

## مقایسه تحلیلی عملکرد لرزه‌ای قاب خمشی دسته شده و قاب خمشی ترکیبی میان مرتبه

در این پژوهش به بررسی عملکرد لرزه‌ای قاب‌های خمشی میان‌مرتبه تحت رکوردهای حوزه نزدیک مقیاس شده، با استفاده از تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی تاریخچه زمانی (NTHA) و افزایشی (IDA) پرداخته شده است. همچنین تبیین مختصر این مفهوم نیز از دیدگاه تشکیل مفاصل غیرخطی براساس تحلیل پوش‌آور مودال (MPA) آزموده شده است. ماهیت انتشار سه‌بعدی امواج لرزه‌ای ناشی از رکوردهای زلزله در اسکلت مقاوم سازه، سبب ایجاد نیروهای دینامیکی با دامنه مختلف خواهد شد. وجود و اعمال رکوردهای نیرومند حوزه نزدیک می‌تواند سبب بزرگی و افزایش شدت تأثیرگذاری نیروهای یاد شده گردد. دو سازه مطالعاتی در این تحقیق، با اسکلت قاب خمشی دسته شده (Bundled Tube) و قاب خمشی ترکیبی (3DFrame) می‌باشند. پارامترهای پاسخ مورد بررسی، عبارت از پوش بیشینه دررفت طبقات، بیشینه شتاب طبقات، تاریخچه زمانی دررفت و آرایش مفاصل غیرخطی می‌باشند. همچنین منحنی‌های IDA متناظر با پارامتر دررفت تحت چند رکورد حوزه نزدیک ترسیم شده است. عملکرد لرزه‌ای سازه‌های مطالعاتی، مورد مقایسه و بررسی قرار گرفته است.

**واژگان کلیدی:** دینامیک غیرخطی، تحلیل IDA، تحلیل MPA، قاب خمشی دسته شده، قاب خمشی ترکیبی، زلزله حوزه نزدیک، رفتار لرزه‌ای.

### وحیده شیروانی

کارشناسی ارشد مهندسی  
عمران- زلزله، دانشگاه خوارزمی.  
پست الکترونیک:  
vahide.shirvani92@gmail.com

### افشین مشکوه‌الدینی\*

استادیار، دانشکده فنی و  
مهندسی، دانشگاه خوارزمی.  
پست الکترونیک:  
meshkat@khu.ac.ir

### علی معصومی

استاد، دانشکده فنی و مهندسی،  
دانشگاه خوارزمی.  
پست الکترونیک:  
massumi@khu.ac.ir

### ۱- مقدمه

روش IDA برای تخمین پاسخ دینامیکی و ظرفیت پانل‌های مقاوم اسکلت‌های قاب پایه، نه فقط در ناحیه الاستیک بلکه در حوزه غیرخطی حتی در مواقعی که شکست در اتصال رخ دهد یا وضعیت ایجاد طبقه نرم برقرار شود، نیز استفاده می‌شود. فرایند این روش، نیازمند بکارگیری تعدادی رکورد زلزله و انجام تحلیل تاریخچه زمانی دینامیکی غیرخطی بر روی سازه می‌باشد. بارگذاری دینامیکی اعمالی نیز دارای ماهیت فزاینده است. روش IDA دارای ساختاری پویا بوده و روند محاسباتی آن نسبت به مشخصات فیزیکی رکوردهای زلزله، حساسیت زیادی دارد [۱]. ساختار روش تحلیل استاتیکی غیرخطی پوش‌آور مودال (MPA<sup>۲</sup>) به‌گونه‌ای است که فرض

آنالیز دینامیکی فزاینده (IDA<sup>۱</sup>) یک روش تحلیل پارامتری است که در سالیان اخیر در اشکال مختلف برای تخمین عملکرد سازه تحت بارهای لرزه‌ای مورد استفاده قرار گرفته است. ساختار تحلیلی این روش، مدل سازه را تحت یک یا چند رکورد زلزله قرار می‌دهد که هرکدام به چندین مرحله شدت، مقیاس شده‌اند. بنابراین قابلیت ترسیم یک یا چند منحنی پاسخ پارامتری و نسبی شده سازه به ازای تغییرات شدت زلزله وجود خواهد داشت.

\* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۷/۰۲/۰۵، بازنگری ۱۳۹۷/۰۵/۰۳، پذیرش ۱۳۹۷/۰۵/۰۳.

(DOI): 10.22091/cer.2018.3119.1116 شناسه دیجیتال

2- Modal Pushover Analysis

1- Incremental Dynamic Analysis

المان‌های پیرامونی تیر و ستون این سیستم سازه‌ای نسبت به قاب محیطی منفرد می‌گردد و به تناسب آن نیز اثرات لنگی برش را کاهش می‌دهد [۴-۶].

نکته دیگر آنکه ممکن است تحت یک بارگذاری متناظر، دو سازه با پارامتر سختی یکسان و پیکره هندسی متفاوت، دارای عملکرد لرزه‌ای همانند نباشند. به بیان دیگر، یکی از سازه‌ها می‌تواند دچار فروریزش شود، در حالی که در سازه دیگر با وجود خرابی‌های رخ داده، وضعیت فروریزش صورت نگیرد. علت فروپاشی سازه مذکور نیز می‌تواند به گسترش خرابی‌های محلی اولیه در اثر تنش خستگی در المان‌های اسکلت مقاوم نسبت داده شود. قاب‌های خمشی فولادی به دلیل دارا بودن قابلیت عملکرد لرزه‌ای بالا، به صورت گسترده‌ای به عنوان سیستم مقاومت جانبی مورد استفاده قرار می‌گیرند. عملکرد لرزه‌ای قاب‌های خمشی به طور عمده، تحت تأثیر شکل‌پذیری و ظرفیت اتلاف انرژی اتصالات آن می‌باشد [۷ و ۸].

ساختار این پژوهش، شامل انجام فرایند تحلیل‌های غیرخطی تاریخچه زمانی تحت رکوردهای نیرومند حوزه نزدیک مقیاس شده می‌باشد. همچنین چگونگی تغییرات پارامترهای پاسخ لرزه‌ای مانند پوش بیشینه دررفت و شتاب طبقات، تاریخچه زمانی دررفت مورد ارزیابی قرار گرفته است. سپس عملکرد سازه‌ها تحت رکوردهای اعمالی با تحلیل IDA مطالعه شده است. این مطالعه شامل یک ارزیابی مقایسه‌ای برای تشکیل مفاصل غیرخطی بر پایه نتایج تحلیل‌های MPA نیز می‌باشد.

## ۲- ویژگی‌های رکوردهای حوزه نزدیک

جنبش‌های قوی پالس‌گونه زمین می‌توانند همراه با حرکات یا گام پرتابی زمین<sup>۶</sup> تولید شوند. اثرات گام پرتابی زمین نیز بیشتر به شکل جابه‌جایی‌های دائمی مرتبط با صفحه گسیختگی در جهت موازی گسل مشاهده می‌شود.

می‌شود، پاسخ سازه تابعی از بارگذاری ترکیبی با مشارکت چند مود پایینی (با پریودهای بزرگ‌تر) می‌باشد. همچنین میزان تأثیرگذاری هر یک از مودهای ارتعاشی نیز بر حسب ضریب مشارکت محاسباتی تعیین می‌گردد. بدین ترتیب، آرایش و چیدمان بارگذاری جانبی نیز بر پایه اندازه و جهت نیروهای محاسباتی ناشی از جرم طبقات به دست می‌آید. بدیهی است که در روش MPA نمی‌توان ماهیت و اثرات ناشی از انتشار امواج زلزله در سازه را در نظر گرفت [۲].

در این پژوهش، از رکوردهای حوزه نزدیک برای بررسی عملکرد لرزه‌ای سازه‌ها استفاده شده است. جنبش‌های نیرومند زمین در حوزه نزدیک‌گسل در قالب بارگذاری‌های بسیار شدید دینامیکی، قادر به تحت تأثیر قرار دادن مشخصات اسکلت مقاوم سازه‌ها می‌باشند. از اینرو، ویژگی‌های بارگذاری زلزله و پارامترهای پاسخ لرزه‌ای سازه‌ها در ارتباط متقابل هستند [۳].

