

## Evaluation of Progressive Collapse Effects in Modular Bundled Tube Frames under Near-Field Earthquakes imposed through Incidence Angles

Erfan Alghasi<sup>1</sup>, Mahshad Jamdar<sup>2</sup>, Afshin Meshkat-Dini<sup>3\*</sup>, Jafar Keyvani Ghamsari<sup>4</sup>

1- M.Sc. Graduate, Structural Engineering, Kharazmi University, Tehran, Iran

2- M.Sc. Graduate, Earthquake Engineering, Kharazmi University, Tehran, Iran

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

4- Associate Professor, Faculty of Engineering, Kharazmi University, Tehran, Iran

### ABSTRACT

The results of this research were obtained based on conducting nonlinear dynamic time history analyses. Four incidence angle case studies were assumed for the ensemble of three-component earthquake records. Moreover, three-member removal situations were also assumed for the selective column elements of the studied structure subjected to all chosen ground motions. The results of this study show that the structural response parameters have a relatively larger amplitude under removing of the corner column at the first story, than the other two cases of column removal assumed at 10th story and also for the middle column of the outer frame. Furthermore, the structural responses did not change significantly with the increase of the incidence angle from 0° to 45°. The obtained results show that the formation of plastic hinges and inelastic zones in the structure would indicate high deformation demands at the middle stories and also the induced demand variation decreases upward along the height. Additionally, removing of the corner column would result in the formation of more plastic hinges, which cause relatively greater structural damages and gradually reduces the stability of the studied structure. It is worth noting that the structural response parameters under each element removal and subjected to strong near-field records, remains in a relatively stable domain. Furthermore, the variation of response parameters did not exceed the life safety limit.

### ARTICLE INFO

**Receive Date:** 10 July 2020

**Revise Date:** 25 September 2020

**Accept Date:** 30 September 2020

### Keywords:

Seismic Response  
Bundled Tube Structure Near-Field Record  
Progressive Collapse  
Incidence Angle

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2020.238478.2187>

\*Corresponding author: Afshin Meshkat-Dini

Email address: meshkat@khu.ac.ir

## بررسی نمود فرآیند خرابی پیشرونده در سازه بلند مرتبه قاب خمشی مدولار با بیکربندی سلول‌های صلب دسته شده تحت زوایای تابش رکوردهای حوزه نزدیک

عرفان القاصی<sup>۱</sup>، مهشاد جمع دار<sup>۲</sup>، افشین مشکوه الدینی<sup>۳\*</sup>، جعفر کیوانی قمصری<sup>۴</sup>

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی سازه، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران

۲- دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی زلزله، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران

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

۴- دانشیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران

### چکیده

یک سازه در طول عمر مفید خود با تهدیدهای بسیاری روبرو است. این تهدیدها می‌توانند ناشی از پدیده‌های طبیعی و یا عوامل انسانی باشند. پدیده خرابی پیشرونده، به هر صورت برخاسته و متأثر از عوامل فوق می‌تواند بر پایداری سازه‌ها تأثیرگذار باشد. بدین ترتیب، مشخصات رفتار سازه تحت شرایط ایجاد آسیب، خرابی و حذف اعضای بحرانی می‌تواند به عنوان رویکردی در جهت تخمین پتانسیل خرابی پیشرونده و نیز ارزیابی پایداری اسکلت مقاوم، مورد بررسی قرار گیرد. بارگذاری دینامیکی ناشی از زلزله نیز مانند بارهای ایجاد شده توسط انفجار، ضربه و آتش‌سوزی به عنوان عامل ایجاد خرابی پیشرونده محسوب می‌شود. سازمان علمی این پژوهش دربرگیرنده مطالعه رفتار غیرخطی یک سازه فولادی ۲۰ طبقه قاب خمشی دسته شده، با اعمال زوایای تابش رکوردهای حوزه نزدیک و تأثیر آنها بر پایداری سازه‌ها تحت اثرات خرابی پیشرونده است. اسکلت مقاوم سازه مطالعاتی بر اساس ضوابط آیین‌نامه طرح لرزه‌ای ایران (استاندارد ۲۸۰۰- ویرایش چهارم) و نیز مباحث ششم و دهم مقررات ملی ساختمان، طراحی شده است. نتایج این پژوهش بر اساس انجام تحلیل‌های دینامیکی تاریخچه زمانی غیرخطی بدست آمده است. به منظور بررسی این فرآیند، چهار زاویه تابش به همراه سه موقعیت حذف المان تحت مجموعه رکوردهای سه مولفه‌ای انتخابی اعمال شده است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که پارامترهای پاسخ در سازه با حذف ستون گوشه نسبت به دو حالت حذف ستون در ارتفاع و نیز در دهانه میانی قاب بیرونی، دارای دامنه بزرگتری است. این موضوع نیز با افزایش زاویه تابش از صفر به ۴۵° دچار تغییرات چشمگیری نشده است. شایان ذکر است که سازه مطالعاتی تحت حذف المان و با اعمال رکوردهای نیرومند حوزه نزدیک، دارای عملکرد لرزه‌ای مناسب بوده و دامنه رفتاری از حدود ایمنی جانی فراتر نرفته است.

کلمات کلیدی: پاسخ لرزه‌ای، قاب محیطی دسته شده، زلزله حوزه نزدیک، خرابی پیشرونده، زاویه تابش زلزله

سابقه مقاله:		شناسه دیجیتال:			
دریافت	بازنگری	پذیرش	انتشار آنلاین	چاپ	https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2020.238478.2187
۱۳۹۹/۰۴/۲۰	۱۳۹۹/۰۷/۰۴	۱۳۹۹/۰۷/۰۹	۱۳۹۹/۰۷/۰۹	۱۴۰۰/۰۸/۳۰	doi: 10.22065/jsce.2020.238478.2187
*نویسنده مسئول:		افشین مشکوه الدینی			
پست الکترونیکی:		meshkat@khu.ac.ir			

## ۱- مقدمه

پایداری سازه همیشه در طراحی پروژه‌های مهندسی عمران امری کلیدی بوده و بسته به هندسه سازه‌ای و مشخصات بارگذاری، ممکن است که اسکلت مقاوم و یا یک عضو سازه‌ای به طرق مختلفی، ناپایدار شود. یکی از مکانیسم‌هایی که در دو دهه اخیر توجه زیادی به آن شده و می‌تواند منجر به شکست و فروریزش سازه‌ها شده و پایداری اسکلت مقاوم را تهدید نماید، پدیده خرابی پیشرونده است [۱]. بررسی فرآیند خرابی پیشرونده از این جهت دارای اهمیت است که یک آسیب محلی می‌تواند باعث ایجاد خسارات گسترده به سازه شود. این روند با خرابی موضعی در قسمت کوچکی از اسکلت مقاوم آغاز شده و ممکن است که به ناپایداری و فروریزش کل سازه منجر بشود [۲]. خرابی پیشرونده پدیده‌ای دینامیکی است که با ایجاد ناپایداری در سازه‌ها باعث ایجاد تغییر شکل‌های بزرگ می‌شود. وقوع این پدیده مستلزم وجود دو شرط اساسی شامل عدم وجود پیوستگی، شکل‌پذیری و درجه نامعینی کافی و همچنین اعمال بارهای غیرعادی است. بارهای غیرعادی که می‌توانند باعث خرابی پیشرونده شوند شامل بار ضربه، خطای طراحی، ساخت، آتش سوزی، انفجار گاز، اضافه بار تصادفی، مواد خطرناک، برخورد خودرو، انفجار بمب و زمین لرزه است [۳].

