فولادی، یکی از سیستم‌های سازه‌ای کاربردی برای مقابله با نیروهای جانبی ناشی از زلزله‌ها بوده که علاوه بر شکل‌پذیری مطلوب، دارای سختی، پایداری دینامیکی و درجه نامعینی بالا نیز می‌باشد. ساختار رفتاری سیستم‌های مقاوم دوگانه بر اساس دو مود عملکرد خمشی و برشی تشکیل می‌گردد. این پژوهش شامل یک مطالعه بر روی رفتار لرزه‌ای غیرخطی اسکلت دوگانه مقاوم حاوی قاب‌های صلب و پانل‌های مهاربندی واگرا با دستک‌های سخت‌کننده است. میزان تأثیرگذاری وجود المان‌های مذکور بر اساس انجام تحلیل‌های تاریخیچه زمانی غیرخطی تحت رکوردهای نیرومند سه مؤلفه‌ای ارزیابی گردیده است. یک رکورد پر قدرت حوزه نزدیک دارای خصوصیات ویژه‌ای است. وجود پالس‌های پر دامنه و با پریود بلند در بازه زمانی جنبش‌های نیرومند زمین، تجمع شدید انرژی جنبشی و آزاد شدن آن در یک مدت کوتاه از عمده تفاوت‌ها نسبت به رکوردهای ثبت شده در حوزه دور از گسل است. نگرش ویژه این پژوهش در ارزیابی دامنه تغییرات بیشینه پاسخ و همچنین تاریخیچه زمانی پارامترهای تغییر مکان نسبی، شتاب مطلق و سرعت نسبی طبقات و برش پایه سازه‌های مطالعاتی می‌باشد. بررسی نتایج نشان‌دهنده نمود اثرات مشخص حاصل از پالس‌های بزرگ و پیوسته سرعت موجود در تاریخیچه زمانی رکوردهای حوزه نزدیک بر تغییر مکان جانبی نسبی طبقات، همراه با ایجاد و گسترش سریع مکانیزم مفاصل پلاستیک در المان‌های اصلی اسکلت مقاوم دوگانه می‌باشد.

کلمات کلیدی: رفتار لرزه‌ای، سیستم دوگانه، پانل مهاربندی واگرا، دستک سخت‌کننده، حوزه نزدیک، پالس سرعت.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	10.22065/jsce.2018.117309.1447	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	https://10.22065/jsce.2018.117309.1447	۱۳۹۹/۰۱/۱۵	۱۳۹۹/۰۱/۱۵	۱۳۹۷/۰۴/۲۱	۱۳۹۷/۰۳/۲۶	۱۳۹۶/۱۲/۱۰
			افشین مشکوه‌الدینی		*نویسنده مسئول:	
			meshkat@khu.ac.ir		پست الکترونیکی:	

# Study on the effects of rupture directivity on seismic behaviour of hybrid skeletal systems of eccentrically braced frames with knee rods

Saeed Kiaeinejad<sup>1</sup>, Afshin Meshkat-Dini<sup>2\*</sup>, Ali Massumi<sup>3</sup>

1- MSc Student, Faculty of Engineering, Kharazmi University, Tehran

2- Assistant Professor, Faculty of Engineering, Kharazmi University, Tehran

3- Professor, Faculty of Engineering, Kharazmi University, Tehran

## ABSTRACT

The dual steel resistant skeleton is one of the functional structural systems for resisting against lateral forces induced by earthquakes that in addition to the enhanced ductility possesses high stiffness, dynamic stability, and redundancy. Behavioural pattern of dual resisting systems is based on shear and bending performance modes. This research includes a study on the nonlinear seismic behaviour of dual eccentrically braced resisting frames with knee rods. The extent of the effectiveness of knee bracing has been assessed based on nonlinear time history analyses of the structure subjected to severe three-components earthquake records. A strong near-field ground motion possesses particular characteristics. The existence of high amplitude and long period pulses in recorded strong ground motions along with the severe accumulation of kinetic energy and its short release time, are of noticeable differences between near-field and far-field earthquake records. The particular objective of this research is to evaluate the amplitude of variation in maximum responses and to determine the time history of absolute acceleration, relative displacement, and relative velocity of floors along with the base shear of the studied models. Analysing the results indicate an observable appearance of the effects of large coherent velocity pulses presented in the time history of near-field earthquake records, on the relative lateral displacement of floors and on the rapid propagation of plastic hinge mechanism throughout the primary elements of dual resistant skeleton.

## ARTICLE INFO

Received: 03 February 2018

Revised: 06 July 2018

Accepted: 07 August 2018

### Keywords:

Seismic Behaviour  
Dual Resistant System  
Eccentrically Braced Panel  
Knee Rod  
Near-field Zone  
Velocity Pulse

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/jsce.2018.117309.1447

\*Corresponding author: Afshin Meshkat-Dini

Email address: meshkat@aut.ac.ir

## ۱- مقدمه

بر پایه ضوابط و توصیه‌های آیین‌نامه‌ها، طرح لرزه‌ای ساختمان‌ها می‌بایستی به گونه‌ای باشد که بتوانند در برابر زلزله‌های شدید مقاومت کافی از خود نشان داده و در برابر زلزله‌های ضعیف‌تر نیز پایداری لازم را تأمین نمایند. اسکلت مقاوم سازه می‌بایستی با رفتار شکل‌پذیر، میزان قابل توجهی از انرژی وارده در اثر زلزله را مستهلک نماید. همچنین باید دارای سختی و مقاومت جانبی کافی بوده و ضمن تحمل تغییر شکل‌ها، پایداری پیوسته نیز داشته باشد [۱]. قاب‌های مهاربندی شده یکی از سیستم‌های مناسب باربر جانبی هستند که امروزه به‌طور گسترده‌ای در سازه‌های فولادی مورد استفاده قرار می‌گیرند. نقطه قوت این سیستم دارا بودن مزایای اصلی قاب‌های خمشی و مهاربندی شده، یعنی شکل‌پذیری و سختی الاستیک زیاد می‌باشد. تفاوت اساسی میان دو پیکربندی مهاربندی واگرا و همگرا، وجود بخشی از شاه‌تیر افقی است که در میان محل اتصال دو المان مهاربند واقع شده است. این بخش از شاه‌تیر که با نام تیر پیوند شناخته می‌شود، در زمان وقوع زلزله‌های کوچک الاستیک باقی می‌ماند. همچنین المان مذکور با قابلیت ورود به حوزه تغییر شکل‌های غیر الاستیک به‌ویژه در هنگام جنبش‌های نیرومند زمین، مانع از کماتش اعضای مهاربند می‌شود [۲ و ۳].

این پژوهش شامل یک مطالعه تحلیلی بر روی استفاده از المان دستک سخت‌کننده در پانل‌های مهاربندی واگرا در یک سیستم مقاوم دوگانه است. هدف این مدل‌سازی نیز ایجاد رفتار لرزه‌ای مناسب، جلوگیری از کماتش در مهاربندها و عدم ایجاد مفاصل پلاستیک با دامنه بزرگ در پیکره اسکلت مقاوم می‌باشد. تحلیل دقیق پارامترهای پاسخ دینامیکی سازه‌ها تحت اثر حرکات قوی زمین ناشی از زلزله‌های بزرگ و همچنین تبیین ساز و کار مناسب برای اطمینان از درستی نتایج محاسباتی، یک موضوع بسیار مهم در روند طراحی لرزه‌ای است [۴ و ۵].

اولین یافته‌ها در مورد زلزله‌های نزدیک گسل به مطالعه انجام یافته پس از زلزله کرن کانتی سال ۱۹۵۲ باز می‌گردد. در سالیان گذشته به علت کمبود و تراکم نامناسب شبکه‌های لرزه‌نگاری، امکان ثبت درست رکوردهای نیرومند در حوزه نزدیک گسل، چندان برقرار نبود. امروزه این امر به‌خوبی امکان‌پذیر است و نگاشت‌های متعددی از زلزله‌های بزرگ وجود دارد. پس از وقوع دو زلزله پارکفیلد در سال ۱۹۶۶ و سان فرناندو در سال ۱۹۷۱ در کالیفرنیا، عبارت و مفهوم حوزه نزدیک گسل مطرح گردید. با اینکه اثرات زلزله‌های نزدیک گسل در گذشته شناخته شده بود، با این وجود اهمیت موضوع مذکور در طراحی سازه‌های مهندسی به‌خوبی درک نشده بود. ثبت اطلاعات لرزش‌های چندین زلزله بزرگ و مخرب همچون لندرز ۱۹۹۲ و نورتریج ۱۹۹۴ در کالیفرنیا، کوبه ژاپن ۱۹۹۵، ازمیت ترکیه ۱۹۹۹، چی چی تایوان ۱۹۹۹ و همچنین زلزله ویران‌گر شهر بم ایران ۲۰۰۳، گستره وسیعی را در شناخت خصوصیات فیزیکی و تأثیر رکوردهای حوزه نزدیک بر روی سازه‌ها ایجاد نموده است [۶-۸].