یکی از سیستم‌های مورد استفاده در ساختمان‌های میان‌مرتبه و بلند، اسکلت قاب خمشی محیطی<sup>۳</sup> است که می‌تواند کارایی و بهره‌وری خوبی در رفتار لرزه‌ای داشته باشد. سیستم سازه‌ای قاب خمشی محیطی به صورت یک لوله توخالی طراحی شده، به طوری که ستون‌ها در فواصل نزدیک به هم توسط شاه‌تیرهای عمیق متصل می‌باشند. چگونگی و تغییرات توزیع تنش محوری در اسکلت مقاوم قاب خمشی محیطی به صورت نامتقارن بوده و تحت اثرات لنگی برش<sup>۴</sup> است. برآیند تنش محوری دینامیکی در ستون‌های گوشه بیشتر از ستون‌های میانی است. طراحی و کاربرد اسکلت مقاوم قاب محیطی دسته شده<sup>۵</sup> به منظور کاهش اثرات ناشی از لنگی برش و افزایش پارامتر سختی مؤثر سازه صورت می‌گیرد. بدین ترتیب، امکان ایجاد فاصله بیشتر بین ستون‌ها فراهم می‌شود. وجود قاب‌های صلب داخلی باعث توزیع یکنواخت‌تر تنش محوری در

3- Framed Tube

4- Shear Lag

5- Bundled Tube

6- Fling Step

نتایج مطالعات لرزه‌شناسی نشان می‌دهد که در تاریخچه زمانی حرکات قوی زمین در حوزه نزدیک، گسل‌های فعال به‌خصوص در مورد آنهایی که تحت اثر فرایند گسیختگی امتداد لغز<sup>۱۰</sup> تولید شده‌اند، مؤلفه ثابت شده نرمال (مؤلفه TR)، به نسبت نیرومندتر از مؤلفه موازی صفحه شکست گسل (مؤلفه LN) می‌باشد. نمود این ویژگی برای مقایسه میان نسبت پارامترهای طیفی و نیز اندازه پالس‌های موجود در تاریخچه زمانی سرعت هر دو مؤلفه موازی و عمود بر صفحه شکست گسل، مربوط به رکورد اصلی و بسیار نیرومند زلزله‌های شهر بم و طبس ایران در شکل‌های ۱ و ۲ ثبت شده‌اند [۱۴].

زمین‌لرزه‌های مورد استفاده در این پژوهش و مشخصات طیفی آنها در جدول ۱ آورده شده است. رکوردهای انتخابی از این زلزله‌ها دارای اثر جهت‌داری پیشرونده هستند. تمامی رکوردها به‌صورت مقیاس شده و سه مؤلفه‌ای به مدل‌های مطالعاتی اعمال شده است. مؤلفه موازی با صفحه شکست گسل (مؤلفه LN) در راستای X، مؤلفه نیرومندتر عمود بر صفحه شکست گسل (مؤلفه TR) در راستای Y پلان سازه و مؤلفه قائم (مؤلفه UP) در جهت Z وارد گردیده‌اند.

#### ۴- توصیف مدل‌های مطالعاتی

هر دو مدل مطالعاتی این پژوهش، سازه‌های میان‌مرتبه فولادی با اسکلت مقاوم قاب خمشی ۱۰ طبقه هستند (شکل ۳). پلان سازه‌ها به‌صورت متقارن نسبت به هر دو معیار سختی و جرم بوده و چهار دهانه ۶ متری در دو جهت X و Y وجود دارند. تفاوت هندسی مدل‌های اول (قاب خمشی دسته شده) و دوم (قاب خمشی ترکیبی سه‌بعدی) در پیکربندی و آرایش ستون‌ها و شاه‌تیرهای اسکلت مقاوم است. همچنین مجموعه‌ای از اتصالات مفصلی و صلب در ساختار اسکلت مقاوم همراه با ماهیت

تأثیرات جنبش پرتابی زمین به‌وسیله پالس‌های سرعت دامنه بلند و یک‌طرفه مانند یک انحراف بزرگ در تاریخچه زمانی جابه‌جایی زمین، مشخص می‌شود [۹].

ساختار فیزیکی جنبش‌های نیرومند زمین در محدوده نزدیک گسل به‌طور فزاینده‌ای تحت تأثیر سازوکار شکست گسل، راستای انتشار شکست و گسیختگی نسبت به ساختگاه می‌باشد. حضور و اثرات عوامل فوق، پدیدار شدن فرایند جهت‌داری گسیختگی<sup>۷</sup> و حرکت پرتابی زمین را در پی خواهد داشت. فرایند جهت‌داری گسیختگی گسل، شامل دو اثر مشخص‌تر جهت‌داری نیرومند پیشرونده<sup>۸</sup> و جهت‌داری پسرونده<sup>۹</sup> است. مدت زمان دوام جنبش‌های نیرومند زمین در حین یک زلزله نیرومند، بر ایجاد دامنه تخریب در سازه تأثیر شگرف خواهد گذاشت [۱۰].

اثرات نیرومند فرایند جهت‌داری می‌تواند منجر به تولید پالس‌های پرتابی با پیوند و دامنه بزرگ شود. علاوه بر پالس‌های پیوند بلند، رکوردهای حوزه نزدیک در باند فرکانس‌های بالا نیز دارای محتوای انرژی قابل‌توجه هستند. پالس‌های سرعت به‌صورت رفت‌وبرگشتی و به‌طور همزمان در پیکره سازه منتشر می‌شوند. اسکلت مقاوم سازه باید جابه‌جایی‌های بزرگی را تحمل نموده و این امر نیز منجر به ایجاد نیاز شکل‌پذیری با دامنه زیاد و بروز احتمالی حالت شکست ترد خواهد شد [۱۱ و ۱۲].

#### ۳- رکوردهای مورد استفاده در این پژوهش

دقت ارزیابی پارامترهای عملکردی و مشخصات پاسخ لرزه‌ای به انتخاب مناسب رکوردها و مدل‌سازی دقیق المان‌های سازه‌ای وابسته است. همچنین انتخاب شتاب‌نگاشت‌ها، مقیاس‌گذاری و انطباق طیفی آنها تأثیر بسیار مهمی بر روی نتایج تحلیل رفتار سازه دارد [۱۳].

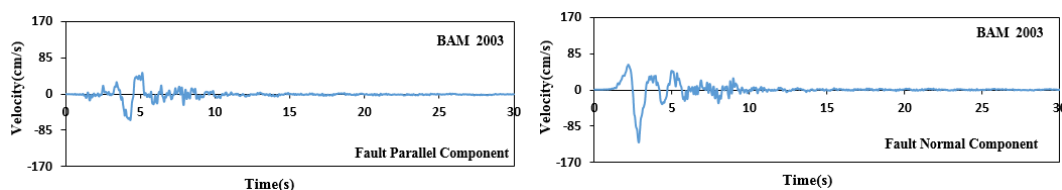
7- Rupture Directivity

8- Forward Directivity

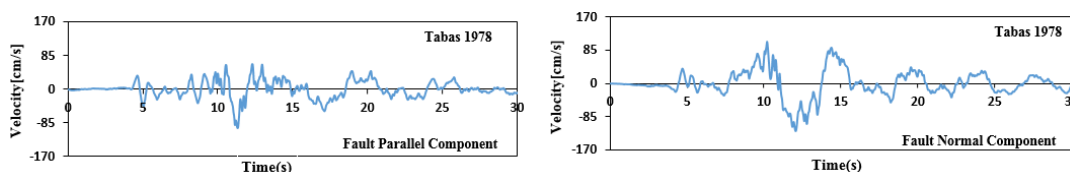
9- Backward Directivity

10- Strike Slip

تحلیلی تعریف شده در حوزه رفتار غیرخطی، لحاظ گردیده‌اند.



شکل ۱- تاریخچه زمانی سرعت هر دو مؤلفه موازی (مؤلفه LN) و عمود (مؤلفه TR) بر صفحه شکست گسل متناظر با رکورد اصلی زلزله بم ۲۰۰۳.