وقوع زمین لرزه سبب ایجاد بارهای شدید دینامیکی شده که می‌تواند بیشترین سهم را در بروز خرابی‌های پیشرونده داشته باشد. مقررات، معیارها و دستورالعمل‌های متفاوتی برای مقابله با پدیده خرابی پیشرونده وجود دارند [۴]. شایان ذکر است که از جمله مهمترین موارد مذکور می‌توان به گزارش‌های فنی منتشره توسط جامعه مهندسان عمران آمریکا (ASCE)، وزارت دفاع (DOD) و اداره خدمات عمومی آمریکا (GSA)، هیئت ملی مشاوران خیره کانادا (NBCC)، مقررات مربوط به ساختمان در انگلستان اشاره کرد. دستورالعمل‌های ارایه شده توسط دو سازمان GSA و DOD جامع‌ترین اطلاعات را برای کاهش پتانسیل خرابی پیشرونده ارائه می‌دهد [۵ و ۶]. هدف از دستورالعمل GSA جلوگیری از گسترش خرابی پس از بروز خرابی محلی است. بر اساس GSA برای ساختمان‌هایی با بیش از ۱۰ طبقه، استفاده از رویکرد غیرخطی توصیه شده است. طبق دستورالعمل DOD، بررسی خرابی پیشرونده باید در ساختمان‌های جدید با ارتفاع بیش از ۳ طبقه در نظر گرفته شود. این دستورالعمل در ارتباط با سازه‌های بتن آرمه، فولادی، سنگی و ساختمان‌های چوبی نیز کاربرد دارد [۷]. هر دو دستورالعمل GSA و DOD از روش مسیر جایگزین APM استفاده می‌کنند تا اطمینان حاصل شود که پیکره مقاوم سازه به اندازه کافی در برابر خرابی پیشرونده مقاومت دارند. اساس روش APM یک رویه توزیع مستقل است، به این معنی که به نوع رویداد بستگی ندارد بلکه پاسخ سیستم سازه‌ای پس از حذف عضو، مهم می‌باشد. بدین ترتیب اگر عضو حذف شود و مسیر مناسب برای انتقال بار در دسترس باشد، خرابی عمومی رخ نخواهد داد.

مطالعات نظری و تجربی مختلفی برای بررسی پدیده خرابی پیشرونده انجام شده است. این پدیده اولین بار در سال ۱۹۶۸ در نتیجه فروریزش یک ساختمان ۲۲ طبقه در لندن مورد توجه مهندسان قرار گرفت. همچنین، واقعه ۱۱ سپتامبر ۲۰۰۱ تحقیقات مربوط به خرابی پیشرونده را افزایش داد و پس از آن، به طور جدی این پدیده مورد بررسی قرار گرفت. کیم و همکاران (۲۰۰۸) خرابی پیشرونده را در رفتار قاب‌های خمشی فولادی مورد ارزیابی قرار دادند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که این سازه‌ها در برابر بارهای جانبی و ثقلی برای خرابی پیشرونده، کمتر آسیب‌پذیر بوده و پتانسیل خرابی پیشرونده زمانی افزایش می‌یابد که یک ستون گوشه به طور ناگهانی برداشته شود و نیز زمانی کاهش می‌یابد که تعداد طبقات سازه، افزایش یابد [۷]. فنگ و همکاران در سال‌های ۲۰۰۹ و ۲۰۱۰ یک مطالعه پارامتری را با انجام آنالیزهای دینامیکی غیرخطی سه بعدی بر روی سازه‌های طبقاتی، جهت ارزیابی پدیده خرابی پیشرونده تکمیل نمودند. نتایج این مطالعه نشان داد که ساختمان‌های معمولی چند طبقه با سیستم مقاوم جانبی مهاربندی شده، در مقابل خرابی پیشرونده تحت سناریوی حذف ستون، آسیب‌پذیری کمتری دارند [۸ و ۹]. خاندلوال و همکاران (۲۰۰۹) آنالیز خرابی پیشرونده را بر روی سازه‌های با اسکلت قاب مهاربندی شده (دارای طرح آیین‌نامه‌ای) انجام دادند. نتایج این مطالعه نشان داد که روش مقررات GSA از DOD محافظه کارانه‌تر است [۱۰].

لیو و همکاران (۲۰۱۱) مطالعه‌ای درباره بهینه‌سازی قاب خمشی فولادی برای مقابله با خرابی پیشرونده را انجام دادند. در این تحقیق مشاهده شد که در نظر گرفتن قابلیت مقابله با اثرات خرابی پیشرونده در روند طراحی، پیکربندی سازه را سنگین‌تر می‌کند [۱۱]. کیم و همکاران (۲۰۱۳) ظرفیت سازه‌های دیاگرید را در برابر خرابی پیشرونده مورد ارزیابی قرار دادند و نتایج تحقیق نشان داد که این

سازه‌ها دارای ظرفیت مقاومت کافی در برابر خرابی پیشرونده هستند [۱۲]. کیم و همکاران (۲۰۱۴) تاثیر تاول‌های کف طبقات در قاب‌های خمشی فولادی در برابر خرابی پیشرونده را مورد بررسی قرار دادند. در این پژوهش تجزیه و تحلیل عددی سه بعدی تاول بتن آرمه، ستون و تیرهای متصل به آن بررسی شد. رفتار کف زیرین ستون حذف شده و سهم انرژی جذب شده مشخص شد [۱۳]. پوراصیل و همکاران (۲۰۱۷) یک مطالعه عددی را به منظور ارزیابی خرابی پیشرونده ناشی از بارگذاری انفجاری در ساختمان‌های فولادی دارای قاب خمشی انجام دادند. نتایج حاصله نشان داد که چنانچه در ارزیابی پدیده خرابی پیشرونده، عامل شروع خرابی و بارگذاری انفجاری در نظر گرفته شود، پارامترهای پاسخ سازه در مقایسه با نتایج سایر روش‌های متداول در این موضوع، متفاوت خواهند بود [۱۴].

بار زلزله نیز همانند بارهایی مانند انفجار، ضربه و آتش‌سوزی می‌تواند عامل ایجاد خرابی پیشرونده باشد. نیروهای جانبی ناشی از زلزله سبب افزایش شدید برآیند تنش در اعضای سازه‌ای شده و ممکن است که منجر به حذف یک عضو باربر اصلی و بروز خرابی پیشرونده بشود. همچنین، باز توزیع نیرو توسط عضو آسیب دیده به اعضای مجاور نیز می‌تواند منجر به اضافه شدن برآیند تنش در سایر اعضا تا گسترش خرابی برای ایجاد مکانیزم فروریزش سازه شود [۱۵]. با توجه به اینکه طراحی سازه‌ها به صورت ایمن جزو مهمترین اهداف مهندسی است، ایجاد تعادل بین ظرفیت سازه و تقاضای لرزه‌ای باید به عنوان یک مسئله اساسی در تحقق این هدف در نظر گرفته شود. توانایی یک سازه در حفظ پایداری در برابر حرکات نیرومند زمین بدون فروریزش، در واقع نشان‌دهنده ظرفیت کافی مقاومتی اسکلت مقاوم آن است [۱۶]. بر طبق مطالعات و تجربیات طراحی لرزه‌ای سازه‌ها بر اساس عملکرد، اسکلت مقاوم باید دارای حدود ایمن و مشخص برای پارامترهای پاسخ دینامیکی، شکل‌پذیری، سختی و مقاومت کافی باشد. وجود این قابلیت‌های رفتاری در اعضای سازه‌ای می‌تواند به جذب و میرا کردن انرژی جنبشی زمین لرزه منجر شود. با توجه به این رویکرد باید فرآیند خرابی پیشرونده در سازه‌ها و پتانسیل سیستم مقاوم سازه در برابر این نوع خرابی، مورد ارزیابی قرار گیرد. بررسی ارتباط بین عملکرد غیرخطی سازه با پارامترهای پاسخ لرزه‌ای مانند دریافت و نیز تغییرشکل اعضا می‌تواند معیاری برای ارزیابی موضوع فوق باشد [۱۷].