هنگام وقوع زلزله‌های حوزه نزدیک به دلیل آن‌که امواج لرزه‌ای به‌طور سریع در اسکلت سازه منتشر می‌شوند، مسیر انتشار تأثیر زیادی بر ساختار مکانیکی و محتوای انرژی امواج نمی‌گذارد. بدین ترتیب، شناخت ماهیت رکوردهای نزدیک گسل و آشنایی با خصوصیات آن‌ها می‌تواند نقش مهمی در تعیین نیازهای لرزه‌ای سازه‌ها داشته باشد. در واقع ساختار فیزیکی طیف‌های پاسخ شتاب و سرعت رکوردهای نیرومند حوزه نزدیک در یک دامنه طیفی محدود و به بیان روشن‌تر در یک بازه پریودیک متناسب با آرایش مودال سازه‌های میان مرتبه تا بلند، ممکن است که دارای بیشترین مقادیر و در حداکثر اندازه خود باشند. همچنین به دلیل وجود چنین مشخصاتی در ماهیت زلزله‌های حوزه نزدیک، انتخاب یک یا چند مود ارتعاشی سازه‌های میان مرتبه تا بلند در توصیف پاسخ دینامیکی، تعیین‌کننده نبوده و رفتار لرزه‌ای به‌صورت دقیق، تابع مستقیم مشخصات طیفی حالت مودال نیست. در چنین شرایطی پیکربندی سازه تحت تأثیر موج‌های رفت و برگشتی زلزله قرار گرفته و رفتار لرزه‌ای نیز به‌طور مستقیم از اندرکنش اثرات امواج گذرنده و منتشرشده در اسکلت مقاوم پیروی می‌نماید. همچنین

با نزدیکی پریود این حرکات به زمان تناوب طبیعی سازه، نمود رفتار دینامیکی به سمت پدیده تشدید سوق پیدا می‌کند. این امر نیز باعث ایجاد تغییر مکان‌های دینامیکی بزرگ در سازه می‌شود [۹-۱۱].

در این پژوهش، پاسخ‌های دینامیکی و رفتار لرزه‌ای سازه مقاوم دوگانه با دو مدل مهاربندی واگرا و واگرای دستک‌دار (سخت شده) با یکدیگر مقایسه شده و نتایج، ارزیابی تحلیلی شده‌اند.

## ۲- لرزه‌شناسی زلزله‌های حوزه نزدیک

وقوع حرکات نیرومند زمین، اصلی‌ترین دلیل ایجاد خسارات در سازه‌ها هستند. لرزش‌های نه‌چندان پر قدرت زمین در محدوده دور از گسل-های فعال، به‌طور قابل ملاحظه‌ای متفاوت از رکوردهای ثبت شده در حوزه نزدیک و با فاصله چند کیلومتر تا سطح گسیختگی گسل می‌باشند. الگوهای تاریخیچه زمانی تغییر مکان زمین تحت جنبش‌های فوق، می‌تواند از روند گسیختگی مکانیزم گسل و نیز اثرات جهت‌داری متناظر با آن تأثیر پذیرد. هنگامی که گسیختگی به‌صورت پیش‌رونده و به سمت ساختگاه حرکت نماید و راستای لغزش مکانیزم گسل نیز در همین راستا باشد، حرکات دینامیکی زمین در این مسیر دارای نمود جهت‌داری پیش‌رونده<sup>۱</sup> است. این فرایند، تولید کننده پالس‌های پر دامنه و پریود بلند در تاریخیچه زمانی رکورد زلزله خواهد بود [۱۲-۱۳].

علت به وجود آمدن مشخصات خاص در ماهیت فیزیکی رکوردهای نزدیک گسل، تجمع آثار انتشار امواج برشی پرنرژی  $S_H$  و  $S_V$  در جبهه گسیختگی است. هنگامی که روند گسیختگی مکانیزم گسل با سرعتی نزدیک به سرعت امواج برشی زلزله به سمت ساختگاه انتشار یابد، باعث به وجود آمدن یک ساختار پالس گونه با پریود بلند در بازه ابتدایی رکوردهای ثبت‌شده در ایستگاه‌های نزدیک صفحه شکست گسل می‌گردد. یکی از مهم‌ترین پیامدهای زمین‌شناختی ناشی از زلزله‌های نزدیک گسل، ایجاد جابجایی ماندگار<sup>۲</sup> زمین و اثرات ویران‌گر جهت‌داری پیش‌رونده است که می‌تواند نیازهای لرزه‌ای غیر قابل انتظاری را به سازه‌ها تحمیل کند. پدیده جابجایی ماندگار یا گام پرتابی<sup>۳</sup> زمین، همواره همراه با یک پالس بزرگ یک‌سویه سرعت است و به مقدار لغزیدن برگشت‌ناپذیر گسل ارتباط دارد. فرایند جهت‌داری پیش‌رونده باعث تولید مقادیر بسیار عظیم انرژی جنبشی گردیده که در یک بازه زمانی نه‌چندان طولانی به ساختگاه و تأسیسات وارد می‌شود. اسکلت مقاوم سازه‌ها نیز باید دارای قابلیت میرا نمودن این انرژی باشند. فرایند فوق همراه با ایجاد اثرات شدید کمانشی، تغییر مکان‌های بزرگ و چرخش‌های غیر الاستیک اتصالات است. رکوردهای حوزه نزدیک در مقایسه با رکوردهای ثبت‌شده در فاصله بیش از ۲۰ کیلومتر تا صفحه شکست گسل، دارای باند فرکانس‌های پایین (کمتر از ۱۰ هرتز) بسیار پرنرژی می‌باشند. این تفاوت را می‌توان به وجود ساختارهای پالس گونه پریود بلند در تاریخیچه زمانی مرتبط دانست. ویژگی‌های فوق را می‌توان برای رکوردهای نیرومند ثبت‌شده تحت فرایند گسیختگی در گسل‌های امتداد- لغز<sup>۴</sup> و گسل‌های شیب- لغز<sup>۵</sup> ملاحظه نمود [۱۴-۱۵].

## ۳- خصوصیات رکوردهای انتخابی

رکوردهای واقعی زلزله بهترین نمایش از ساختار بارگذاری لرزه‌ای برای ارزیابی و طراحی سازه‌ها می‌باشند. تمام رکوردهای انتخابی در این پژوهش، به صورت طبیعی و سه مؤلفه‌ای به مدل‌های مطالعاتی اعمال گردیده است. این امر به‌ویژه در خصوص شتاب‌نگاشت‌های ثبت‌شده در حوزه نزدیک گسل حایز اهمیت است. زیرا این شتاب‌نگاشت‌ها در فواصل نزدیک به صفحه شکست ثبت‌شده و بیان‌گر رفتار واقعی زمین

<sup>1</sup> Forward Directivity

<sup>2</sup> Permanent Displacement

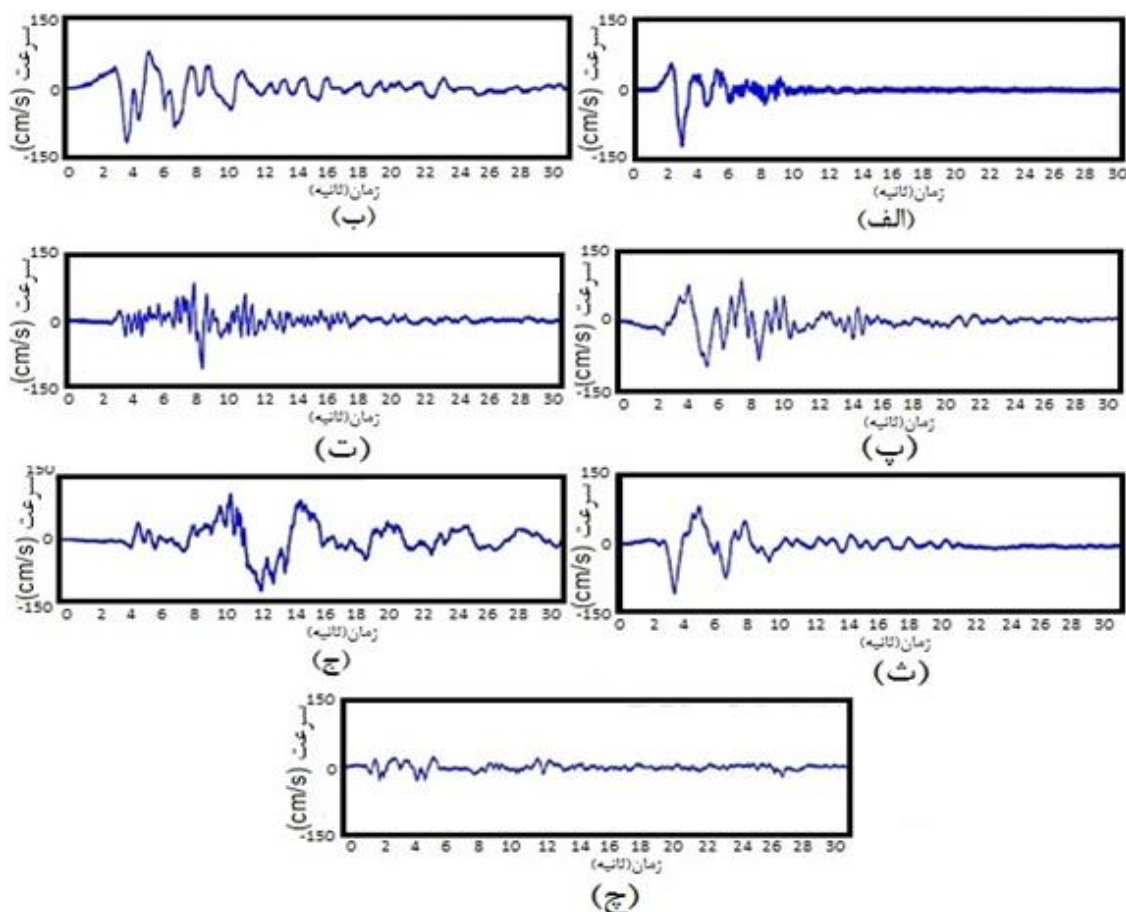
<sup>3</sup> Fling Step

<sup>4</sup> Strike Slip

<sup>5</sup> Dip Slip



تأثیرگذاری باند فرکانسی پایین در حمل انرژی جنبشی، نمود متفاوتی از ساختارهای پالس سرعت را به وجود می‌آورد. توضیح مشخص‌تر این موضوع در شکل ۲ و همراه با ارزیابی تاریخیچه زمانی سرعت مؤلفه TR رکورد حوزه دور السنترو ۱۹۴۰ لحاظ گردیده است.