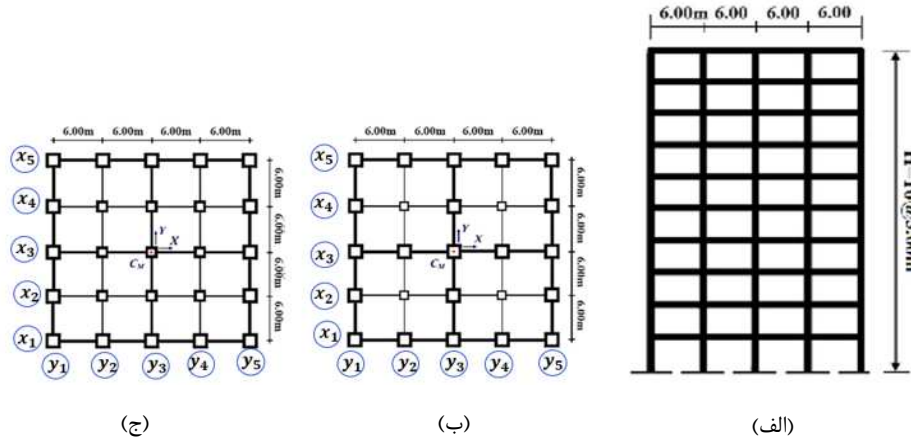
شکل ۲- تاریخچه زمانی سرعت هر دو مؤلفه موازی (مؤلفه LN) و عمود (مؤلفه TR) بر صفحه شکست گسل متناظر با رکورد اصلی زلزله طبس ۱۹۷۸.

جدول ۱- مشخصات طیفی شتاب نگاشت‌های انتخابی در این پژوهش

بزرگی زلزله (Mw)	حداکثر جابه‌جایی زمین (PGD) (cm)	حداکثر سرعت زمین (PGV) (cm/s)	حداکثر شتاب زمین (PGA) (g)	شتاب نگاشت زلزله	
				مؤلفه موازی صفحه شکست (LN)	مؤلفه عمود بر صفحه شکست (TR)
۶/۶	۲۰/۷	۵۹/۶	۰/۶۳۵	مؤلفه موازی صفحه شکست (LN)	Bam 2003 (BAM)
	۳۷/۴	۱۲۳/۷	۰/۷۹۳	مؤلفه عمود بر صفحه شکست (TR)	
	۱۰/۱۱	۳۷/۶۶	۰/۹۹۹	مؤلفه قائم رکورد (UP)	
۶/۹	۲۲/۷۸	۶۴/۳	۰/۴۹۶	مؤلفه موازی صفحه شکست (LN)	Erizacan 1992 (ERZ)
	۲۷/۳۵	۸۳/۹	۰/۵۱۵	مؤلفه عمود بر صفحه شکست (TR)	
	۷/۱۸۶	۱۸/۳	۰/۲۴۸	مؤلفه قائم رکورد (UP)	
۶/۷	۴۶/۹۹	۱۰۲/۸	۰/۸۹۷	مؤلفه موازی صفحه شکست (LN)	Northridge 1994 Newhall (NWH)
	۵۳/۴۷	۱۱۷/۴	۰/۶۱۲	مؤلفه عمود بر صفحه شکست (TR)	
	۲۵/۴۴	۳۴/۶	۰/۵۸۶	مؤلفه قائم رکورد (UP)	
۷/۴	۳۹/۹	۹۷/۷	۰/۸۳۶	مؤلفه موازی صفحه شکست (LN)	Tabas 1978 (TAB)
	۹۴/۵	۱۲۱/۳	۰/۸۵۱	مؤلفه عمود بر صفحه شکست (TR)	
	۱۷/۰	۴۵/۵	۰/۶۸۸	مؤلفه قائم رکورد (UP)	

پروژه در منطقه‌ای با پهنه‌بندی خطر نسبی زیاد فرض شده است. ضریب رفتار برای سازه‌های مطالعاتی (شکل ۳) با قابلیت شکل‌پذیری متوسط، برابر با ۵ لحاظ گردید. بارگذاری سازه‌ها بر پایه مبحث ششم مقررات ملی ساختمان صورت گرفته است [۱۵].

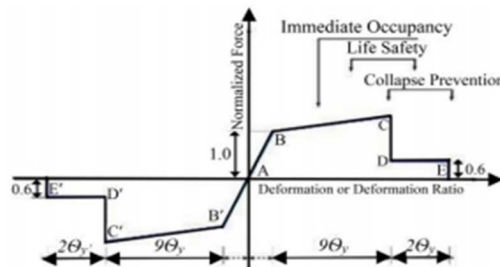
شکل ۳ نمایشگر سازه‌های مطالعاتی است که در آن خطوط پیرنگ، نمایش دهنده محور قاب‌های خمشی بوده و خطوط نازک نیز نشان دهنده قاب‌های دارای اتصالات مفصل می‌باشند. اتصالات مفصل، تنها در بخش داخلی چهار سلول سازه قاب خمشی دسته شده وجود دارد.



شکل ۳- نما و پلان سازه‌های مطالعاتی با اسکلت مقاوم میان‌مرتبه؛ (الف) پیکربندی نمای سازه؛ (ب) اسکلت مقاوم قاب خمشی دسته شده (مدل ۱)؛ (پ) اسکلت مقاوم قاب خمشی ترکیبی (مدل ۲) [۱۶]

همچنین برای مدل‌سازی سازه‌های مطالعاتی و توصیف رفتار غیرخطی المان‌های تیر و ستون، به ترتیب از مفصل M (خمشی) و نیز مفاصل غیرخطی P-M-M (اندرکنش نیروی محوری و لنگر خمشی) براساس توصیه‌ها و ضوابط دو گزارش FEMA356 و FEMA440 استفاده شده است [۱۸ و ۱۹]. ساختار تحلیلی رفتار غیرخطی مفاصل فوق در شکل ۴ ذکر شده است.

بارگذاری‌های مرده و زنده اعمالی برای طبقات به ترتیب برابر ۰/۵ و ۰/۲ و برای بام ۰/۵ و ۰/۱۵ تن بر مترمربع می‌باشد. مشخصات مقاطع و اعضا سازه براساس استاندارد ملی ساختمان ایران (مبحث دهم مقررات ملی ساختمان) طراحی شده و در فرایند طراحی آنها دو معیار محدودیت جابه‌جایی نسبی لرزه‌ای طبقات و رعایت اصل ستون قوی- تیر ضعیف در اتصالات نیز لحاظ گردیده است [۱۷].



شکل ۴- مدل مفاصل غیرخطی المان‌های تیر- ستون [۱۸]

به شتاب، دریفت ماکزیمم، محور عمودی نمایش‌گر ارتفاع نسبی سازه و محور افقی نیز نشان دهنده بیشینه شتاب و ماکزیمم دریفت لرزه‌ای طبقات می‌باشد. شکل‌های ۵ تا ۱۱، نمایش دهنده نمودارهای تغییرات پارامترهای پاسخ مذکور است. مجموعه تحلیل‌های غیرخطی دینامیکی توسط نرم افزار SAP2000 انجام گردید [۲۰].

همچنین در جدول ۲، پیروده سه مود اول ارتعاشی سازه‌ها آورده شده است. با توجه به بزرگ‌تر بودن پیروده نخستین موده‌های انتقالی متناظر با محورهای X و Y

## ۵- پارامترهای پاسخ لرزه‌ای غیرخطی

در این پژوهش، رفتار دینامیکی سازه‌های مطالعاتی تحت رکوردهای سه مؤلفه‌ای انتخابی، ارزیابی تحلیلی گردید. پارامترهای پاسخ سازه‌های مطالعاتی شامل بیشینه دریفت طبقه، بیشینه شتاب مطلق طبقات در محل مرکز جرم، تاریخچه زمانی دریفت بالاترین تراز سازه ( $Z=H$ ) و ساختار مفاصل غیرخطی تشکیل شده در اسکلت مقاوم می‌باشند [۱۷]. ملاحظه می‌شود که در نمودارهای مربوط

رکوردهای سه مؤلفه‌ای اعمال گردید. مقادیر ضرایب مقیاس در جدول ۳ آمده است [۲۱].