یکی از معیارها برای گروه‌بندی رکوردهای زلزله بر اساس فاصله ایستگاه لرزه‌نگاری نسبت به صفحه شکست گسل است. بر این اساس، رکوردهای زلزله را می‌توان به سه گروه حوزه نزدیک، میانی، و دور تقسیم نمود. رکوردهای حوزه نزدیک دارای ویژگی‌های خاصی است که باعث تمایز رفتار سازه تحت این رکوردها نسبت به رکوردهای حوزه دور می‌شود. تاریخچه زمانی این رکوردها حاوی پالس‌های بزرگ سرعت است و وجود این موضوع می‌تواند باعث آسیب‌های جدی در سازه‌ها شود. وجود این پالس‌ها در تاریخچه زمانی سرعت رکورد زلزله را می‌توان بر پایه اثرات گسلش پیشرو توضیح داد [۱۹، ۱۸]. انتشار اثرات لرزه‌ای ناشی از پالس‌های نیرومند سرعت در اسکلت سازه‌ها به شدت بر دامنه پاسخ دینامیکی تاثیرگذار است. همچنین، عوامل زیادی همانند محتوای فرکانسی، مدت دوام و ماکزیمم دامنه جنبش‌های نیرومند زمین و همچنین مشخصات دینامیکی سازه‌ها بر میزان آسیب‌پذیری و خسارت وارده بر اسکلت مقاوم تاثیرگذار هستند [۲۰ و ۲۱].

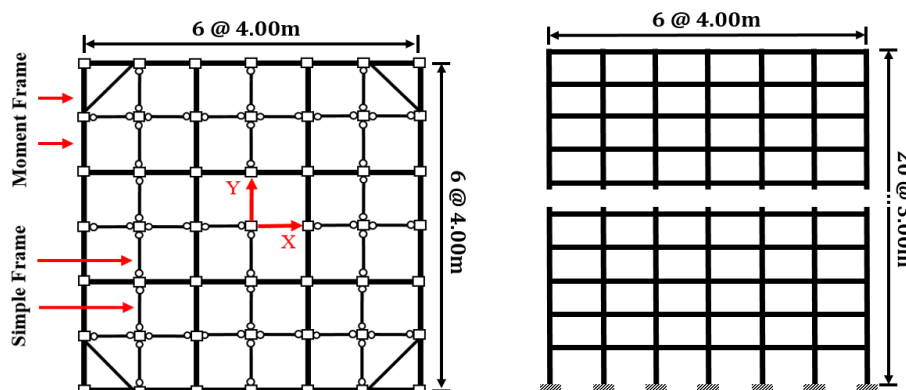
اسکلت سازه‌ای مورد مطالعه در این پژوهش، سیستم قاب خمشی محیطی دسته شده است. اثرات لنگی برش که در رفتار اسکلت قاب محیطی با ساختار منفرد وجود دارد، در رفتار این سازه‌ها تا حد زیادی برطرف شده است. مشخصات لنگی برش در اثر تغییرشکل خمشی به واسطه برآیندهای بزرگ برش ایجاد شده در اعضا در هنگام اعمال نیروی جانبی به وجود می‌آید [۲۲]. سازه قاب محیطی دسته شده شامل تعدادی صفحات قاب خمشی است که در دو جهت عمود بر هم قرار می‌گیرند و با تعبیه اتصالات ممان‌گیر، یک دسته از سلول‌های صلب تشکیل می‌شوند. سیستم سازه مطالعاتی در ارتفاع ۲۰ طبقه انتخاب شده و بر اساس ضوابط استاندارد ۲۸۰۰ (ویرایش چهارم)، مباحث ششم و دهم مقررات ملی ساختمان طراحی شده است [۲۳-۲۵].

پارامترهای رفتار لرزه‌ای و مشخصات پاسخ غیرخطی ساختار مطالعاتی این پژوهش در دو حالت سازه کامل و سازه با حذف عضو (آسیب دیده) تحت مجموعه‌ای از رکوردهای حاوی پالس پرنرژی و بلند مدت سرعت بررسی شده است. در این پژوهش، احتمال و چگونگی ایجاد روند خرابی پیشرونده در سازه تحت اثرات زلزله به صورت دینامیکی غیرخطی مطالعه و ارزیابی شده است. همچنین برای انجام تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی نیز رکوردهای سه مولفه‌ای با زاویه‌های تابش صفر، ۱۵، ۳۰ و ۴۵ درجه به سازه مطالعاتی با سه موقعیت مختلف حذف عضو اعمال گردیده است. نتایج این تحقیق بیان‌گر آن است که رعایت ملاحظات طراحی لرزه‌ای با حاکمیت مشخصات رفتار پیچشی سخت، سبب ایجاد یک حاشیه اطمینان در برقراری وضعیت پایدار عملکرد سازه تحت جنبش‌های نیرومند زمین

در حوره نزدیک گسل خواهد شد. نمود این وضعیت را می‌توان در هر دو حالت اسکلت کامل و آسیب دیده سازه تحت اعمال رکوردهای نیرومند زلزله با زوایای مختلف تابش ملاحظه نمود [۲۶].

## ۲- مدل سازه مطالعاتی و ملاحظات طراحی

سازه ۲۰ طبقه مورد مطالعه در این پژوهش، دارای اسکلت فولادی همراه با سیستم سازه‌ای قاب محیطی دسته شده است. هندسه پلان و نمای این سازه در شکل ۱ مشهود می‌باشد. با توجه به شکل ۱، پلان سازه شامل چهار ساختار قاب خمشی در دو جهت عمود بر هم است که پس از ساخت و تعبیه اتصالات، یک دسته نه تایی از سلول‌های صلب را تشکیل می‌دهند. طبقات با ارتفاع ۳ متر و پلان دارای ۶ دهانه به طول ۴ متر در هر دو جهت X و Y می‌باشد. بارگذاری مرده و زنده طبق استاندارد ملی ساختمان ایران (مبحث ششم) برای تمام طبقات به جز تراز بام (تراز  $z=H$ ) به ترتیب برابر با  $0.5 \text{ ton/m}^2$  و  $0.2 \text{ ton/m}^2$  و همچنین در تراز بام نیز  $0.5 \text{ ton/m}^2$  و  $0.15 \text{ ton/m}^2$  است. خاک ساختگاه از تیپ ۲ بوده و منطقه پروژه در پهنه‌بندی با خطر نسبی زیاد قرار دارد [۲۶].



شکل ۱: نما و پلان سازه ۲۰ طبقه مطالعاتی با اسکلت قاب محیطی دسته شده [۲۶]

مشخصات مقاطع اعضای سازه بر اساس استاندارد ملی ساختمان (مبحث دهم) طراحی گردیده و همچنین معیارهای محدودیت جابجایی نسبی طبقات و رعایت اصل ستون قوی-تیر ضعیف در نظر گرفته شده است. آرایش مودال و پریودهای ارتعاشی سازه مطالعاتی نسبت به دو راستای X و Y در جدول ۱ آورده شده است. آرایش مودال مذکور مربوط به دو گروه مودهای ارتعاشی اول و دوم سازه می‌باشد و ملاحظه می‌شود که مشخصه رفتار پیچشی سخت برقرار است.