شکل ۲: تاریخیچه زمانی سرعت مؤلفه TR رکوردهای انتخابی جدول ۱؛ (الف) رکورد اصلی زلزله بم ۲۰۰۳، (ب) رکورد SCS از زلزله نورتریج ۱۹۹۴، (پ) رکورد LGP از زلزله لوماپریتا ۱۹۸۹، (ت) رکورد TAR از زلزله نورتریج ۱۹۹۴، (ث) رکورد JFP از زلزله نورتریج ۱۹۹۴، (ج) رکورد اصلی طبس ۱۹۷۸، (چ) رکورد حوزه دور السنترو ۱۹۴۰.

نتایج مطالعات در این زمینه نشان می‌دهد که اثرات تخریب سازه‌ای تحت اثر این گونه رکوردها، بسیار بیشتر از جنبش‌های ثبت شده در حوزه دور گسل و با فاصله بیش از ۲۰ کیلومتر است. در محدوده زمانی پالس‌های سرعت، انرژی جنبشی زلزله در باند فرکانس پایین (پریودهای بلند) که متناظر با مشخصات مودال ساختمان بلند می‌باشد، به صورت متمرکز و شدید آزاد می‌شود. همراه با آزاد شدن سریع انرژی جنبشی زلزله در بازه زمانی پالس سرعت، پارامترهای رفتار لرزه‌ای ساختمان دچار تغییرات بسیار شدید تا حد عملکرد CP می‌شوند. چنانچه در تاریخیچه هر دو مؤلفه افقی رکورد حوزه نزدیک، پالس‌های بلندمدت و پردامنه سرعت وجود داشته باشد، تغییرات بزرگی در دامنه عددی پارامترهای پاسخ سازه ایجاد خواهد شد.

همچنین به علت مقادیر زیاد انرژی جنبشی اعمالی توسط این پالس‌ها، در یک مدت کوتاه ساختار رفتار غیرخطی سازه دگرگون می‌شود. همراه با گسترش مفاصل پلاستیک در اسکلت مقاوم، بخشی از انرژی زلزله نیز در اولین حوزه‌های ایجاد شده تسلیم المان‌ها، جذب گردیده و احتمال تمرکز دامنه‌های بزرگ رفتار غیرخطی وجود دارد. بدین ترتیب افزایش نسبی برش پایه، افزایش نیاز شکل‌پذیری، افزایش اثرات

میرایی هیستریزیس در رفتار لرزه‌ای پیش خواهد آمد. نکته دیگر آن که جنبش‌های نیرومند زمین در حوزه نزدیک گسل می‌توانند دارای ارتعاشات شدید قائم نیز باشند. ساختار محیط پیوسته خاک ساختگاه، به‌طور کلی قابلیت انتشار امواج فشاری با باند فرکانسی بالا و امواج برشی با محتوای فرکانس‌های پایین را دارد. این ویژگی‌ها نیز تأثیر گسترده‌ای در رفتار لرزه‌ای سه‌بعدی اسکلت‌های مقاوم خواهد داشت [۱۷].

جدول ۱: مشخصات فیزیکی و طیفی شتاب‌نگاشت‌های مورد استفاده در این پژوهش.

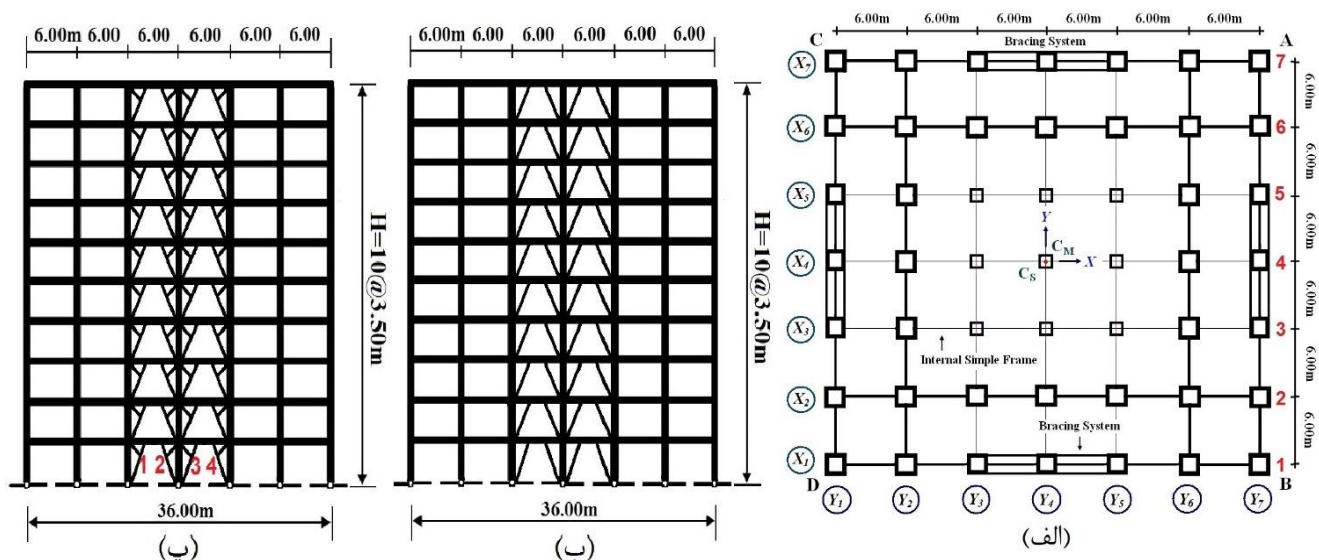
رکورد زلزله	مؤلفه	PGA (g)	PGV (cm/sec)	PGD (cm)	بزرگا $M_w$	PGV/PGA (sec)	PGD/PGV (sec)
طیس ۱۹۷۸ (TAB) – 3 km	LN	۰/۸۳۶	۹۷/۷	۳۹/۹	۷/۴	۰/۱۲	۰/۴۰
	TR	۰/۸۵۱	۱۲۱/۳	۹۴/۵		۰/۱۴	۰/۷۸
	UP	۰/۶۸۸	۴۵/۵	۱۷/۰		۰/۰۶	۰/۳۷
بم ۲۰۰۳ (BAM) – 1 km	LN	۰/۶۳۵	۵۹/۶	۲۰/۷	۶/۶	۰/۰۹	۰/۳۴
	TR	۰/۷۹۳	۱۲۳/۷	۳۷/۴		۰/۱۶	۰/۳۰
	UP	۰/۹۹۹	۳۷/۶۶	۱۰/۱۱		۰/۰۳	۰/۲۶
نورتریج ۱۹۹۴ Sylmar (SCS) – 6.4 km	LN	۰/۸۹۷	۱۰۲/۸	۴۶/۹۹	۶/۷	۰/۱۲	۰/۴۶
	TR	۰/۶۱۲	۱۱۷/۴	۵۳/۴۷		۰/۱۹	۰/۴۵
	UP	۰/۵۸۶	۳۴/۶	۲۵/۴۴		۰/۰۶	۰/۷۳
لوما پریتا ۱۹۸۹ Los Gatos (LGP) – 6.1 km	LN	۰/۵۹۰	۴۹/۸۸	۱۴/۳۲	۶/۹	۰/۰۸۵	۰/۲۹
	TR	۰/۵۶۳	۹۵/۸۶	۵۱/۲۸		۰/۱۷	۰/۵۳
	UP	۰/۸۶	۵۳/۱۶	۲۵/۰۹		۰/۰۶۲	۰/۴۷
نورتریج ۱۹۹۴ Jensen Filter (JFP) – 6.1 km	LN	۰/۵۹۳	۹۹/۱۰	۲۳/۹۶	۶/۷	۰/۱۶	۰/۲۴
	TR	۰/۴۲۴	۱۰۵/۹۵	۵۰/۶۹		۰/۲۵	۰/۴۷
	UP	۰/۳۹۹	۳۳/۹۱	۸/۸۹		۰/۰۸	۰/۲۶
نورتریج ۱۹۹۴ Tarzana Hill (TAR) – 7.1 km	LN	۰/۹۹	۷۶/۷۷	۲۹/۲۱	۶/۴	۰/۰۷	۰/۳۸
	TR	۱/۷۷	۱۰۹/۶۷	۳۶/۵۶		۰/۰۶	۰/۳۳
	UP	۱/۰۴	۷۳/۶۹	۲۰/۵۲		۰/۰۷	۰/۲۷
السنترو ۱۹۴۰ (ELC) – 8.3 km	LN	۰/۲۱۵	۳۰/۲	۲۳/۹۱	۷	۰/۱۴	۰/۷۹
	TR	۰/۳۱۳	۲۹/۸	۱۳/۳۲		۰/۱۰	۰/۴۵
	UP	۰/۲۰۵	۱۰/۷	۹/۱۶		۰/۰۵	۰/۸۵

#### ۴- مدل‌سازی سازه‌های مطالعاتی و ماهیت رفتار غیرخطی

سازه‌های مورد مطالعه در این پژوهش، دو ساختمان ۱۰ طبقه با سیستم مقاوم دوگانه شامل قاب صلب به همراه پیکربندی دهانه‌های حاوی پانل‌های مهاربندی واگرا (مدل ۱) و نیز واگرای سخت شده با دستک (مدل ۲) می‌باشند، (شکل ۳). سازه‌های مطالعاتی در پلان و ارتفاع، از لحاظ هندسی منظم بوده و اندازه تمامی دهانه‌های اسکلت مقاوم در هر دو جهت از محور تا محور ستون‌ها به طول ۶ متر و ارتفاع طبقات

۳/۵ متر می باشد. قاب‌های مرکزی سازه به صورت ساده با اتصالات مفصل است. همچنین قاب‌های واقع در گوشه‌های پلان و نیز دومین محور از هر طرف، از نوع قاب صلب (با اتصالات ممان گیر) بوده و دهانه‌های مهاربندی شده نیز در بخش میانی هر چهار صفحه قابی واقع در محیط پلان سازه قرار دارند.