نسبت به پریود مود پیچشی، رفتار لرزه‌ای سازه مطالعاتی، بر پایه معیار عملکرد پیچشی سخت خواهد بود. ضرایب مقیاس محاسباتی براساس آیین‌نامه ۲۸۰۰ محاسبه و به

جدول ۲- پریود سه مود اول ارتعاشی سازه‌های مطالعاتی شکل ۳ (برحسب ثانیه)

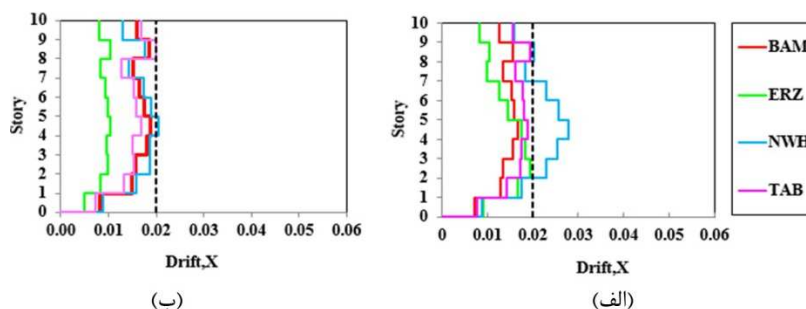
سیستم مقاوم باربر جانبی	مود انتقالی (راستای X)	مود انتقالی (راستای Y)	مود پیچشی (حول Z)
قاب خمشی ترکیبی	۱/۵۲	۱/۵۲	۱/۲۴
قاب خمشی دسته شده	۱/۸۰	۱/۸۰	۱/۳۳

جدول ۳- ضرایب مقیاس محاسباتی رکوردهای جدول ۱

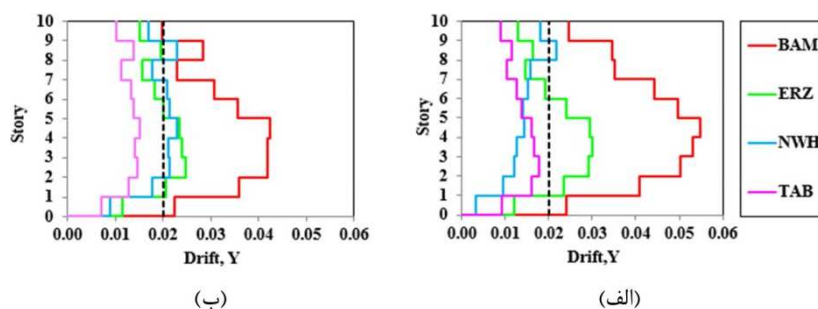
رکورد	BAM	TAB	ERZ	NWH
ضریب مقیاس (قاب خمشی ترکیبی)	۲/۲۴	۱/۶۷	۱/۶۵	۱/۷۳
ضریب مقیاس (قاب خمشی دسته شده)	۲/۲۴	۱/۶۶	۱/۳۵	۱/۶۵

همچنین عملکرد لرزه‌ای آن نسبت به سازه با اسکلت قاب خمشی دسته شده، بهتر می‌باشد. به عبارت دیگر، قابلیت شکل‌پذیری سازه قاب خمشی دسته شده نسبت به قاب خمشی ترکیبی بیشتر است. نکته دیگر آنکه بزرگی نسبی مقادیر دررفت نیز حاصل از تأثیرات رفتار موج‌گونه زمین تحت رکوردهای حوزه نزدیک با اثر جهت‌داری پیشرونده می‌باشد.

شکل‌های ۵ و ۶ نمایشگر تغییرات پوش بیشینه دررفت (تغییر مکان نسبی طبقات) هستند. سازه قاب خمشی ترکیبی، دامنه دررفت کمتری نسبت به سازه قاب خمشی دسته شده دارد. بروز این مشخصه براساس عملکرد خاص سیستم قاب خمشی دسته شده تحت زلزله‌های حوزه نزدیک می‌باشد. سازه با اسکلت قاب خمشی ترکیبی، هم دارای مقاومت بیشتری است و



شکل ۵- پوش بیشینه جابه‌جایی نسبی (دررفت) طبقات در راستای X پلان؛ (الف) سازه قاب خمشی دسته شده، (ب) سازه قاب خمشی ترکیبی.

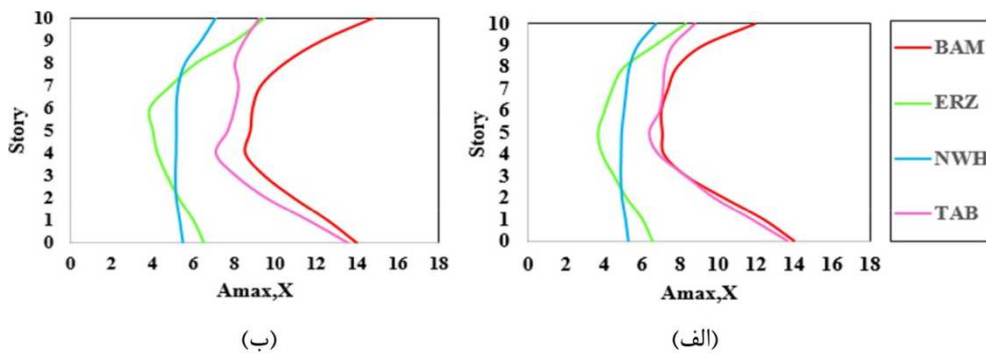


شکل ۶- پوش بیشینه جابه‌جایی نسبی (دررفت) طبقات در راستای Y پلان، (الف) سازه قاب خمشی دسته شده، (ب) سازه قاب خمشی ترکیبی

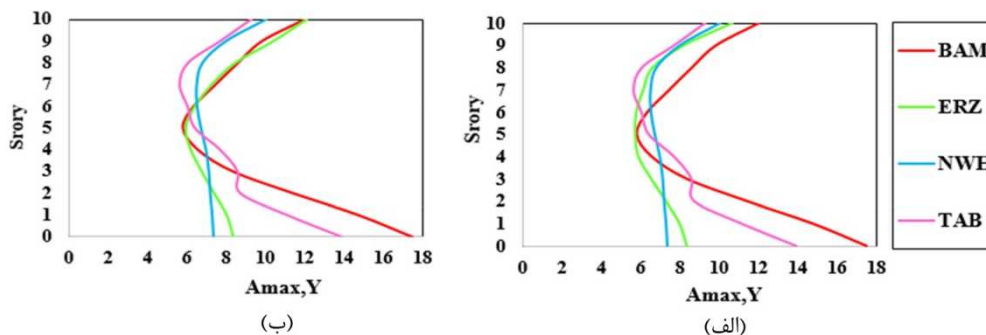
تاریخچه زمانی مؤلفه TR رکوردهای حوزه نزدیک انتخابی، حاوی ساختارهای موج‌گونه بزرگ‌تر و با دامنه بیشتر است. بنابراین پاسخ سازه‌ها در راستای Y که متناظر با مؤلفه TR رکوردهای اعمالی است، بزرگ‌تر می‌باشد. نمود این ویژگی در پاسخ دریافت سازه‌ها تحت رکورد بم در راستای Y قابل‌ملاحظه بوده و منجر به پاسخ‌های دریافت بزرگ‌تر از مقدار مجاز ۰/۰۲ شده است. دامنه تغییرات دریافت سازه‌ها در راستای X پلان، تحت این رکورد به نسبت کوچک‌تر می‌باشد.

اعمال ضرایب مقیاس سبب افزایش طیفی اندازه و دامنه اسپایک‌های شتاب و سرعت هر سه مؤلفه رکوردهای زلزله می‌گردد. بدین ترتیب، تأثیرات تحلیلی ناشی از بزرگ‌تر شدن پالس سرعت مقیاس شده، برای یک رکورد نیرومند حوزه نزدیک نیز به مراتب بیشتر

خواهد بود. همان‌طور که در شکل‌های ۷ و ۸ ملاحظه می‌شود، نمود تغییرات بیشینه شتاب مطلق طبقات نیز دارای دو روند کاهشی و افزایشی شدند. روند کاهشی در نیمه پایینی اسکلت مقاوم سازه رخ داده و روند افزایشی نیز در بخش بالایی آن صورت می‌پذیرد. دامنه به نسبت بزرگ تغییرات شتاب مطلق طبقات به دلیل وجود اثرات نیرومند جهت‌داری پیشرونده در ماهیت فیزیکی رکوردهای انتخابی و همچنین پدیدار شدن ساختار موج‌گونه در تاریخچه زمانی سرعت زمین است. نکته دیگر آنکه تحت اثر ضرایب مقیاس، بزرگی دامنه و محتوای انرژی جنبشی حمل شده توسط پالس و اسپایک‌های شتاب و سرعت، به‌ویژه برای هر دو مؤلفه افقی LN و TR به مراتب بیشتر خواهد شد.