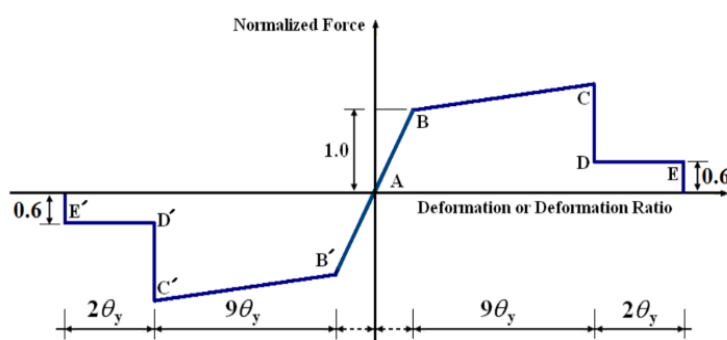
جدول ۱: پریود ارتعاش سازه مطالعاتی در دو جهت X و Y

Mode	T1 (Lateral X)	T1 (Lateral Y)	T1 (Torsional)	T2 (Lateral X)	T2 (Lateral Y)	T2 (Torsional)
Period (sec)	۱/۷۲	۱/۷۲	۱/۴۹	۰/۶۱	۰/۶۱	۰/۵۴

مدلسازی رفتار غیرخطی المان‌های تیر و ستون در سازه مطالعاتی بر پایه تعریف قابلیت تشکیل حوزه‌های متمرکز و مفاصل غیرخطی، بر طبق ضوابط FEMA در نظر گرفته شده است. همچنین برای توجیه رفتار تیر و ستون‌ها به ترتیب از مفصل پلاستیک M3 (خمشی) و نیز مفصل غیرخطی P-M2-M3 (اندرکنش نیروی محوری و لنگر خمشی) بر پایه FEMA356 و FEMA440 استفاده شده است [۲۸، ۲۷]. ساختار تحلیلی رفتار غیرخطی مفاصل فوق و معیار پذیرش عملکرد لرزه‌ای به ترتیب در شکل ۲ و جدول ۲ ملاحظه می‌شود.

جدول ۲: معیار پذیرش عملکرد لرزه‌ای المان‌های تیر-ستون در گزارش FEMA [۲۷]

معیارهای پذیرش	زاویه چرخش خمیری
IO - عملکرد خدمت رسانی بی وقفه	$1\theta_y$
LS - عملکرد ایمنی جانی	$9\theta_y$
CP - عملکرد آستانه فروریزش	$11\theta_y$



شکل ۲: مدل مفاصل غیرخطی المان‌های تیر-ستون در آیین نامه FEMA [۲۷ و ۲۸]

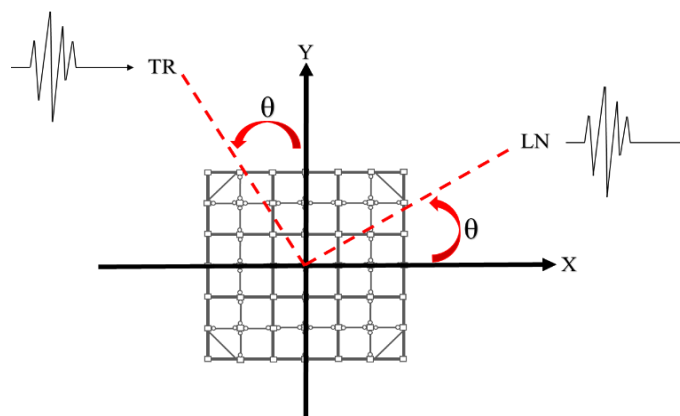
### ۳- رکوردهای انتخابی زلزله

انتخاب رکوردهای زلزله یکی از مهمترین مراحل در انجام تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی برای ارزیابی پارامترهای پاسخ سازه است. بدین لحاظ، تلاش می‌شود که رکوردهای انتخابی دارای مشخصات متناسب با شرایط ساختگاه سازه باشند. همچنین باید توجه داشت که انتخاب مناسب رکوردها، نقش مهمی در محاسبه ظرفیت خرابی و نیز برآورد آسیب‌پذیری سازه تحت آنالیز دینامیکی غیرخطی دارد. در این تحقیق از رکورد زلزله‌های حوزه نزدیک برای انجام تحلیل خرابی پیش‌رونده استفاده شده است. رکوردهای نیرومند حوزه نزدیک حاوی پالس‌های شدید و بلند مدت در تاریخچه زمانی سرعت بوده و وجود این ویژگی رکوردها می‌تواند تاثیر بسزایی در ایجاد و گسترش ناپایداری و خرابی سازه‌ها داشته باشد. همچنین، به منظور انجام تحلیل‌های غیرخطی تاریخچه زمانی، رکوردهای حوزه نزدیک که حاوی اثرات نیرومند جهت‌داری می‌باشند، از پایگاه تحقیقات مهندسی زلزله PEER استخراج شده‌اند [۲۹].

رکوردهای انتخابی در این پژوهش شامل یک گروه از جنبش‌های ثبت شده در نواحی نزدیک گسل و حاوی پالس‌های پرنانرژی و بلند مدت است. این گروه شامل رکوردهای اصلی دو زلزله اتفاق افتاده در ایران شامل رکورد BAM2003 و TABAS1978 و همچنین رکورد سیلمار SYL از زلزله Northridge 1994 می‌باشد. مهمترین پارامترهای فیزیکی رکوردهای انتخابی نظیر بیشینه شتاب زمین (PGA)، بیشینه سرعت زمین (PGV)، بیشینه تغییر مکان زمین (PGD) و بزرگای در جدول ۳ آورده شده‌اند. توضیح آن که به منظور بررسی اثرات زاویه تابش ( $\theta$ ) زلزله در پاسخ‌های لرزه‌ای سازه، هر رکورد سه مولفه‌ای با چهار حالت زاویه تابش صفر، ۱۵، ۳۰ و ۴۵ درجه نسبت به راستای اصلی پلان اعمال شده است. بر همین اساس تمامی رکوردها به صورت سه مولفه‌ای و همزمان به مدل سازه مطالعاتی اعمال گردیده‌اند. تعریف زاویه تابش زلزله ( $\theta$ ) در شکل ۳ نشان داده شده است.

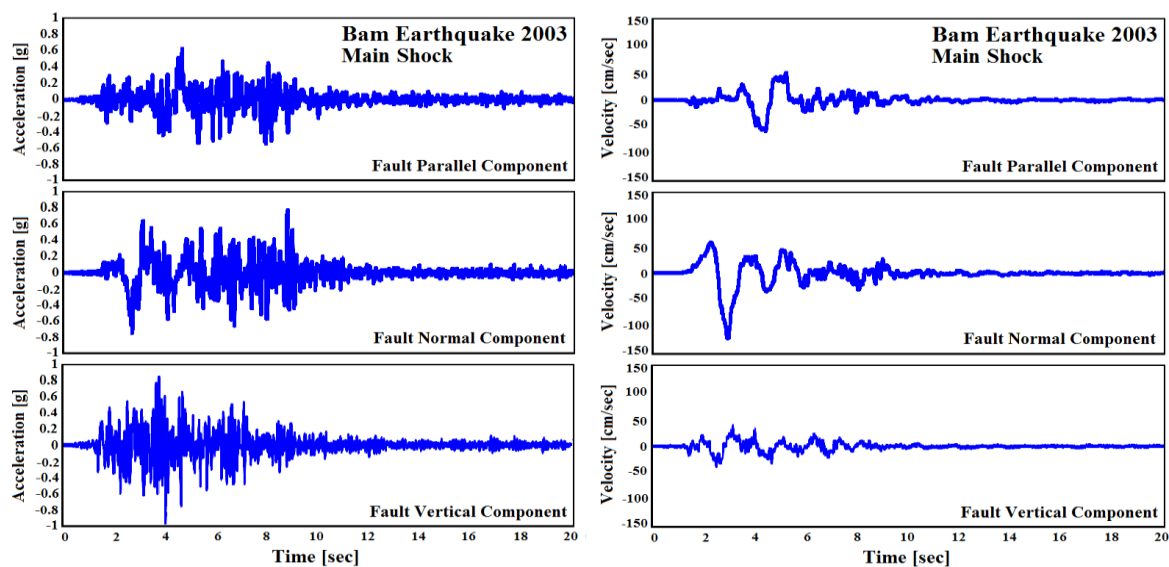
جدول ۳: مشخصات فیزیکی رکوردهای انتخابی

Earthquake	Magnitude (Mw)	PGA (g)			PGV (cm/s)			PGD (cm)		
		Component			Component			Component		
		LN	TR	UP	LN	TR	UP	LN	TR	UP
Bam 2003 Main Shock (BAM) 1.0 km	۶/۶	۰/۶۳۵	۰/۷۹۳	۰/۹۹۹	۵۹/۶۱	۱۲۳/۷	۳۷/۶۶	۲۰/۷۰	۳۷/۴۰	۱۰/۱۵
Tabas 1978 Main Shock (TAB) 3.0 km	۷/۴	۰/۸۳۶	۰/۸۵۱	۰/۶۸۸	۹۷/۷	۱۲۱/۳	۴۵/۴	۳۹/۹	۹۴/۵	۱۶/۴۸
Northridge 1994 Sylmar (SYL) 6.4 km	۶/۷	۰/۶۰۴	۰/۸۴۳	۰/۵۳۵	۷۸/۲۴	۱۲۹/۴	۱۹/۱	۱۶/۴۱	۳۲/۲۱	۹/۷۶