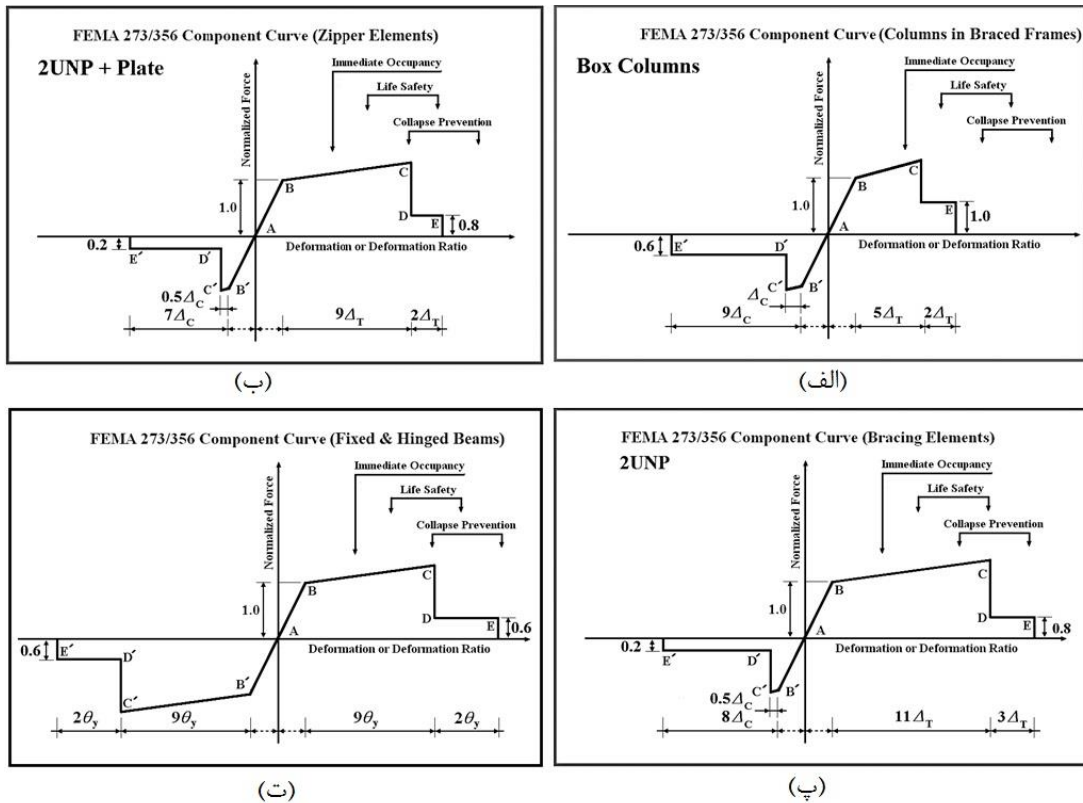
بارگذاری سازه‌ها بر پایه مبحث ششم مقررات ملی ساختمان [۱۸] صورت گرفته است. بار مرده و زنده اعمالی برای تمام طبقات به ترتیب ۵۰۰ و ۲۰۰ کیلوگرم بر مترمربع و برای بام به ترتیب ۵۰۰ و ۱۵۰ کیلوگرم بر مترمربع می باشند. طبقه بندی زمین ساختگاه، تیپ II و نسبت شتاب مبنای طرح در پهنه با خطر نسبی زیاد در نظر گرفته شده است. ضریب رفتار سازه با قابلیت شکل پذیری متوسط لحاظ گردیده و دیافراگم کف‌های طبقات با سختی درون صفحه بی نهایت نسبت به عناصر قائم باربر جانبی منظور شده است. مشخصات مقاطع اعضای سازه‌های مطالعاتی بر اساس ضوابط آیین نامه ۲۸۰۰ ویرایش چهارم [۱۹] و نیز مبحث دهم مقررات ملی ساختمان [۲۰] طرح شده است. همچنین معیارهای مربوط به تعریف اصل ستون قوی-تیر ضعیف و محدودیت دریفت طبقات نیز در نظر گرفته شده اند. شکل‌های ۳ تا ۵ دربرگیرنده اطلاعات طرح اسکلت مقاوم سازه‌های مطالعاتی می باشند [۲۱]. پرونده‌های ارتعاشی مدل‌های سازه‌ای در جدول ۲ نمایش داده شده و نمود ویژگی رفتار پیشگی سخت نیز تأیید می گردد.



شکل ۳: پلان و نمای سازه‌های مطالعاتی؛ (الف) پلان با مشخصه  $C_m$  و  $C_s$  به ترتیب مراکز جرم و برش طبقه، (ب) نمای مدل ۱ با سیستم ترکیبی قاب صلب - مهاربند واگرا، (پ) نمای مدل ۲ با سیستم ترکیبی قاب صلب - مهاربند واگرای دستک دار [۲۱].

مدل سازی رفتار غیرخطی سازه‌های مطالعاتی بر پایه مفاصل غیرخطی و طبق ضوابط موجود در گزارش FEMA356 در نظر گرفته شده است [۲۲]. با توجه به توصیه گزارش FEMA356 برای توصیف رفتار غیرخطی قاب مهاربندی شده، مفصل غیرخطی با دو دامنه متفاوت رفتاری در محدوده‌های کششی و فشاری المان‌های مهاربند تعریف گردیده است. همچنین برای قاب‌های صلب نیز مفصل PMM (اندرکنش نیروی محوری و لنگر خمشی) به همگی المان‌های ستون و نیز مفصل M به تمامی شاه تیرها اختصاص داده شد. مدل‌های تحلیلی رفتار غیر-خطی مفاصل اشاره شده فوق در شکل ۴ نمایش داده شده اند. نکته دیگر آن که در تیرهای پیوند (پانل‌های مهاربندی واگرا) نیز مفاصل غیرخطی از نوع خمشی مدل گردیده است. توصیف نکات تکمیلی و ملاحظات کامل طراحی نیز در هر دو مرجع ۲۱ و ۲۳ آورده شده است.

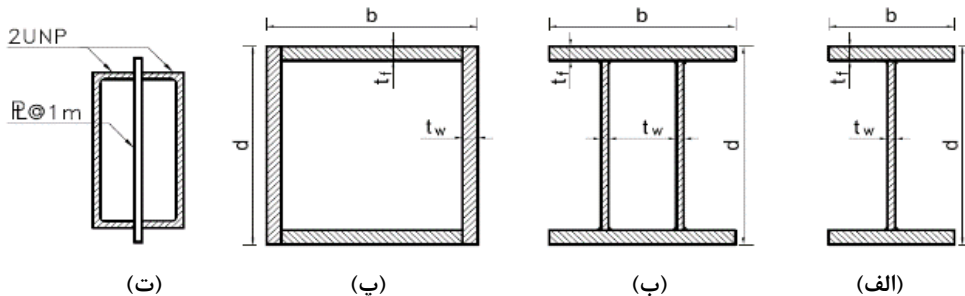




شکل ۴: مدل FEMA رفتار غیر خطی؛ (الف) المان ستون در قاب مهاربندی، (ب) المان ستون زیپر، (پ) المان مهاربند، (ت) المان ستون و تیر در قاب‌های خمشی [۲۲ و ۲۱].

جدول ۲: مشخصات مربوط به مودهای ارتعاشی سازه‌های مطالعاتی شکل ۳.

مود سوم		مود دوم		مود اول		
ماهیت	پریود (ثانیه)	ماهیت	پریود (ثانیه)	ماهیت	پریود (ثانیه)	
محوری	۰/۷۹۹	انتقالی	۱/۱۳۶	انتقالی	۱/۱۳۶	قاب خمشی-مهاربند واگرا
محوری	۰/۷۹۹	انتقالی	۱/۱۴۱	انتقالی	۱/۱۴۱	قاب خمشی-مهاربند واگرای دستک‌دار

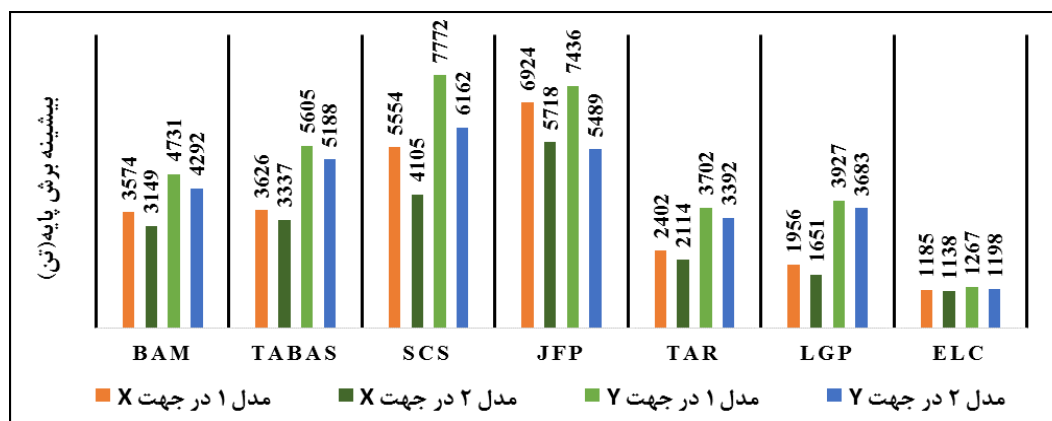


شکل ۵: مشخصات نیمرخ‌های مورد استفاده در سازه‌های مطالعاتی؛ (الف) شاه تیر از نوع تیروورق (با علامت اختصاری PG) و ضخامت بخش جان برابر  $t_w=10mm$ ، (ب) شاه تیر با دو بخش جان از نوع تیروورق (با علامت اختصاری 2WPG) و ضخامت جان  $t_w=10mm$ ، (پ) ستون از نوع باکس (با علامت اختصاری BOX)، (ت) مهاربند و دستک از نوع دوبل ناودانی (با علامت اختصاری 2UNP) به همراه اسپیسر به فواصل ۱ متر [۲۱].