شکل ۷- پوش شتاب مطلق طبقات در راستای X پلان برحسب  $m/s^2$ ؛ (الف) سازه قاب خمشی دسته شده، (ب) سازه قاب خمشی ترکیبی



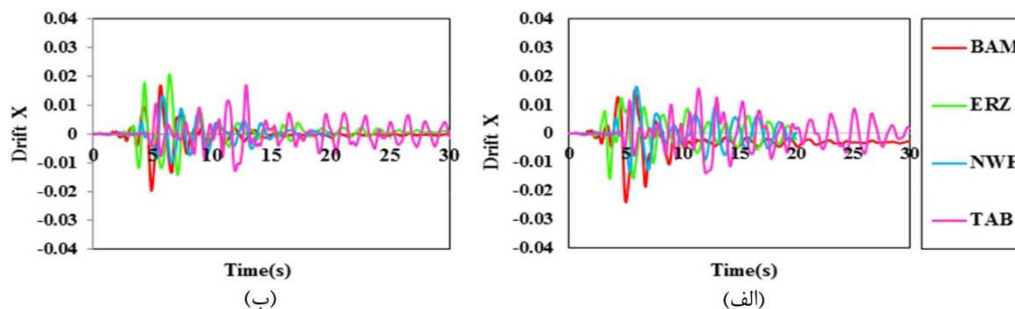
شکل ۸- پوش شتاب مطلق طبقات در راستای Y پلان برحسب  $m/s^2$ ؛ (الف) سازه قاب خمشی دسته شده، (ب) سازه قاب خمشی ترکیبی

خمش دسته شده، پس از گذر از پالس بزرگ موجود در تاریخچه زمانی سرعت رکورد مقیاس شده BAM (شکل ۱) دارای یک دامنه ماندگار برای ارتعاشات متناظر با

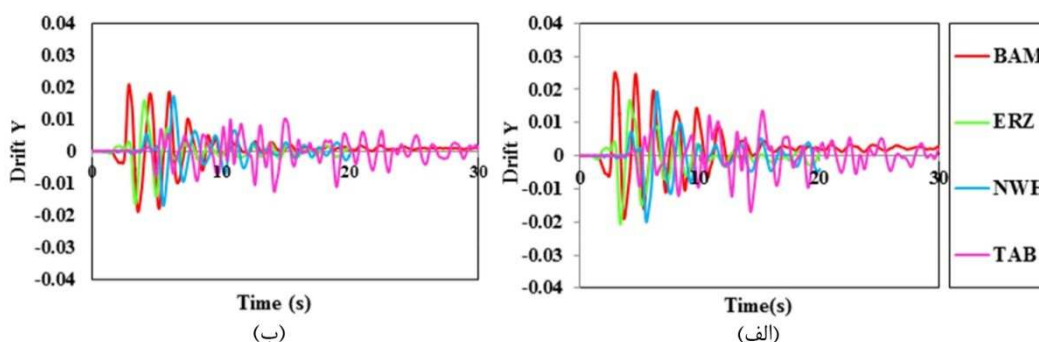
نمودارهای تاریخچه زمانی دریافت طبقه ۱۰م (Z=H) در شکل‌های ۹ و ۱۰ نشان داده شده‌اند. ملاحظه می‌شود که روند تغییرات دریافت سازه با پیکره قاب

رکوردهای مذکور ایجاد گردید.

راستاهای X و Y است. در این موارد، وضعیت عبور از سطح عملکرد آستانه فروریزش برای اسکلت مقاوم تحت



شکل ۹- تاریخچه زمانی پاسخ دررفت طبقه ۱۰ام در راستای X پلان؛ (الف) سازه قاب خمشی دسته شده، (ب) سازه قاب خمشی ترکیبی



شکل ۱۰- تاریخچه زمانی پاسخ دررفت طبقه ۱۰ام در راستای Y پلان؛ (الف) سازه قاب خمشی دسته شده، (ب) سازه قاب خمشی ترکیبی

در محور  $x_I$  پلان سازه‌های مطالعاتی (شکل ۳) تحت رکورد مقیاس شده طیس را با استفاده از نتایج تحلیل غیرخطی دینامیکی تاریخچه زمانی در ثانیه ۳۰ رکورد و نیز نتایج تحلیل غیرخطی مودال پوش‌آور نشان می‌دهد. تعریف سطوح عملکردی براساس FEMA356 می‌باشد. معیارسازی تغییرمکان هدف و بارگذاری جانبی در تحلیل غیرخطی مودال پوش‌آور نیز براساس روابط کلاسیک این روش صورت گرفته است [۱۹].

آرایش مفاصل پلاستیک تشکیل شده با استفاده از تحلیل غیرخطی دینامیکی تاریخچه زمانی در سازه قاب خمشی ترکیبی، نشان دهنده عملکرد مطلوب آن تحت اثر پالس‌های سرعت پر دامنه و نیرومند رکورد طیس است. بیشتر مفاصل غیرخطی در شاه‌تیرها تشکیل شده و عملکرد عمومی سازه براساس نتایج تحلیل غیرخطی مودال پوش‌آور در مراتب پایین‌تر از سطح ایمنی جانی بوده و نیز بر پایه نتایج تحلیل غیرخطی دینامیکی

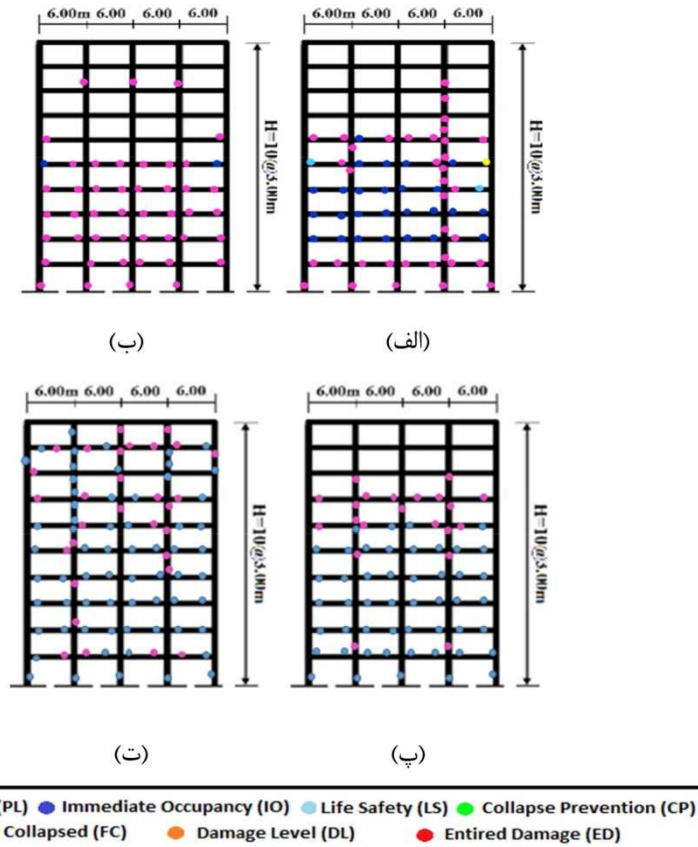
تاریخچه زمانی پاسخ دررفت طبقه ۱۰ام سازه قاب خمشی دسته شده، مقادیر بیشتری نسبت به سازه مطالعاتی دیگر دارد. همچنین تحت رکوردهای مقیاس شده، یک روند تشکیل و گسترش مؤلفه‌های غیرخطی بزرگ در هر دو سازه پدیدار گردید. بدین ترتیب، وضعیت تدریجی کاهش سختی و زوال مقاومت، همراه با نرم شدن اسکلت مقاوم (به دلیل ایجاد و گسترش مفاصل غیرخطی) برقرار شد. همچنین با توجه به نیرومند بودن رکوردهای حوزه نزدیک انتخابی و نیز تأثیر اعمال ضرایب مقیاس، وجود این دامنه‌های عددی قابل پیش‌بینی است.

ساختار نتایج این پژوهش بیانگر آن است که سازه قاب خمشی ترکیبی تحت اثر رکوردهای مقیاس شده، دیرتر به وضعیت محتمل ناپایداری دینامیکی رسیده و ماهیت شکل‌پذیری این سازه نسبت به سازه قاب خمشی دسته شده کمتر می‌باشد. شکل ۱۱ ساختار و آرایش مفاصل غیرخطی تشکیل شده در پیکره قاب صلب واقع



مقاوم نیز با توجه نتایج تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی، تراز رفتاری ایمنی جانی و بالاتر از آن هم بوجود آمده است. شکل‌گیری ساختار مذکور در این سازه، پس از گذر از پیک پالس سرعت بوده و دامنه رفتاری وارد مرحله غیرخطی هندسی-مادی شده است.