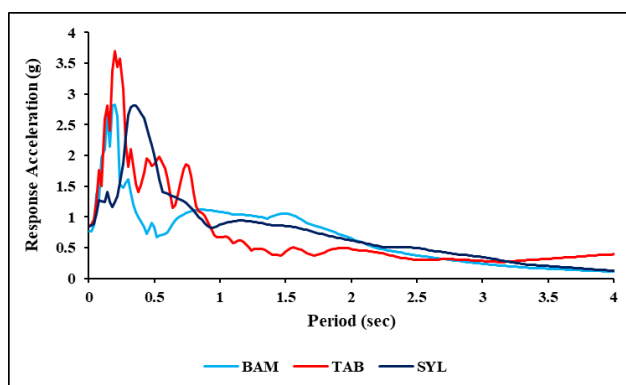
شکل ۳: تعریف زاویه تابش زلزله ( $\theta$ ) نسبت به سازه

قابل ذکر است که هر سه مولفه رکوردهای زلزله به طور هم زمان در جهات X، Y و Z اسکلت مقاوم سازه مطالعاتی اعمال شده‌اند. مولفه موازی با صفحه شکست گسل (مولفه LN) در راستای X پلان سازه، مولفه عمود بر صفحه شکست گسل (مولفه TR) در راستای Y و مولفه قائم (UP) در جهت Z وارد شده‌اند. همچنین، کلیه تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی تاریخچه زمانی برای سازه‌های مطالعاتی توسط دو نرم افزار SAP2000 و PERFORM 3D انجام شده است [۳۰، ۳۱].

نمودارهای تاریخچه زمانی شتاب و سرعت متناظر با هر سه مولفه از رکورد اصلی زلزله BAM و طیف پاسخ شتاب هر سه رکورد زلزله انتخابی در شکل ۴ نشان داده شده است. مجموعه بسیار پر تعداد اسپایک‌های شتاب با دامنه متوسط تا بلند، همراه با چندین آرایه موجک مانند با پیروید بیش از نیم ثانیه در تاریخچه زمانی این رکورد دیده می‌شود. هم پایه با اسپایک‌ها و ساختارهای موجی شکل شتاب نیز دو پالس بزرگ و پردامنه سرعت با پیروید بیش از ۲ ثانیه به ترتیب متناظر با مولفه LN و مولفه TR وجود دارد. بازه زمانی هر دو پالس سرعت مذکور بطور مشخص متناظر با آرایه‌های پردامنه شتاب است و بویژه یک مجموعه اسپایک‌های نه چندان پردامنه نیز تا محدوده ۴ ثانیه پس از موجک اصلی پالس سرعت ملاحظه می‌شوند. نمودار تاریخچه زمانی سرعت مربوط به مولفه UP رکورد BAM حاوی چند ساختار موجی شکل کم دامنه و کم انرژی است که بیشینه دامنه آنها از ۵۰ cm/sec به مراتب کمتر می‌باشد. بدین ترتیب، جنبش ضربه‌ای زمین ناشی از پالس پیوسته سرعت و اسپایک‌های پس از آن، بطور مشخص فقط برای دو مولفه افقی رکورد BAM پدیدار می‌شود و این موارد از مشخصات بارز اثرات نیرومند جهت‌داری پیشرونده است.



(الف)



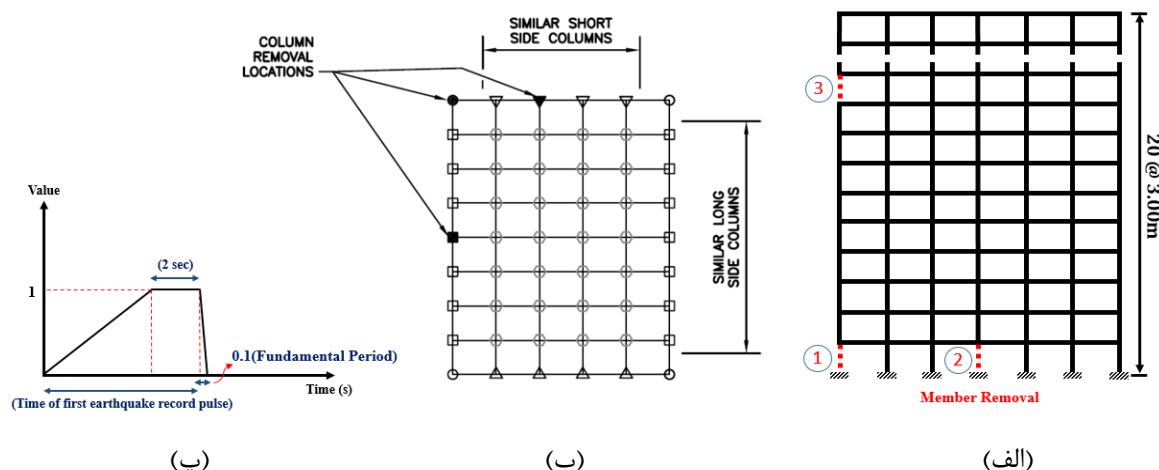
(ب)

شکل ۴: نمایش مشخصات لرزه شناسی، (الف) تاریخچه زمانی شتاب و سرعت رکورد اصلی زلزله BAM 2003، (ب) طیف پاسخ شتاب رکوردهای انتخابی

#### ۴- فرآیند بارگذاری لرزه‌ای جهت حذف ستون

کاربرد روش آنالیز دینامیکی غیرخطی برای بررسی فرآیند خرابی پیشرونده، یک فرایند جامع است و در طی روند تحلیلی نیز یک یا چند عضو باربر اصلی سازه به صورت دینامیکی حذف می‌شود. قابل ذکر است که پدیده خرابی پیشرونده دارای ماهیتی دینامیکی است [۳۲]. در این تحقیق، فرآیند خرابی پیشرونده تحت بار لرزه‌ای و بر اساس تحلیل دینامیکی غیرخطی بررسی می‌گردد. یکی از مهمترین چالش‌ها در ارزیابی اثرات خرابی پیشرونده، انتخاب موقعیت ستون (یا ستون‌های) برداشته شده در سازه است. طبق ضوابط UFC، چهار موقعیت در ترازهای ارتفاعی سازه برای حذف ستون پیشنهاد شده است. این موقعیت‌ها شامل طبقه همکف، بالاترین طبقه و طبقه زیرین آن، طبقات میانی سازه و همچنین طبقه پس از تراز تغییر در اندازه ستون‌ها است. علاوه بر این همان طور که در شکل ۵ نشان داده شده، این آیین‌نامه سه موقعیت حذف ستون را نیز در پلان سازه پیشنهاد می‌کند [۵]. بر این اساس، در این پژوهش سه موقعیت مکانی برای حذف عضو ستون در سازه مطالعاتی انتخاب شده است. بدین ترتیب در تحلیل‌های غیرخطی این پژوهش، ستون‌های گوشه، وسطی و نیز ستون تراز میانی سازه مطالعاتی در قاب خمشی بیرونی جهت Y، مطابق با شکل (۵-الف) حذف شده اند [۲۶].