## ۵- ارزیابی پاسخ‌های لرزه‌ای

در این پژوهش، رفتار دینامیکی غیرخطی سازه‌های مطالعاتی تحت رکوردهای انتخابی مورد ارزیابی قرار گرفته است. بررسی رفتار دینامیکی غیرخطی سازه‌ها، یک روش مبتنی بر محاسبه و گردآوری داده‌های تحلیلی است و می‌تواند جهت ارزیابی پاسخ لرزه‌ای غیر الاستیک اسکلت‌های سازه‌ای به کار رود. این روش از تکنیک انتگرال‌گیری گام به گام مستقیم به منظور حل عددی دستگاه معادلات دیفرانسیل دینامیکی حاکم بر رفتار سازه در حوزه‌های خطی و غیر خطی استفاده می‌کند. مجموعه تحلیل‌های دینامیکی تاریخچه زمانی غیر خطی صورت گرفته در این مطالعه بر پایه انتگرال‌گیری عددی به روش  $HHT^1$  است [۲۴]. تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی تاریخچه زمانی بر روی مدل‌های مطالعاتی تحت رکوردهای جدول ۱ و با استفاده از نرم‌افزار SAP2000 انجام گردیده است [۲۵]. همچنین رفتار غیرخطی اعضاء در تشکیل مفاصل پلاستیک به صورت نیرو-دوران و تغییرشکل-دوران، مشابه نمودارهای نشان داده در شکل ۴ برای مدل‌های مطالعاتی (شکل‌های ۳ و ۵) تعریف شده است.

شکل ۶ مقادیر بیشینه برش پایه در تراز فنداسیون سازه‌های مطالعاتی را نمایش می‌دهد. بیشینه برش پایه تحت رکوردهای حوزه نزدیک به دلیل وجود ساختارهای موج گونه در تاریخچه زمانی سرعت زمین، به‌ویژه در مؤلفه عمود بر صفحه شکست گسل (TR) دارای مقادیر بزرگی می‌باشد. همچنین، مقادیر بیشینه برش پایه تحت اثر رکوردهای حوزه نزدیک نیز به نسبت بیشتر از رکورد حوزه دور ELC است. نداشتن‌های حوزه دور، تنها حاوی مجموعه‌ای از اسپایک‌های کم دامنه و کم انرژی شتاب هستند. تاریخچه زمانی هر دو مؤلفه LN و TR یک رکورد پر قدرت حوزه نزدیک، دارای اسپایک‌های پر دامنه و بزرگ شتاب و نیز پالس‌های پیوسته و پر بود بلند سرعت است. حداکثر مقدار برش پایه تحت اعمال رکورد حوزه دور و به نسبت ضعیف ELC در حدود ۱۲۶۷ تن می‌باشد و این مقدار در جهت عمود بر صفحه شکست گسل (متناظر با راستای Y پلان) تحت رکورد حوزه نزدیک SCS نزدیک به ۷۷۷۲ تن است.



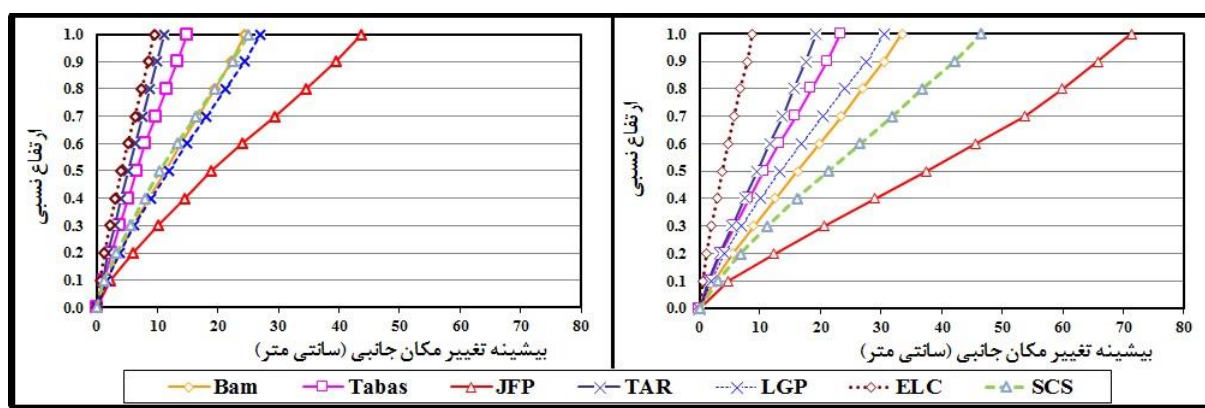
شکل ۶: بیشینه برش پایه سازه‌های مطالعاتی در جهات X و Y پلان (شکل ۳).

ملاحظه می‌شود که مقادیر بیشینه برش پایه با تعبیه المان‌های دستک در اسکلت مقاوم (شکل ۳-پ) کاهش یافته است. به‌طور مثال تحت اثر دو رکورد نیرومند حوزه نزدیک BAM و JFP، افزودن المان‌های دستک سخت‌کننده سبب کاهش برش پایه به ترتیب به میزان ۹ و ۲۶ درصد شده است. مشاهده می‌شود که مقادیر بیشینه برش پایه در جهت Y پلان سازه‌های مطالعاتی تحت رکوردهای حوزه نزدیک، بیشتر از مقادیر متناظر در راستای X می‌باشد. دلیل این تفاوت نیز به ماهیت رکوردهای حوزه نزدیک و وجود اثرات جهت‌داری در ساختار فیزیکی

<sup>6</sup> Hiber Hughes Taylor

آن‌ها برمی‌گردد. در واقع برای شتاب‌نگاشت‌های دور از گسل، دو مؤلفه افقی LN و TR بسیار شبیه یکدیگر بوده و مقادیر پاسخ‌های لرزه‌ای متناظر با هر دو مؤلفه مذکور نیز به صورت تقریبی برابر است.

شایان ذکر است که تجمع آثار ترکیب امواج برشی زلزله در مسیر گسیختگی مکانیزم گسل، متمایل به راستای عمود بر خط گسل است. افزون بر آن، وجود الگوی شعاعی جابجایی برشی در مکانیزم گسل باعث می‌گردد که در هنگام جنبش‌های نیرومند زمین، مؤلفه عمود بر راستای عمومی صفحه شکست (مؤلفه TR) دارای شاخص‌های فیزیکی بزرگ‌تری نسبت به مؤلفه موازی (مؤلفه LN) باشد. ویژگی‌های فوق در ماهیت رکوردهای حوزه نزدیک حاوی اثرات گسیختگی پیشرونده گسل وجود دارد. شکل ۷ نمایش‌گر پوش بیشینه تغییر مکان جانبی طبقات در نقطه D پلان و هم‌راستا با مؤلفه TR رکورد (محور Y پلان) است. ملاحظه می‌شود که دامنه تغییرات این پارامتر پاسخ برای سازه با مهاربندی واگرای دستک‌دار، دارای کاهش قابل توجه است. این روند تحت همگی رکوردهای انتخابی برقرار بوده، با این تفاوت که نمود این تغییرات تحت اعمال رکوردهای حوزه نزدیک، مشخص‌تر از رکورد ELC می‌باشد.



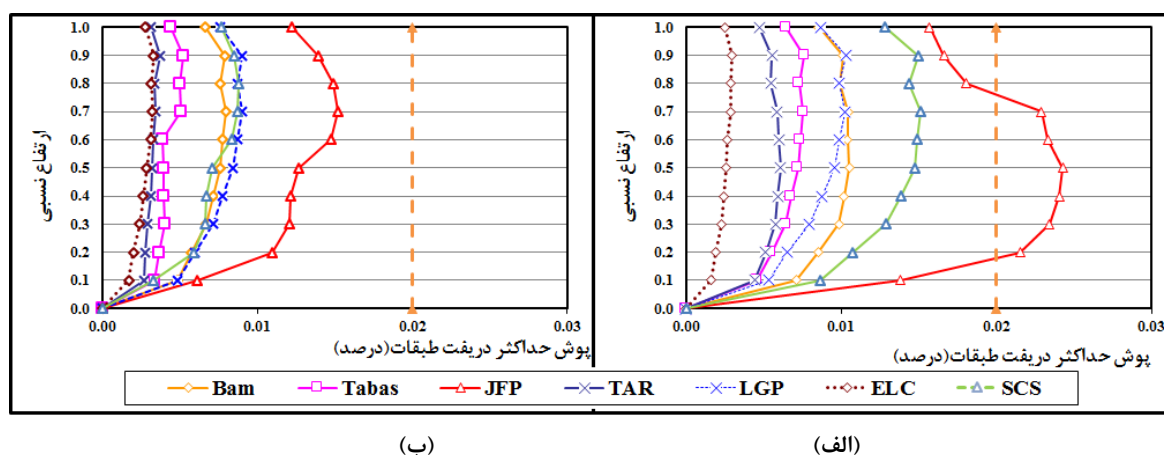
(ب)

(الف)

شکل ۷: پوش بیشینه تغییر مکان جانبی نقطه D پلان سازه‌های مطالعاتی ۱۰ طبقه؛ (الف) سیستم ترکیبی قاب صلب - مهاربند واگرا (مدل ۱)، (ب) سیستم ترکیبی قاب صلب - مهاربند واگرای دستک‌دار (مدل ۲).