تاریخچه زمانی تا حدودی فراتر از سطح خدمت‌پذیری بدون وقفه، رفته است. همچنین دیده شد که بیشترین جابه‌جایی نسبی جانبی (دریفت) در طبقات میانی سازه قاب خمشی دسته شده رخ می‌دهد. دامنه عملکرد بسیاری از شاه‌تیرها در محدوده فراتر از خدمت‌پذیری بدون وقفه قرار گرفته و در پاره‌ای از المان‌های اسکلت



شکل ۱۱- مفصل غیرخطی تشکیل شده در پیکره قاب صلب محور  $X_1$  پلان سازه‌های مطالعاتی براساس نتایج تحلیل‌های غیرخطی؛ (الف) قاب خمشی دسته شده در ثانیه ۳۰ رکورد طیس با روش تحلیل تاریخچه زمانی، (ب) قاب خمشی ترکیبی در ثانیه ۳۰ رکورد طیس با روش تحلیل تاریخچه زمانی، (پ) قاب خمشی دسته شده با روش تحلیل مودال پوش‌آور، (ت) قاب خمشی ترکیبی با روش تحلیل مودال پوش‌آور

نیز در این موضوع تأثیرگذار است. همچنین در این خصوص، باید دقت داشت که نتایج به‌دست آمده از تحلیل دینامیکی فزاینده یک سازه، نمایش‌دهنده و توصیف‌کننده همه حالات رفتاری (الاستیک، پلاستیک و خرابی کامل) در حوزه تغییرشکل‌های گسترش‌یابنده از دامنه خطی به غیرخطی باشد [۲۲].

## ۶- تحلیل دینامیکی افزایشی

بر پایه مبانی تحلیلی آنالیز دینامیکی فزاینده (IDA)، اسکلت مقاوم سازه تحت یک یا چند رکورد زلزله قرار گرفته که هرکدام به چندین مرحله شدت مقیاس شده‌اند. بدین ترتیب، قابلیت ترسیم یک یا چند منحنی پاسخ پارامتری شده سازه به ازای تغییرات شدت رکورد اعمالی وجود خواهد داشت. ساختار فیزیکی و ماهیت طیفی رکوردهای انتخابی

معیار شدت خسارت، DM، یک کمیت اسکالر مثبت است که چگونگی پاسخ مدل سازه‌ای را تحت اثر بارگذاری لرزه‌ای بیان می‌کند. به عبارت دیگر، معیار شدت خسارت، کمیتی قابل محاسبه است که از خروجی تحلیل دینامیکی غیرخطی استخراج و نتیجه می‌شود. ماکزیمم برش پایه، چرخش‌های گرهی، تغییرمکان نسبی بین طبقه‌ای، تغییرمکان بام و یا تغییرشکل محوری المان‌ها می‌توانند به‌عنوان معیارهای شدت خسارت در نظر گرفته شوند.

انتخاب معیار شدت خسارت مناسب، بستگی به ماهیت کارکرد و ساختار رفتاری سازه دارد. به‌عنوان مثال، اگر نیاز به تشخیص خرابی در اجزای غیرسازه‌ای در یک اسکلت قاب صلب چند طبقه‌ای باشد، پارامتر بیشینه شتاب تراز کف، یک معیار است. همچنین پارامتر  $\theta_{max}$  نیز به‌عنوان معیار دوران بیشینه در ساختمان‌های با ساختار قاب خمشی، دارای ارتباط موضوعی با دامنه چرخش اتصالات صلب و نیمه صلب، حداکثر تغییرمکان نسبی بین طبقه‌ای و نیز تخریب‌های موضعی و کلی اسکلت مقاوم است. از اینرو، یک گزینه خوب برای توصیف معیار شدت خسارت می‌باشد [۲۳]. در این مطالعه، به منظور بازتاب هرچه بهتر رفتار و پاسخ غیرخطی سازه، از حداکثر تغییرمکان نسبی بین طبقه‌ای و ارتباط آن با  $\theta_{max}$  به‌عنوان معیار شدت خسارت (خرابی) در سازه استفاده شده است.

#### ۳-۶- نحوه مقیاس کردن شتاب نگاشت‌ها

شایان توجه است که برای انجام تحلیل‌های دینامیکی فزاینده، می‌بایست رکوردهای زلزله‌ای که از لحاظ پارامترهای لرزه‌ای مشابهت خوبی با مشخصات فیزیکی ساختگاه سازه داشته باشند، انتخاب گردند. جهت مقیاس‌گذاری معیار شدت لرزه‌ای نیز باید از یک روند مناسب استفاده کرد. بدین ترتیب، علاوه‌بر بهینه بودن تعداد چرخه‌های این فرآیند تحت هر رکورد زلزله و انجام تحلیل‌های IDA، روند محاسباتی نیز از دقت کافی جهت رسیدن به مقیاسی از شدت لرزه‌ای که باعث وقوع خرابی مورد نظر در سازه شود، برخوردار خواهد بود.

دو مقوله مهم در انجام تحلیل دینامیکی فزاینده، انتخاب یک معیار شدت ( $IM^{11}$ ) و یک معیار خسارت ( $DM^{12}$ ) مناسب است. مفهوم معیار شدت در راستای توصیف ماهیت فیزیکی یک رکورد زلزله (مقیاس شده) مطرح می‌گردد. معیار خسارت نیز برای نمایش دامنه تغییرات و اندازه پاسخ سازه به‌کار برده می‌شود. بر پایه انجام تحلیل دینامیکی فزاینده، امکان ارزیابی و برازش مقادیر مربوط به اندازه خسارت سازه‌ای در هر سطح (متناظر با هر مرحله از تحلیل غیرخطی) در برابر تغییرات اندازه شدت زلزله‌های مقیاس شده، حاصل خواهد شد.

#### ۱-۶- معیار شدت لرزه‌ای (IM)

شرط لازم برای انتخاب یک شدت لرزه‌ای مناسب، قابل مقیاس بودن آن است. پارامترهای زیادی برای سنجش شدت در دسترس هستند، در عین حال، برخی از آنها مانند مدت زمان جنبش شدید زمین و یا بازه زمانی اسپایک‌های شتاب و سرعت، قابل مقیاس کردن نمی‌باشند. در مقابل پارامترهایی چون بیشینه شتاب زمین ( $PGA^{13}$ )، بیشینه سرعت زمین ( $PGV^{14}$ ) و یا دامنه شتاب طیفی مود اول ( $Sa(T_1)^{15}$ )، قابلیت مقیاس شدن را دارند. همچنین انتخاب یک پارامتر شدت لرزه‌ای مناسب، علاوه‌بر اینکه باعث پراکندگی کمتر و در نتیجه عمومیت بیشتر پاسخ لرزه‌ای سازه تحت اثر رکوردهای زلزله می‌گردد، می‌بایست قابلیت توصیف ویژگی‌های طیفی یک رکورد مانند محتوای فرکانسی و انرژی را نیز دارا باشد. در این مطالعه، پارامتر PGA (بیشینه شتاب زمین) به‌عنوان معیار شدت لرزه‌ای در نظر گرفته شد.

#### ۲-۶- معیار شدت خسارت (DM)

11- Intensity Measure

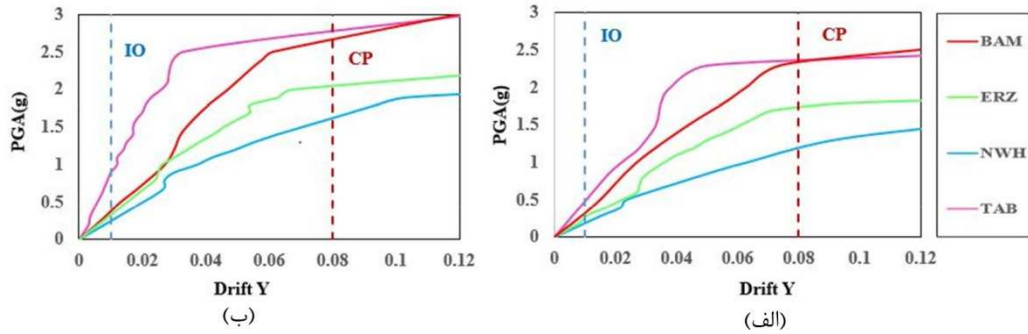
12- Damage Measure

13- Peak Ground Acceleration

14- Peak Ground Velocity

15- Spectral Acceleration

افزایش سطح لرزه‌ای تا جایی ادامه یافت که منحنی IDA تحت رکورد مورد نظر، هموار شد و سازه ناپایدار گردید [۲۳]. منحنی‌های IDA برای سازه‌های مطالعاتی تحت رکوردهای انتخابی (جدول ۱) در شکل ۱۲ ترسیم شده است.