شکل ۵: مفهوم سازی پدیده خرابی پیشرونده؛ (الف) موقعیت‌های حذف ستون در سازه مطالعاتی، (ب) موقعیت‌های مفروض برای حذف عضو در پلان سازه بر اساس آیین‌نامه UFC [۵]، (پ) تابع حذف عضو

شایان ذکر است که در روند تحلیل دینامیکی غیرخطی برای مطالعه اثرات خرابی پیشرونده، ابتدا نیروی محوری ستون مورد نظر از سازه یکپارچه و آسیب ندیده، تحت ترکیب بار ثقلی محاسبه گردیده و به عنوان نیروی عکس‌العمل ستون در جهت مخالف به گره بالایی ستون حذف شده، اعمال می‌شود. نکته دیگر آن که برای شبیه‌سازی پدیده حذف ناگهانی ستون، نیروی محوری المان طبق توابع حذف عضو که در شکل (۵-پ) نشان داده شده، جایگزین می‌شود. نکته قابل توجه در این پژوهش، حذف ستون بر اثر اعمال بارگذاری لرزه‌ای ناشی از یک زلزله نیرومند است. در این روند تحلیلی که بارگذاری لرزه‌ای عامل حذف ستون می‌باشد، پدیده خرابی پیشرونده به صورت واقعی‌تری مورد بررسی قرار می‌گیرد. توابع حذف ستون بر اساس در نظرگیری موقعیت و بازه مربوط به پالس سرعت و چندین اسپایک پدیده پس از آن در تاریخچه زمانی رکورد زلزله تنظیم می‌شوند. این موضوع نیز به گونه‌ای است که هم‌زمان با اعمال بار لرزه‌ای، تابع حذف ستون نیز لحاظ می‌شود. بدین ترتیب، ستون مورد نظر در بازه زمانی محاسبه شده با استفاده از تاریخچه سرعت رکورد زلزله، در مدت ۰/۱ پرپود سازه حذف خواهد شد [۵، ۶، ۲۶].

## ۵- پاسخ‌های دینامیکی غیرخطی سازه مطالعاتی

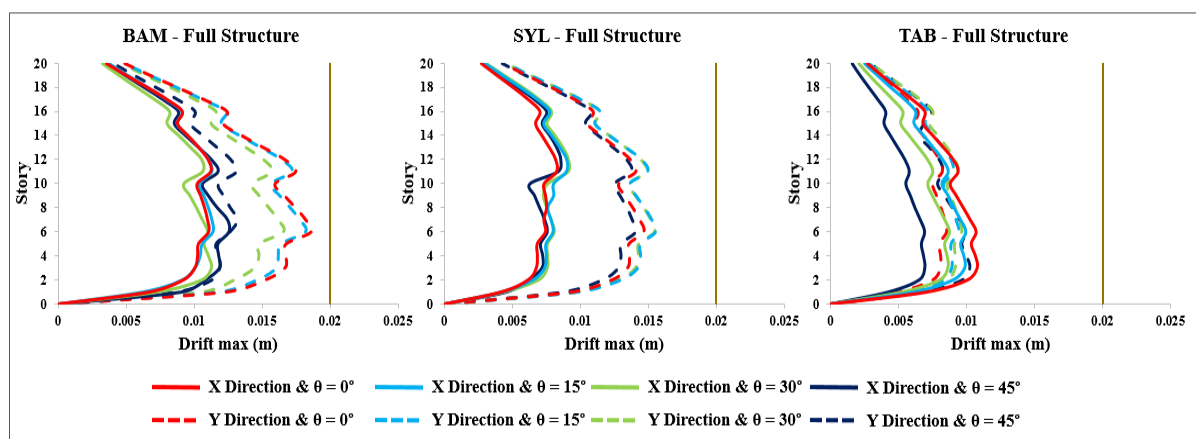
بروز جنبش‌های نیرومند ضربه‌ای زمین تحت اثر پالس بزرگ و پدیده سرعت در هنگام وقوع زلزله‌های حوزه نزدیک گسل، به گونه‌ای مشخص و تشدید یافته سبب انتشار امواج لرزه‌ای در اسکلت مقاوم سازه می‌شوند. بر همین اساس نیز مقادیر عظیم انرژی در یک بازه زمانی نه چندان طولانی به اسکلت مقاوم سازه وارد خواهد شد. مداومت و برقراری وضعیت پایدار برای رفتار لرزه‌ای سازه بستگی مستقیم با قابلیت المان‌ها و اتصالات اسکلت مقاوم در جلوگیری از ایجاد حوزه‌های با ماهیت رفتار غیرخطی و نیز ایستادگی در برابر روند افزایشی مربوط به کاهش سختی و زوال مقاومت سازه دارد. بدین لحاظ، تشخیص مشخصات تواتری و محتوای فرکانسی رکوردهای نیرومند زلزله که قابلیت ایجاد حرکات ضربه‌ای زمین و ساختارهای موجی شکل پرنرژی را دارند، از اهمیت بالایی برخوردار است [۳۳-۳۵]. افزون بر این مطلب، تشدید و افزایش بزرگ در مشخصات پاسخ لرزه‌ای و نمود گسترش یابنده رفتار غیرخطی سازه نیز تحت همین اثرات صورت گرفته و در پی آن وضعیت شکست‌های موضعی و ناپایداری احتمالی اسکلت مقاوم، بویژه پس از عبور از بخش اصلی پالس سرعت ایجاد می‌شود.

فرآیند خرابی پیشرونده با آسیب محلی آغاز می‌شود و بطور پیوسته در کل سیستم سازه‌ای پخش می‌شود. یکی از کاستی‌های موجود در ملاحظات آیین‌نامه‌های مربوطه برای ارزیابی پتانسیل خرابی پیشرونده، عدم وجود معیار مناسب در حذف ستون (یا ستون‌ها) که به نوع تهدید وابسته باشد، است. ملاحظه گردیده که علاوه بر اثرات مستقیم بارهای ثقلی در موضوع خرابی پیشرونده، حذف المان‌ها در اسکلت مقاوم نیز می‌تواند دامنه پاسخ‌های سازه را دچار تغییرات چشمگیر نماید [۳۶ و ۳۷]. در مقاله حاضر احتمال ایجاد خرابی پیشرونده

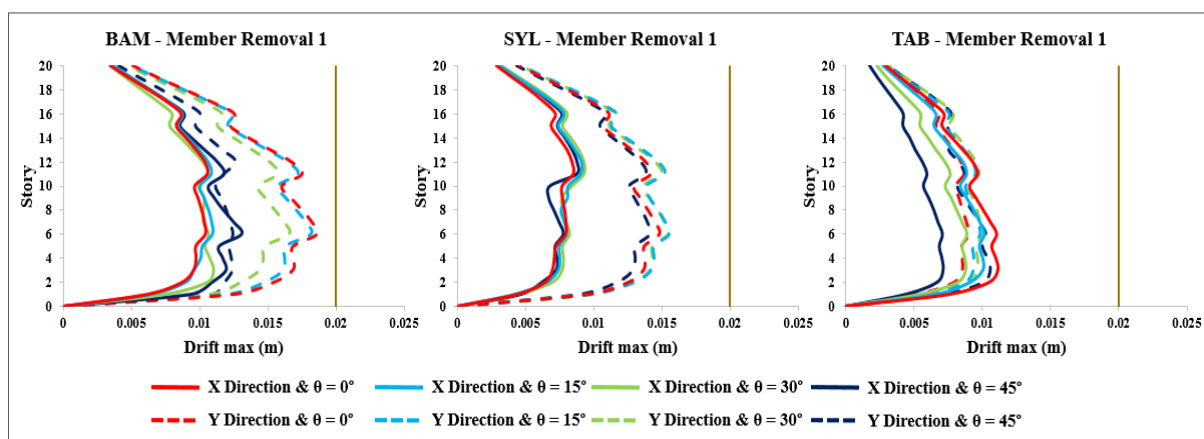
در سازه مطالعاتی با در نظر گرفتن اثرات عامل خرابی، به صورت دینامیکی غیرخطی بررسی شده است. خرابی پیشرونده تحت بارگذاری لرزه‌ای، ماهیت دینامیکی و غیرخطی دارد. با کاربرد روش تحلیل دینامیکی غیرخطی، آثار روندهای مختلف خرابی پیشرونده تحت بار لرزه‌ای برای پاسخ دینامیکی سازه مطالعاتی در دو حالت کامل و نیز آسیب دیده، ارزیابی شده و مقایسه گردیده است. همچنین، در این پژوهش به جهت بررسی پتانسیل خرابی پیشرونده، حذف جداگانه ستون‌های گوشه و میانی در تراز پایه (آرایش‌های حذف ۱ و ۲) و نیز حذف ستون گوشه‌ای در تراز طبقه دهم (آرایش حذف ۳) سازه مطالعاتی لحاظ گردید. نکته دیگر آن که به دلیل ارزیابی همه جانبه رفتار دینامیکی، سازه مطالعاتی تحت اثر زوایای تابش زلزله ۰، ۱۵، ۳۰ و ۴۵ درجه برای هر دو حالت کامل و آسیب دیده بررسی شده است. پارامترهای پاسخ مورد نظر شامل بیشینه دریفت جانبی طبقات، بیشینه دوران ستون‌های گوشه، جابجایی در گره بالایی ستون حذف شده و آرایش مفاصل پلاستیک در اسکلت مقاوم سازه مطالعاتی است [۲۶].