یکی از پارامترهای مهم جهت ارزیابی عملکرد لرزه‌ای سازه، دررفت یا تغییر مکان نسبی طبقات است. یک ارتباط ساختاری میان پارامتر دررفت و تقاضای شکل‌پذیری هر طبقه وجود دارد. بدین ترتیب در صورت عدم برآورده شدن حد مجاز این پارامتر نیاز، سطح عملکرد لرزه-ای متناظر با پاسخ غیرخطی المان‌های اصلی سازه می‌تواند از حد ایمنی جانی نیز تجاوز کند [۲۶ و ۲۷].

حداکثر دررفت حاصل از تحلیل‌های تاریخچه زمانی غیرخطی برای نقطه D پلان مدل‌های مطالعاتی، در شکل ۸ نمایش داده شده است. نتایج ناشی از اعمال رکوردهای حوزه نزدیک حاوی پالس، افزایش قابل ملاحظه‌ای را در مقدار دررفت نشان می‌دهد. نتایج دررفت با حدود مجاز آیین‌نامه ای (سطح ۰/۰۲) مقایسه شده‌اند. دامنه تغییرات دررفت طبقات سازه‌های مطالعاتی تحت بیشتر رکوردها از حد مجاز ۲ درصد تجاوز ننموده است. این پارامتر برای سازه با مهاربندی واگرا به همراه دستک، تحت زمین‌لرزه‌های قدرتمند حوزه نزدیک دارای مقادیر به نسبت کمتری می‌باشد. همچنین روند تغییرات پارامتر دررفت مدل‌های مطالعاتی تحت رکوردهای حوزه نزدیک حاوی پالس سرعت، با تغییر سیستم پانل‌های مهاربندی شده و افزودن المان‌های دستک، به‌خصوص در طبقات میانی و بالاتر دارای نمود بیشتری است.

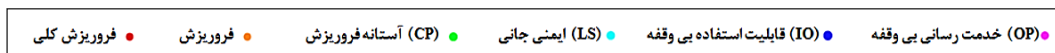
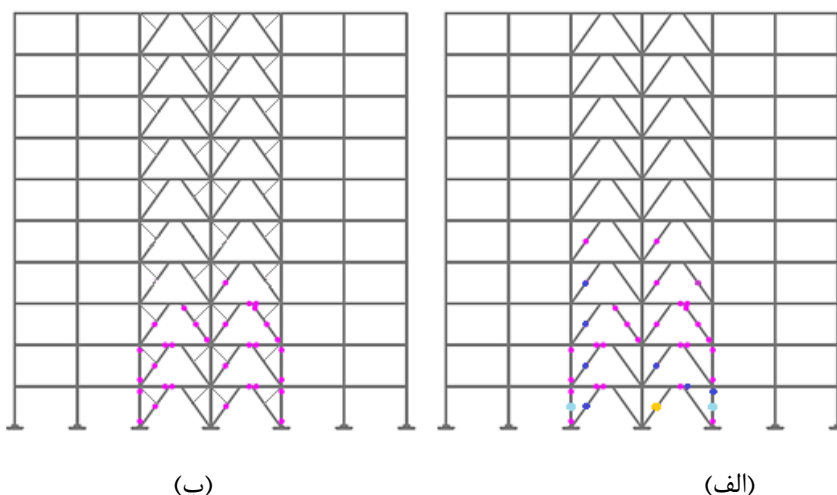


شکل ۸: پوش بیشینه تغییر مکان نسبی جانبی (دریفت) نقطه D پلان سازه‌های مطالعاتی ۱۰ طبقه؛ (الف) سیستم ترکیبی قاب صلب - مهاربند واگرا (مدل ۱)، (ب) سیستم ترکیبی قاب صلب - مهاربند واگرای دستک‌دار (مدل ۲).

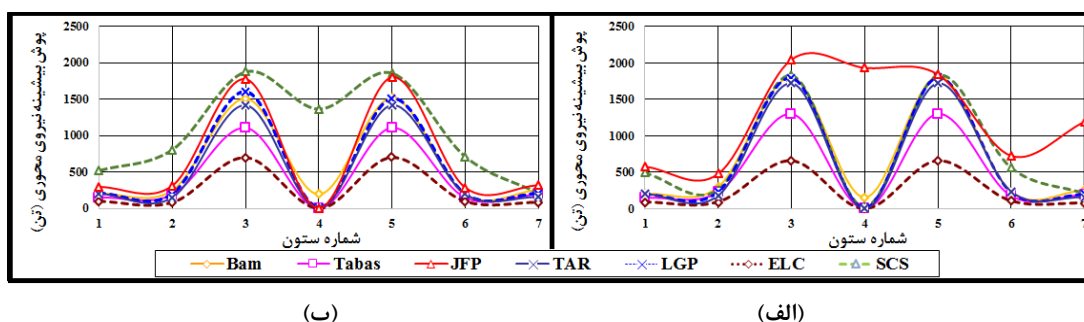
ارزیابی پارامتر دریفت در مدل‌های مطالعاتی نشان می‌دهد که افزودن المان دستک به پانل‌های مهاربندی واگرا، سبب کاهش این پارامتر نیاز به خصوص تحت رکوردهای حوزه نزدیک می‌شود. ملاحظه می‌شود که تحت رکورد نیرومند JFP از زلزله نورتریج ۱۹۹۴، مقدار بیشینه دریفت در مدل مهاربندی واگرا (شکل ۳-ب) برابر با ۰/۰۲۶ است. اندازه همین پارامتر برای مدل مهاربندی واگرا به همراه دستک‌های سخت‌کننده (شکل ۳-پ) برابر با ۰/۰۱۵ می‌باشد. در واقع افزودن المان‌های دستک باعث عدم تجاوز پارامتر دریفت از مقدار مجاز ۰/۰۲ شده است. همچنین در بررسی دو پارامتر بیشینه تغییر مکان جانبی و بیشینه تغییر مکان جانبی نسبی (دریفت) طبقات تحت رکورد حوزه دور ELC، تغییرات قابل ملاحظه‌ای میان پاسخ‌های متناظر وجود ندارد. این موضوع نشان‌دهنده آن است که تعبیه المان دستک در مدل مهاربندی واگرا به‌ویژه در ساختمان‌های با خطر پایین وقوع زلزله، چندان بهبودی در رفتار دینامیکی اسکلت مقاوم سازه ایجاد نمی‌نماید.

بررسی و ارزیابی مکانیزم مفاصل پلاستیک تشکیل شده تحت اثر رکوردهای حوزه نزدیک حاوی اثرات جهت‌داری، نمود مشخصی از تأثیرات مخرب این جنبش‌های نیرومند زمین بر عملکرد لرزه‌ای اسکلت مقاوم سازه‌های مطالعاتی می‌باشد. محل و نوع مکانیزم مفاصل تشکیل شده تحت اثر رکورد اصلی و پر قدرت مربوط به زلزله BAM برای جهت Y اسکلت مقاوم هر دو سازه مطالعاتی (شکل ۳) در شکل ۹ نشان داده شده است. شکل مذکور در واقع نشان‌دهنده محل و آرایش تشکیل مفاصل پلاستیک در بحرانی‌ترین قاب مدل‌های مطالعاتی می‌باشد که با توجه به حدود تعریف شده در FEMA 356 به دست آمده است. ملاحظه می‌شود که مکانیزم مفاصل پلاستیک تشکیل شده تحت رکورد مذکور در سازه دارای پانل‌های مهاربند واگرای دستک‌دار، از تعداد کمتر و نیز سطح عملکرد پایین‌تر (با دامنه کوچک‌تر رفتار غیرخطی) برخوردار است. مفاصل پلاستیک با دامنه بزرگ رفتار غیرخطی در سازه با پانل‌های مهاربندی واگرا، در طبقات پایینی و به‌ویژه در ستون‌ها و مهاربند‌های طبقه اول متمرکز شده‌اند. عملکرد ترکیبی پانل‌های قاب خمشی واقع در محورهای X2، X6 و Y2، Y6 (با ویژگی رفتار در مود برشی) به همراه پانل‌های مهاربندی شده واقع در محورهای X1، X7 و Y1، Y7 (با ویژگی رفتار در مود خمشی)، برازش‌کننده پاسخ لرزه‌ای سازه مطالعاتی است.

نتایج این پژوهش نشان می دهد که تحت اثر رکوردهای نه چندان نیرومند حوزه نزدیک، رفتار لرزه ای با نمود جامع تر غیر خطی هندسی است. وجود پالس و اسپایک های بزرگ و پر دامنه در تاریخچه زمانی یک رکورد نیرومند حوزه نزدیک سبب می شود که پس از گذر از محدوده زمانی نقاط اوج و بیشینه های سرعت زمین (بویژه متناظر با مؤلفه TR)، مشخصات رفتار لرزه ای با نمود جامع غیر خطی هندسی - مادی بشود. ماهیت راندوم رکوردهای زلزله و عدم قطعیت های موجود در فرایند انتشار امواج زلزله در پیکره اسکلت مقاوم سازه می تواند در نمود تفاوت های محاسباتی و نیز حصول ساختار غیر یکسان در آرایش مفاصل غیر خطی، تأثیرگذار باشد. بر همین اساس نیز ممکن است، یک گروه از المان های اصلی اسکلت مقاوم وارد حوزه رفتار غیر خطی نشوند. این وضعیت، بویژه در طبقات بالایی اسکلت مقاوم سازه ایجاد می شود.



شکل ۹: ساختار مفاصل غیر خطی تشکیل شده در قاب AB (شکل ۳) در راستای Y پلان سازه های مطالعاتی تحت اثر رکورد BAM: (الف) سیستم ترکیبی قاب صلب - مهاربند واگرا (مدل ۱)، (ب) سیستم ترکیبی قاب صلب - مهاربند واگرای دستک دار (مدل ۲).