شکل ۱۲- منحنی‌های IDA برای سازه‌های مطالعاتی ۱۰ طبقه؛ (الف) سازه قاب خمشی دسته شده، (ب) سازه قاب خمشی ترکیبی

در این پژوهش، معیار دوم برای حالت حدی آستانه فروریزش در نظر گرفته شد. در واقع محور عمود بر موقعیت دریافت ۰/۰۸ در شکل ۱۲، بیانگر ورود سازه به حالت حدی آستانه فروریزش می‌باشد. همچنین در حالت حدی GI وضعیت هندسی منحنی IDA به صورت نزدیک به هموار کامل است. متناظر با آن نیز هرگونه افزایش در معیار شدت منجر به پاسخ خسارت نامحدود می‌شود [۱۹].

همان‌طور که در شکل ۱۲، ملاحظه می‌شود شیب نمودارهای مربوط به سازه با اسکلت قاب خمشی ترکیبی (شکل ۳- پ) نسبت به قاب خمشی دسته شده (شکل ۳- ب) بیشتر می‌باشد. با توجه به نمودارهای پوش بیشینه دریافت در شکل‌های ۵ و ۶، ماهیت شکل‌پذیری قاب خمشی ترکیبی نسبت به قاب خمشی دسته شده کمتر است. بنابراین می‌توان دریافت که شیب عمومی منحنی‌های IDA متناظر با سازه قاب خمشی ترکیبی (با ماهیت شکل‌پذیری کمتر) از افزایش نسبی در مقایسه با سازه دیگر برخوردار است.

همچنین تحت رکوردهای اعمالی، سازه قاب خمشی دسته شده در تراز متناظر با شتاب‌های کمتری نسبت به

در این مطالعه، در اولین گام جهت مقیاس نمودن معیار شدت لرزه‌ای، یک مقدار کوچک (۰/۱g) برای پارامتر شدت لرزه‌ای (ماکزیمم شتاب زمین) که توصیف‌کننده حصول پاسخ خطی سازه باشد، انتخاب گردید. روند این مقیاس‌گذاری در بخش‌های محاسباتی بعدی به صورت فزاینده با گام ۰/۱ g برای رکورد زلزله افزایش داده شد.

#### ۴-۶- معرفی حالت‌های محدود منحنی IDA

به منظور انجام محاسبات عملکردی سازه‌ها، حالت‌های حدی در منحنی IDA تعریف شدند. سه حالت حدی پایه با نام‌های استفاده بی‌وقفه (IO<sup>۱۶</sup>)، آستانه فروریزش (CP<sup>۱۷</sup>) و ناپایداری کلی دینامیکی (GI<sup>۱۸</sup>) انتخاب شدند [۱۹] و [۲۴]. توضیح آنکه برای مدل‌های مورد مطالعه در این مقاله، حالت حدی استفاده بی‌وقفه طبق توصیه‌های Fema تعریف گردید. حالت حدی IO برای اسکلت‌های قاب خمشی با ضریب رفتار ۵ (R=5)، با پارامتر  $\theta_{max}=1\%$  تعریف شده است. برای نقطه آستانه فروریزش دو معیار زیر وجود دارد:

معیار ۱: شیب محلی منحنی IDA نباید کم‌تر از ۲۰ درصد شیب اولیه الاستیک باشد. اگر این شیب کم‌تر از ۲۰ درصد باشد از حالت CP تجاوز شده است.

معیار ۲: دامنه عددی  $\theta_{max}=80\%$  برای قاب‌های خمشی با شکل‌پذیری متوسط تعریف شده است.

16- Immediate Occupancy

17- Collapse Prevention

18- Global Dynamic Instability

برای سازه قاب خمشی دسته شده در حدود ۶۰٪ عدد متناظر در سازه قاب خمشی ترکیبی می‌باشد.

المان‌های ستون در سازه قاب خمشی ترکیبی تحت رکورد طبس، دارای نیروی محوری بزرگتری نسبت به سایر رکوردها می‌باشند. این امر را می‌توان به وجود دو پالس بزرگ و پردامنه سرعت در تاریخچه زمانی هر دو مؤلفه LN و TR این رکورد نسبت داد. نتایج این مطالعه، نشان می‌دهد که بیشتر ستون‌ها به‌خصوص در سازه قاب خمشی دسته شده، در وضعیت نیرو- کنترل قرار گرفته‌اند. این حالت نیز در سطح عملکرد آستانه فروریزش رخ داده است.

سازه قاب خمشی ترکیبی، به آستانه فروریزش می‌رسد. با مقایسه مقادیر مختلف شتاب طیفی (SA) و نیاز متناظر آن در مدل‌های مطالعاتی می‌توان عملکرد به نسبت بهتر سازه ۱۰ طبقه با اسکلت قاب خمشی ترکیبی را دریافت نمود.

جداول ۴ و ۵، در برگیرنده بیشینه نیروی محوری ستون‌های ردیف محور ۵ هر دو سازه، تحت رکوردهای انتخابی و متناظر با سطح عملکرد آستانه فروریزش است. بیشینه نیروی محوری اکثر ستون‌ها در سازه قاب خمشی دسته شده نسبت به سازه دیگر، کمتر می‌باشد. جدول ۶، شامل میانگین نیروی محوری ستون‌های ردیف محور ۵ تحت رکوردهای انتخابی و متناظر با سطح عملکرد آستانه فروریزش است. ملاحظه می‌شود که اندازه این پارامتر

جدول ۴- بیشینه نیروی محوری ستون‌های ردیف ۵ و متناظر با سطح عملکرد آستانه فروریزش در سازه قاب خمشی ترکیبی (ton)

رکورد	$x_5 - y_5$	$x_4 - y_5$	$x_3 - y_5$	$x_2 - y_5$	$x_1 - y_5$
ERZ	۸۰۴/۴۱	۱۲۱۷/۰۴	۴۳۶/۱۰	۶۸۴/۷۷	۱۱۸۳/۹۷
NWH	۶۰۹/۵۳	۵۸۰/۴۸	۴۰۵/۵۸	۶۴۷/۵۷	۷۰۹/۸۴
BAM	۶۸۷/۷۸	۵۹۶/۱۰	۳۸۳/۴۰	۵۵۷/۷۹	۵۶۷/۰۰
TAB	۱۵۸۳/۵۸	۱۶۷۷/۳۷	۹۹۰/۱۸	۱۱۲۷/۹۶	۱۸۵۳/۴۰

جدول ۵- بیشینه نیروی محوری ستون‌های ردیف ۵ و متناظر با سطح عملکرد آستانه فروریزش در سازه قاب خمشی دسته شده (ton)

رکورد	$x_5 - y_5$	$x_4 - y_5$	$x_3 - y_5$	$x_2 - y_5$	$x_1 - y_5$
ERZ	۷۹۵/۳۸	۲۸۵/۸۵	۵۴۲/۱۶	۴۱۷/۰۲	۶۳۲/۲۹
NWH	۶۲۴/۲۰	۳۷۹/۱۵	۴۲۶/۱۳	۳۳۳/۱۷	۷۹۴/۲۸
BAM	۵۷۷/۶۰	۸۷۶/۷۳	۴۶۱/۳۱	۴۹۳/۰۰	۶۳۱/۶۷
TAB	۶۷۱/۷۰	۳۲۴/۷۰	۳۷۷/۱۵	۳۸۹/۱۰	۴۲۸/۸۰

جدول ۶- میانگین نیروی محوری ستون‌های ردیف ۵ و متناظر با سطح عملکرد آستانه فروریزش (ton)

سازه	میانگین نیروی محوری
قاب خمشی ترکیبی	۸۶۵/۱۹
قاب خمشی دسته شده	۵۲۳/۱۰

رکوردهای حوزه نزدیک حاوی اثرات جهت‌داری پیشرونده، می‌تواند سبب القای مقادیر بسیار زیاد انرژی جنبشی به پیکربندی و اسکلت مقاوم سازه شود. ویژگی‌های رفتار غیرخطی سازه‌ها تحت اینگونه

## ۷- نتیجه‌گیری

این پژوهش، شامل یک بررسی محاسباتی بر روی رفتار لرزه‌ای غیرخطی دو سازه میان‌مرتبه با پیکربندی قاب خمشی ترکیبی و نیز قاب خمشی دسته شده است. وجود پالس‌های پردامنه و بلند پریود در تاریخچه زمانی

درصد برای اختلاف میان بیشینه مطلق دریافت در راستای Y پلان سازه قاب خمشی دسته شده نسبت به سازه دیگر تحت رکوردهای حوزه نزدیک مشاهده می‌شود. مقدار متوسط این اختلاف برای راستای X پلان سازه‌ها نیز کمتر از ۵ درصد می‌باشد.