توصیف دریفت جانبی برابر با تغییر مکان نسبی بین دو تراز کف متوالی است که به ازای ارتفاع طبقه افزاز گردیده است. این پارامتر به دلیل وجود ارتباط با نیاز شکل‌پذیری هر طبقه در سازه، به عنوان یک تقاضای لرزه‌ای پایه تعریف می‌شود. دامنه و چگونگی آسیب‌پذیری سازه‌های خمشی تحت اثر رکوردهای نیرومند حوزه نزدیک، با بررسی توزیع دریفت در راستای ارتفاع سازه و تشخیص المان‌های بحرانی در طبقات قابل توجه است [۴۰-۳۸]. پوش بیشینه دریفت جانبی در محل مرکز جرم هر تراز کف طبقه و متناظر با جهت X و Y پلان سازه مطالعاتی (شکل ۱) تحت رکوردهای انتخابی (جدول ۳) بدست آمده است. نتایج این پارامتر برای هر سه رکورد حوزه نزدیک جدول ۳ در شکل‌های ۶ تا ۹ نشان داده شده است. مطابق با نمودارهای مربوط به سازه کامل و نیز آسیب دیده، ملاحظه می‌شود که در جهت Y پلان که مولفه نیرومندتر عمود بر صفحه شکست گسل (مولفه TR) اعمال شده، دامنه بزرگ‌تر پاسخ‌ها وجود دارد.

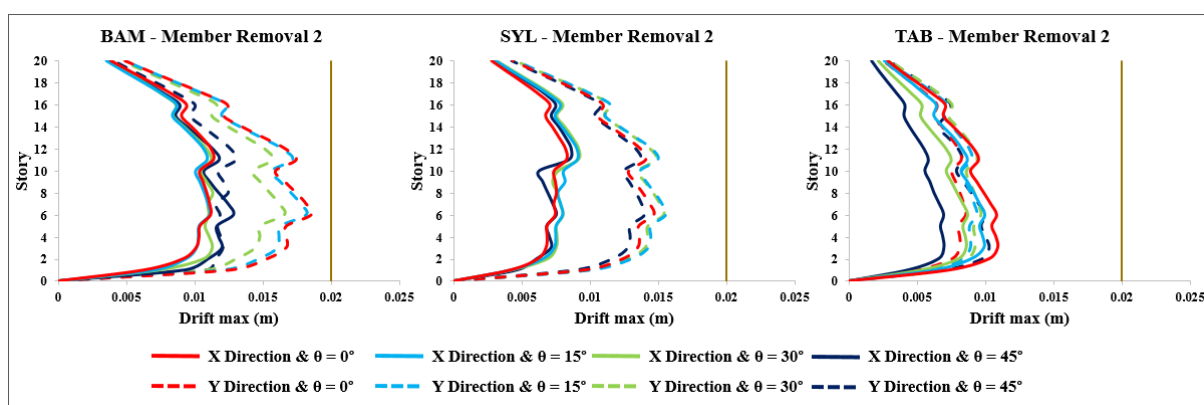
رکوردهایی که دارای پالس‌های پرنرژژی و بلند مدت در تاریخچه زمانی سرعت زمین هستند، پاسخ‌های با مقادیر بیشتری را ایجاد می‌نمایند. پوش بیشینه دریفت جانبی حاصل از رکوردهای TAB، BAM و SYL برای اسکلت مقاوم در تمامی زوایای تابش زلزله، در محدوده مقدار مجاز استاندارد ۲۸۰۰ و کمتر از ۲ درصد است. این موضوع نیز برای هر دو حالت سازه کامل و آسیب دیده برقرار است. بیشترین اندازه دریفت نیز در تراز طبقات میانی سازه مطالعاتی رخ داده است. ارزیابی و مقایسه هر چهار گروه نمودارهای پوش بیشینه دریفت (شکل‌های ۶ تا ۹)، بیانگر تفاوت کم بین مقادیر متناظر برای دو حالت سازه کامل و آسیب دیده می‌باشد. نتیجه این مقایسه نیز نشان دهنده تاثیر نه چندان زیاد حذف ستون در پارامتر مذکور است و بطور مستقیم از رعایت ضابطه ستون قوی-تیر ضعیف تاثیر می‌پذیرد. همچنین، با افزایش زوایای تابش زلزله از صفر به ۴۵ درجه، در همگی حالات در نظر گرفته شده برای سازه مطالعاتی، میزان تغییرات پارامتر مذکور دارای یک روند ناهمگون است. بیشترین میزان دریفت جانبی تحت رکورد BAM در جهت Y پلان است که مولفه نیرومندتر رکورد زلزله اعمال می‌شود و به میزان ۰/۰۱۸ می‌باشد.



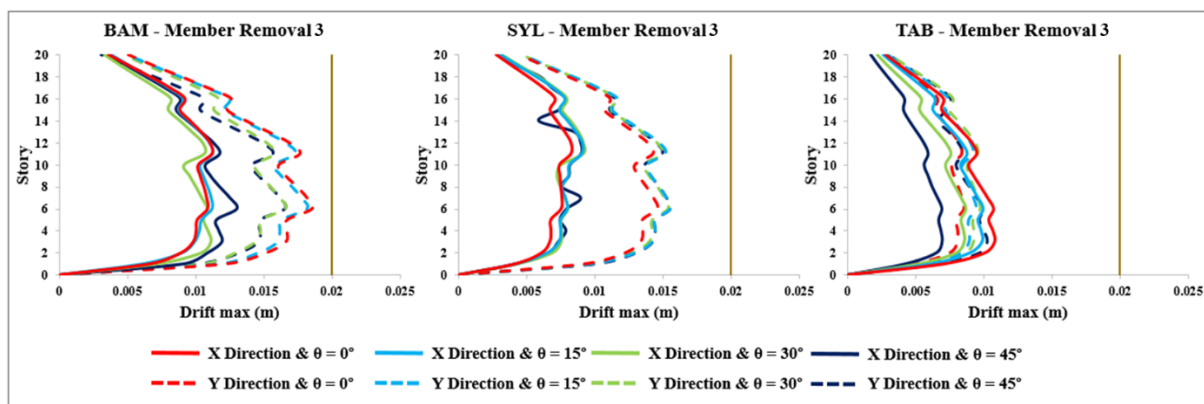
شکل ۶: نمودار پوش بیشینه دریفت جانبی طبقات در دو جهت X و Y در سازه کامل ۲۰ طبقه تحت رکوردهای BAM، SYL و TAB با زوایای تابش مختلف (شکل‌های ۳ و ۵)