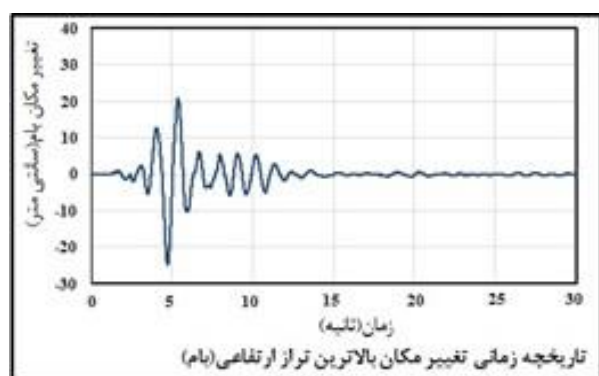


شکل ۱۰: پوش بیشینه نیروی محوری ستون های قاب AB (شکل ۳) در راستای Y پلان سازه های مطالعاتی: (الف) سیستم ترکیبی قاب صلب - مهاربند واگرا (مدل ۱)، (ب) سیستم ترکیبی قاب صلب - مهاربند واگرای دستک دار (مدل ۲).

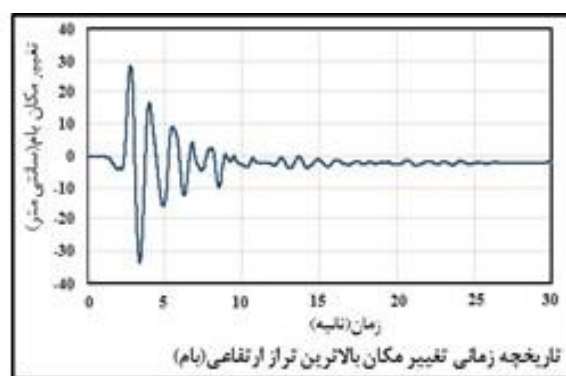
همچنین در شکل ۱۰ پوش بیشینه نیروی محوری ستون های قاب AB در شکل ۳ در راستای Y پلان مشاهده می شود (شکل ۳-الف). ملاحظه می شود که کمترین مقادیر این پارامتر تحت رکورد ELC بدست آمده است. افزون بر آن، در مقایسه میان عملکرد دو مدل مطالعاتی مشاهده می شود که بیشینه نیروی محوری ستون های مورد نظر در مدل دارای دستک سخت کننده نسبت به مدل دیگر، تحت بیشتر رکوردها دارای مقادیر کمتری است. ماکزیمم مقادیر بیشینه نیروی محوری تحت رکوردهای مختلف، در ستون های ۳ و ۵ ایجاد شده

است. به طور مثال برای رکورد حوزه نزدیک طبس در مدل بدون دستک (مدل ۱)، بیشینه نیروی محوری در ستون‌های ۳ و ۵ به ترتیب برابر با ۱۳۰۱ و ۱۳۰۳ تن بوده است. این در حالی است که مقادیر متناظر نیروی محوری هر دو ستون مذکور در مدل مهاربندی واگرا با دستک سخت‌کننده (مدل ۲)، به ترتیب برابر با ۱۱۰۶ و ۱۱۰۷ تن می‌باشد. مقایسه مقادیر حاصله یک کاهش متوسط ۱۵ درصدی ناشی از افزودن دستک را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج حاصل از این پژوهش، مقادیر بیشینه نیروی محوری تحت رکورد SCS برخلاف سایر رکوردها، با افزودن المان‌های دستک به پانل‌های مهاربندی واگرا (مدل ۲) افزایش یافته است. نکته فوق برای ستون شماره ۴ تحت رکورد SCS به وضوح قابل مشاهده است.

یک موضوع مهم در بحث طراحی لرزه‌ای، احتمال وقوع تغییر مکان‌های زیاد در اسکلت مقاوم سازه، هنگام زلزله‌های بزرگ می‌باشد. از این رو ممکن است که رفتار اعضاء در محدوده غیرخطی، پیشروی زیادی داشته باشد. نکته دیگر آن که در محدوده تغییر شکل‌های بزرگ، تغییرات نیرو در اعضاء و اتصالات اندک است. بدین لحاظ، معیار مناسب که بتواند رفتار اعضاء را به صورت صحیح‌تر بیان کند، کنترل پارامترهای تغییر مکان می‌باشد [۲۸]. شکل ۱۱ تاریخچه زمانی تغییر مکان بالاترین تراز ارتفاعی سازه (طبقه ۱۰) را تحت رکورد BAM نشان می‌دهد. این نمودار برای هر دو مدل مطالعاتی تحت رکورد مذکور ترسیم شده است. مقادیر بیشینه تغییر مکان جانبی در دو مدل مطالعاتی در بازه‌های زمانی مشابه اتفاق افتاده است. بازه زمانی وقوع ماکزیمم‌ها نیز در محدوده پیرو پالس ترکیبی و پیوسته سرعت رکورد BAM قرار دارد (شکل ۲).

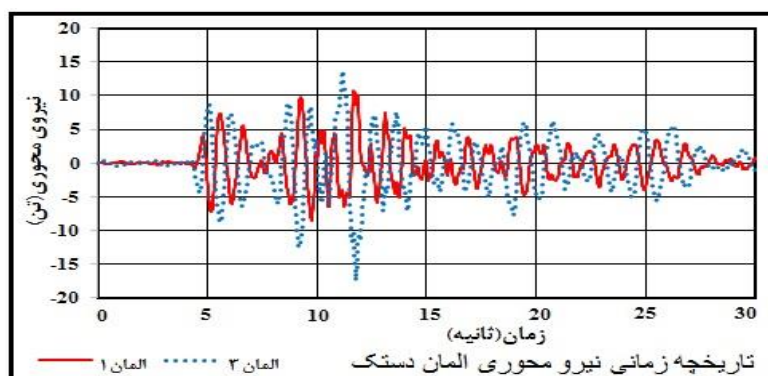


(ب)



(الف)

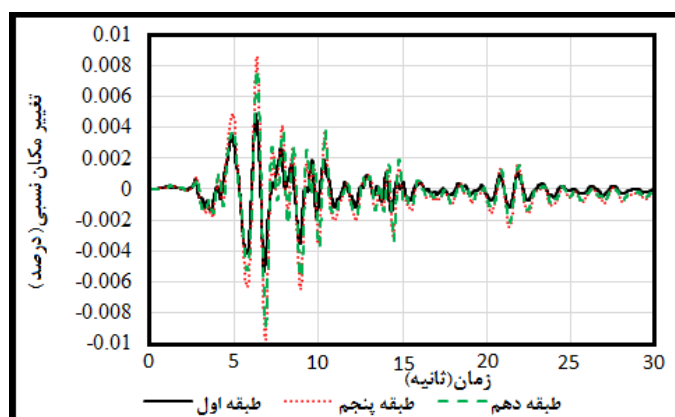
شکل ۱۱: تاریخچه زمانی تغییر مکان بالاترین تراز ارتفاعی (طبقه ۱۰) در محل مرکز جرم Cm و متناظر با راستای Y پلان؛ (الف) سیستم ترکیبی قاب صلب - مهاربند واگرا (مدل ۱)، (ب) سیستم ترکیبی قاب صلب - مهاربند واگرای دستک‌دار (مدل ۲).



شکل ۱۲: تاریخچه زمانی نیروی محوری المان دستک در سازه مطالعاتی (مدل ۲) برای المان‌های ۱ و ۳، (شکل ۳ - پ).

شکل ۱۲ تاریخچه زمانی نیروی محوری المان دستک در مدل مطالعاتی دارای مهاربند واگرا با دستک سخت‌کننده (شکل ۳-پ) تحت رکورد طبس را نشان می‌دهد. نمودار فوق برای المان‌های دستک متصل به مهاربندهای شماره ۱ و ۳ در طبقه اول و قاب AB از سازه مطالعاتی ترسیم شده است. ملاحظه می‌شود که به المان‌های دستک موجود در مدل مطالعاتی در زمان‌های مختلف، نیروی محوری قابل ملاحظه‌ای وارد می‌شود. به‌طور مثال بیشترین نیروی محوری وارد شده به المان دستک شماره ۳ تحت رکورد طبس مقداری در حدود ۱۷/۵ تن است.

نمودار تاریخچه زمانی دررفت طبقات اول، پنجم و دهم سازه مطالعاتی مهاربند واگرای دستک‌دار (مدل ۲) تحت رکورد نیرومند LGP در شکل ۱۳ نمایش داده شده است. نمودارهای مذکور مربوط به مرکز جرم CM طبقات سازه در جهت ۷ هستند. همان‌طور که در نمودارهای پوش بیشینه دررفت طبقات سازه‌ها ملاحظه شد، بیشترین تغییر مکان نسبی در طبقات میانی سازه ایجاد می‌شود. همچنین از دیدگاه تاریخچه زمانی نیز در شکل ۱۳ بیشترین مقدار دررفت در طبقه پنجم رخ داده است. شایان توجه است که دررفت ماندگار طبقات می‌تواند به‌عنوان معیار مناسبی جهت ارزیابی میزان خسارت وارده بر سازه تحت اثر جنبش اصلی تعیین گردد. تاریخچه‌های زمانی پارامتر دررفت در شکل ۱۳، نشان می‌دهند که در هیچ یک از طبقات سازه با مهاربندی واگرای دستک‌دار، تغییر شکل‌های ماندگار پدیدار نمی‌گردد.



شکل ۱۳: نمودار تاریخچه زمانی دررفت طبقات اول، پنجم و دهم در محل مرکز جرم CM سازه قاب صلب - مهاربند واگرای دستک‌دار (مدل ۲).