مقایسه نمودارهای IDA ترسیم شده برای دو سازه مطالعاتی نشان می‌دهد که شیب منحنی‌های متناظر با سازه قاب خمشی ترکیبی نسبت به قاب خمشی دسته شده، کمی بیشتر می‌باشد. همچنین تحت رکوردهای اعمالی، سازه قاب خمشی دسته شده در شتاب‌های کمتری نسبت به سازه قاب خمشی ترکیبی، به آستانه فروریزش می‌رسد. یک دامنه تفاوت میانگین در حدود ۱۵ درصد ملاحظه می‌شود. با مقایسه مقادیر مختلف ماکزیمم شتاب زمین شتاب (PGA) و نیاز متناظر آن در مدل‌های مطالعاتی، می‌توان عملکرد بهتر سازه با اسکلت قاب خمشی ترکیبی را ملاحظه نمود. نتایج این تحقیق نشان داد که سازه با اسکلت قاب خمشی دسته شده نسبت به سازه با اسکلت قاب خمشی ترکیبی دارای قابلیت کمتر حفظ پایداری دینامیکی است.

بارگذاری‌های بسیار شدید دینامیکی، در شکل کاهش مؤلفه‌های سختی و افزایش سریع زوال مقاومت است.

پارامترهای پاسخ لرزه‌ای در حوزه تغییرشکل‌های بزرگ با نمود شدید غیرخطی هندسی-مادی، به‌ویژه با گذر از اوج پالس سرعت و در طی آزاد شدن مقادیر زیاد انرژی جنبشی رکورد خواهند بود. بدین ترتیب، ساختار رفتاری اسکلت مقاوم نیز با یک روند افزایشی نرم شدن و کاهش سختی، تشکیل و گسترش سریع دامنه حوزه‌های غیرخطی همراه است. دامنه‌های ماندگار برای تغییرمکان و دریافت جانبی، همراه با حاکمیت وضعیت نیرو-کنترل برای بخشی از اسکلت مقاوم ایجاد خواهد شد.

مشخصات رفتاری فوق، به‌ویژه تحت رکورد مقیاس شده BAM که حاوی دو پالس بزرگ سرعت است، به شکلی مشخص‌تر برای سازه قاب خمشی دسته شده نسبت به سازه دیگر ایجاد گردید. یک افزایش نسبی در حدود ۵ درصد برای اختلاف میان مقادیر بیشینه تاریخچه زمانی دریافت هر دو سازه مطالعاتی ملاحظه می‌شود. دامنه‌های بزرگ‌تر دریافت ماندگار نیز در سازه قاب خمشی دسته شده رخ داده است. همچنین یک دامنه تفاوت ۵ تا ۱۰

## مراجع

- [1] Asgarian, B., Sadrinezhad, A. & Alanjari, A. (2010), "Seismic performance evaluation of steel moment resisting frames through incremental dynamic analysis", *Journal of Constructional Steel Research*, 66, 178-190.
- [2] Bahramirad, A., Tehranizadeh, M. & Moshref, A. (2015), "Equating incremental dynamic analysis with static nonlinear analysis at near-field excitation", *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 14(3), 465-476.
- [3] Shuang, L. & Xie, L. (2007), "Progress and trend on near-field problems in civil engineering", *Acta Seismologica Sinica*, 20, 105-11.
- [4] Azhdarifar, M., Meshkat-Dini, A. & Sarvghad Moghadam, A. (2015), "Assessment of Seismic response of Mid-Rise Steel Buildings with Structural Configuration of Framed Tube Skeletons", 7th International Conference on Seismology and Earthquake Engineering (SEE7), Tehran, Iran.
- [5] Gaur, H. & Goliya, R.K. (2015), "Mitigating shear lag in tall building", *International Journal of Advanced Structural Engineering*, 7, 269-279.
- [6] Movahed, H., Meshkat-Dini, A. & Tehranizadeh, M. (2014), "Seismic evaluation of steel special moment resisting frames affected by pulse type ground motions", *Asian Journal of Civil Engineering (BHRC)*, 15, 575-585.
- [7] 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). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CF.1943-5509.0001125](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0001125)
- [8] Han, S.W., Moon, K.H. & Ha, S.J. (2015), "Seismic performance of high rise intermediate steel moment frames according to rotation capacity of moment connections", *International Journal of High Rise Buildings*, 4(1), 45-55.
- [9] Kalkan, E. & Kunath, S. (2006), "Effects of fling step and forward directivity on seismic response of buildings", *Earthquake Spectra*, 22(2), 367-390.

- [10] Krishnan, S. (2007), "Case studies of damage to 19-storey irregular steel moment-frame buildings under near-source ground motion", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 36(7), 861-885.
- [11] 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.
- [12] Ghahari, F. & Khaloo, R. (2013), "Considering rupture directivity effects, which structures should be named long-period buildings?", *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 22, 165-178.
- [13] Tajmir Riahi, H., Amouzegar, H. & Ale-Saheb Fosoul, S. (2015), "Comparative study of seismic structural response to real and spectrum matched ground motions", *Scientia Iranica*, 22, 92-106.
- [14] PEER Ground Motion Database, <http://peer.berkeley.edu/>
- [15] National Building Regulations. (2013), "Part 6: Applied loads on buildings", Ministry of Roads and Urban Development, Deputy for housing and construction, Tehran, Iran.
- [16] Shirvani Harandi, V. (2017), The effect of behavior coefficient on seismic demand of 3D moment frame under strong ground motion. Thesis of Master. Kharazmi University.
- [17] National Building Regulations. (2013), "Part 10: Design and Construction of Steel Buildings", Ministry of Roads and Urban Development, Deputy for housing and construction, Tehran, Iran
- [18] Federal Energy Management Agency (FEMA). (1998), "Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings: FEMA 356", Createspace Independent Publication
- [19] FEMA 440. (2005), "Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures", Applied Technology Council (ATC-55 Project).
- [20] SAP 2000, Structural Analysis Program, Computer and Structures; Berkeley.
- [21] Iranian Code of Practice for Seismic Resistant Design of Buildings (Standard no. 2800). (2014). 4<sup>th</sup> Edition, Building & Housing Research Center, Tehran, Iran.
- [22] Poursha, M. & Samarin, E.T. (2015), "The modified and extended upper-bound (UB) pushover method for the multi-mode pushover analysis of unsymmetric-plan tall buildings", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 71, 114-127.
- [23] Eghbali, M., Ghodrati Amiri, Gh. & Yaghmaei Sabegh, S. (2012). "Comparison approximate and accurate methods of evaluating seismic increasingly dynamic analysis of steel moment frames", *Journal of Structure & Steel*, 8(11), 63-82.
- [24] Vamvatsicos, D. & Cornell, CA. (2004), "Applied incremental dynamic analysis", *Earthquake Spectra*, 20(2), 523-553.



**V. Shirvani Harandi**

MSc Graduate, Faculty of  
Engineering, Kharazmi  
University of Tehran.

**e-mail:** vahideh.shirvani92@gmail.com

**A. Meshkat-Dini\***

Assistant Professor, Faculty of  
Engineering, Kharazmi  
University of Tehran.

**e-mail:** meshkat@khu.ac.ir

**A. Massumi**

Professor, Faculty of Engineer-  
ing, Kharazmi University of  
Tehran.

**e-mail:** massumi@khu.ac.ir

**Analytical Comparison between Seismic Performance of Middle-rise Bundled Tube and 3D Moment Frame Structures**

*In this study, the performance of resistant skeleton of mid-rise moment frames under scaled near-field earthquake records have been evaluated by using both, incremental dynamic and nonlinear dynamic time history analyses. Also, a brief explanation of this concept through the perspective of the formation of nonlinear hinges has been studied using modal pushover analysis. Three-dimensional propagation of seismic waves in resistant skeleton of buildings create a set of dynamic lateral forces with different intensities in the height of structure. Near-field strong ground motions are able to magnify the intensity of the mentioned forces. The studied structural models are comprising of bundled tube frame and full 3D moment frame resistant skeletons. The evaluated response parameters are the maximum interstory drift, maximum acceleration of stories, the interstory drift time history and configuration of the formed nonlinear hinges. Moreover, the IDA curves corresponding to maximum interstory drift have been drawn subjected to a number of near-field ground motions. The performance of studied structures was evaluated and compared.*

**Keywords:** Nonlinear dynamics, IDA analysis, MPA analysis, Bundled tube frame, 3D moment frame, Near-fault earthquake, Seismic performance

---

\* Corresponding author