## ۶- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، یک بررسی بر روی مشخصات جنبش‌های پالس‌گونه و بسیار نیرومند زمین در حوزه نزدیک گسل و همچنین تحلیل تأثیرات آن بر رفتار لرزه‌ای سازه‌های ۱۰ طبقه با ساختار مقاوم دوگانه صورت گرفت. مدل‌های مطالعاتی دارای اسکلت مقاوم دوگانه به‌صورت پیکربندی قاب صلب- پانل‌های مهاربندی واگرا، همچنین قاب صلب- ساختار ترکیبی پانل‌های مهاربندی پیوسته با المان‌های دستک سخت‌کننده در نظر گرفته شد. پارامترهای پاسخ مورد بررسی در این مطالعه شامل بیشینه برش پایه سازه و شتاب مطلق، سرعت نسبی، تغییر مکان جانبی، بیشینه دررفت طبقات و نیز تاریخچه زمانی این پارامتر پاسخ، تاریخچه زمانی تغییر مکان جانبی بالاترین تراز ارتفاعی، تاریخچه زمانی نیروی محوری المان دستک و پوش نیروی محوری المان‌های انتخابی ستون در اسکلت مقاوم می‌باشند. نتایج پژوهش به شرح زیر است:

۱- پدیدار شدن ساختارهای پالس‌گونه در تاریخچه زمانی رکورد یک جنبش نیرومند زمین در حوزه نزدیک گسل‌های فعال، باعث ورود یک حجم عظیم انرژی جنبشی به سیستم سازه‌ای ساختمان می‌شود. بازه زمانی اعمال شدن انرژی مذکور نیز هماهنگ با پیروید پالس بزرگ سرعت رکورد زلزله است. رکوردهای حوزه نزدیک انتخابی حاوی اسپایک‌های بزرگ و پرنانرژی شتاب و نیز پالس‌های پیوسته و پر-

دامنه سرعت می‌باشند. ویژگی‌های فوق در تاریخچه زمانی هر دو مؤلفه LN و TR وجود دارند.

۲- در این پژوهش ملاحظه گردید که به‌ویژه پس از گذر از نخستین نقطه اوج پالس‌های بزرگ سرعت، یک روند مشخص شکل‌گیری و گسترش مؤلفه‌های غیرخطی با دامنه به نسبت بزرگ پدیدار می‌شود. نمود مشخص این نکته در نمودارهای تاریخچه زمانی تغییرمکان بام (بالاترین تراز ارتفاعی) و همین‌طور تاریخچه زمانی دریافت طبقات سازه مطالعاتی مشاهده می‌شود.

۳- با توجه به نتایج این پژوهش، ملاحظه شد که افزودن المان دستک سبب کاهش نسبی مقادیر پوش بیشینه دریافت تحت رکوردهای حوزه نزدیک گردید. همچنین برای مثال، مقدار این پارامتر با افزودن دستک برای رکورد JFP از ۰/۲۶ به ۰/۱۵ رسید که یک کاهش ۴۲ درصدی را نشان می‌دهد.

۴- ملاحظه شد که افزودن المان دستک سخت شده، سبب کاهش مقادیر بیشینه تغییر مکان بام (بالاترین تراز ارتفاعی) می‌گردد. این کاهش برای دامنه تغییرات پارامتر یاد شده در کلیه طبقات سازه رخ داده و روند آن در طبقات بالاتر نیز افزایشی است. دامنه کاهش تا ۲۰ درصد نیز حاصل گردید.

۵- بر اساس نتایج این پژوهش، کاربرد المان‌های دستک در پانل‌های مهاربندی واگرا علاوه بر ایجاد کاهش نسبی در دامنه رفتار غیرخطی، نمود مشخصی نیز در روند عمومی کم شدن سایر پارامترهای اساسی پاسخ لرزه‌ای سازه دارد. عملکرد لرزه‌ای سازه دارای پانل‌های مهاربندی واگرای دستک‌دار نسبت به مدل دیگر، منجر به تغییر مکان‌های نسبی کوچک‌تر طبقات به‌ویژه تحت رکوردهای نیرومند حوزه نزدیک می‌شود. این مقوله درباره رکوردهای حوزه دور چندان قابل‌توجه نیست. همچنین کاربرد المان‌های سخت‌کننده (دستک) در پیکربندی پانل مهاربندی واگرا، موجب توزیع یکنواخت‌تر برای هر دو پارامتر نیاز دریافت و تغییرمکان جانبی خواهد شد.

## مراجع

- [1] Bosco, M., Ghersi, A., Marino, E.M., & Rossi, P.P. (2013). "Prediction of the seismic response of steel frames with concentric diagonal bracings". *The Open Construction and Building Technology Journal*, 7, 118-128.
- [2] Binder, J., & Christopoulos, C. (2018). "Seismic performance of hybrid ductile-rocking braced frame system". *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, DOI: 10.1002/eqe.3022
- [3] Vaseghi Amiri, J., Esmailnia Amiri, M., & Ganjavi B. (2016). "Ductility reduction factor for zipper-braced frames". *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, <http://dx.doi.org/10.1080/19648189.2016.1262283>
- [4] Sehhati, R., Rodriguez-Marek, A., ElGawady, M., & Cofer W.F. (2011). "Effects of near-fault ground motions and equivalent pulses on multi-story structures", *Engineering Structures*, 33, 767-779.
- [5] Nassania, D.E., Hussein, A., & Mohammed, A. (2017). "Comparative response assessment of steel frames with different bracing systems under seismic effect", *Structures (Elsevier)*, 11, 229-242.
- [6] Durucan, C., & Durucan, R.A. (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*, 89, 163-170.
- [7] Puglia, R., Russo, E., Luzi, L., D'Amico, M., Felicetta, C., Pacor, F., & Lanzano, G. (2018). "Strong-motion processing service: a tool to access and analyse earthquakes strong-motion waveforms", *Bulletin of Earthquake Engineering (Springer)*, <https://doi.org/10.1007/s10518-017-0299-z>
- [8] Yang, D., Zhang, C., & Liu, Y. (2015). "Multi-fractal characteristic analysis of near-fault earthquake ground motions", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 72, 12-23.
- [9] Kim, J., & Choi, H. (2005). "Response modification factors of chevron-braced frames", *Engineering Structures*, 27, 285-300.
- [10] Sultana, P., & Youssef, A.M. (2016). "Prediction of local seismic damage in steel moment resisting frames", *Journal of Constructional Steel Research*, 122, 122-137
- [11] Yang, D., & Zhou, J. (2015). "A stochastic model and synthesis for near-fault impulsive ground motions", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 44, 243-264



- [12] Raghunandan, M., & Liel, B. (2013). "Effect of ground motion duration on earthquake-induced structural collapse", *Structural Safety*, 41, 119-133.
- [13] Burks, S.L., & Baker, W.J. (2016). "A predictive model for fling-step in near-fault ground motions based on recordings and simulations", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 80, 119-126.
- [14] Trifunac, M.D., & Todorovska, M.I. (2013). "A note on energy of strong ground motion during Northridge, California, earthquake of January 17, 1994", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 47, 175-184.
- [15] Narayan, S., Shrimali, M.K., Bharti, S.D., & Datta, T.K. (2018). "Collapse of damaged steel building frames because of earthquakes", *Journal of Performance of Constructed Facilities (ASCE)*, 32(1), DOI:10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0001125.
- [16] Nazari, S., Keyvani, J., Meshkat-Dini, A., & Azhdarifar, M. (2017). "Study on the seismic response of mid-rise bundled tube resistant systems under simulated closed form near-field records", *Asian Journal of Civil Engineering*, 18(6), 961-976.
- [17] Vahdani, R., Gerami, M., and Razi, M. (2017). "Seismic vulnerability assessment of steel moment-resisting frames based on local damage", *Journal of Earthquake and Tsunami*, 12(1), DOI:10.1142/S1793431117500166.
- [18] National Building Regulations Office, Ministry of Roads and Urban Development; (2014). "Iranian National Building Code: Design Loads for Buildings- Divisio 6", The 3rd Edition, Tehran: Road, Housing and Urban Development Research Center.
- [19] 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", The 4th Edition, Tehran: Road, Housing and Urban Development Research Center.
- [20] National Building Regulations Office, Ministry of Roads and Urban Development; (2014). "Iranian National Building Code: Design and Construction of Steel Structures – Division 10", The 4th Edition, Tehran: Road, Housing and Urban Development Research Center.
- [21] Kiaeinejad, S. (2018). *The effect of strength reduction factor on seismic response of dual structures comprising of zipper EBF panels under directivity pulses*, MSc. Thesis, Kharazmi University.
- [22] Federal Energy Management Agency (FEMA), (1998). *Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings: Fema 356: Createspace Independent Publication.*
- [23] Khazaei-Rad, P., Mortazavi S.A., & Meshkat-Dini, A. (2017). "Analytical aspects of velocity pulses on seismic behaviour of mid-rise compound skeleton of steel moment frame and eccentrically braced panels", *Journal of Structural and Construction Engineering (JSCE)*, Iranian Society of Structural Engineering (ISSE), Tehran, Iran, (Accepted).
- [24] Rio, G., Soive, A., & Grolleau, V. (2005). "Comparative study of numerical explicit time integration algorithms", *Advances in Engineering Software*, 36(4) , 252-265
- [25] Computers and Structures Inc. (2010). *SAP2000, Structural Analysis Program*, Berkeley.
- [26] Rahimi, R., Banan, Mo.R., & Banan, Ma.R. (2016). "Lateral cyclic behavior of zipper braced frames-considering connection details", *International Journal of Steel Structures*, 16(1), 11-21.
- [27] Mahmoudi, M., & Zaree, M. (2013). "Performance based design using force reduction factor and displacement amplification factors for BFS", *Asian Journal of Civil Engineering (BHRC)*, 14(4), 577-586.
- [28] Banihashemi, M.R., Mirzagoltabar, A.R., & Tavakoli, H.R. (2015). "Performance-based plastic design method for steel concentric braced frames", *International Journal of Advanced Structural Engineering*, 7, 281-293.