شکل ۷: نمودار پوش بیشینه دررفت جانبی طبقات در دو جهت  $X$  و  $Y$  در سازه ۲۰ طبقه همراه با حذف ستون گوشه در تراز پایه تحت رکوردهای BAM، SYL و TAB با زوایای تابش مختلف (شکل‌های ۳ و ۵)

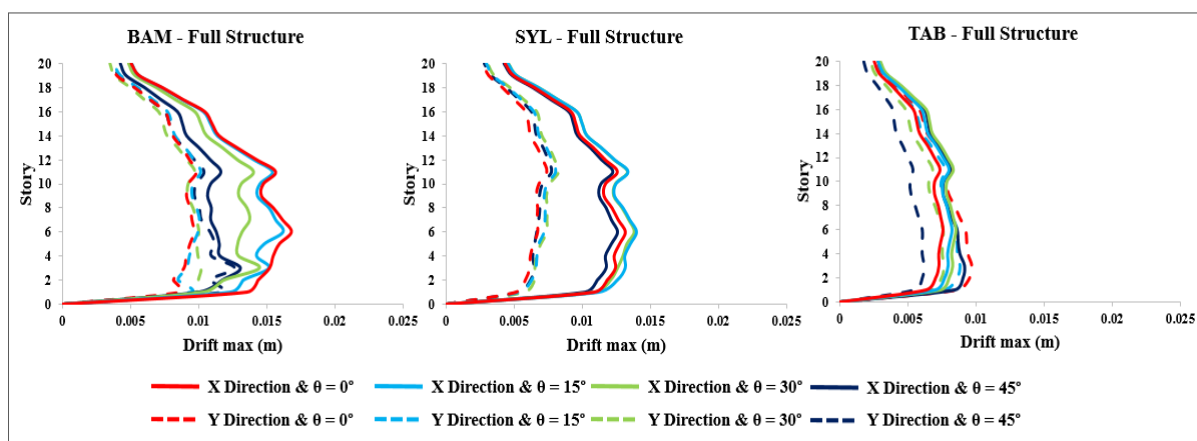


شکل ۸: نمودار پوش بیشینه دررفت جانبی طبقات در دو جهت  $X$  و  $Y$  در سازه ۲۰ طبقه همراه با حذف ستون میانی در تراز پایه تحت رکوردهای BAM، SYL و TAB با زوایای تابش مختلف (شکل‌های ۳ و ۵)

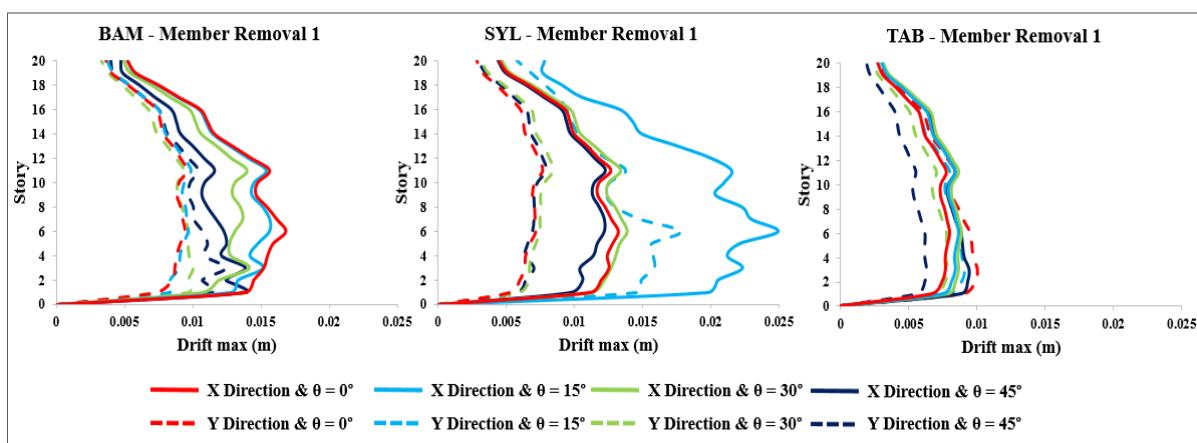


شکل ۹: نمودار پوش بیشینه دررفت جانبی طبقات در دو جهت  $X$  و  $Y$  در سازه ۲۰ طبقه همراه با حذف ستون میانی در تراز دهم تحت رکوردهای BAM، SYL و TAB با زوایای تابش مختلف (شکل‌های ۳ و ۵)

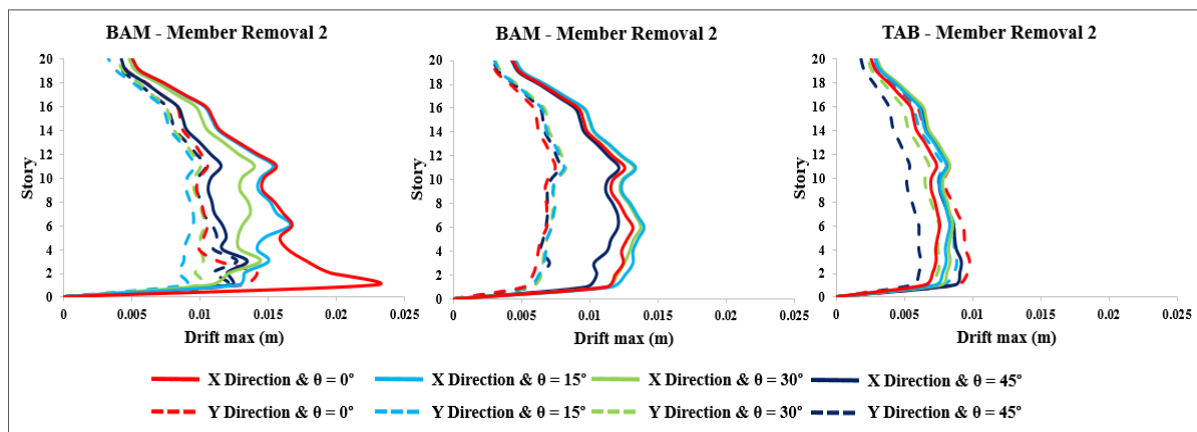
نمودارهای تغییرات پوش بیشینه دوران ستون‌های گوشه در قاب خمشی پیرامونی هم جهت با محور  $X$  و  $Y$  در سازه مطالعاتی برای هر دو حالت سازه کامل و آسیب دیده در شکل‌های ۱۰ تا ۱۳ نشان داده شده‌اند. دامنه عددی این پارامتر پاسخ در هر دو جهت  $X$  و  $Y$  دارای مقادیر به نسبت نزدیک به هم است. نکته دیگر در نتایج این پژوهش آن است که تحت رکوردهای نیرومند حوزه نزدیک، مشخصات پارامتر لرزه‌ای دارای نمود جامع‌تر غیرخطی هندسی بوده و این روند به صورت تدریجی تا حدود نیمه اول پالس سرعت ادامه پیدا می‌نماید. با توجه به نمودارها مشاهده می‌شود با افزایش زاویه تابش زلزله از صفر به ۴۵ درجه، یک فزونی نسبی در میزان بیشینه دوران ستون‌های گوشه دیده می‌شود. دامنه تغییرات این پارامتر پاسخ لرزه‌ای برای هر دو حالت سازه کامل و آسیب دیده، دارای مقادیر به نسبت مشابهی است. حذف ستون در هر سه موقعیت انتخابی (آرایش‌های حذف ۱ تا ۳) تاثیر چشمگیری در مقادیر دوران بر جای نگذاشته است. بررسی و مقایسه نمودارها بیان‌گر تاثیرات کم‌دامنه ناشی از حذف ستون در دامنه تغییرات پارامتر دوران المان است. با توجه به نمودار دوران شکل‌های ۱۰ تا ۱۳ مشاهده می‌شود که بیشترین میزان دوران ستون‌های گوشه (به عنوان نمونه‌ای از موقعیت دیگر ستون‌ها) در هر دو حالت سازه کامل و آسیب دیده، تحت اثر رکورد SYL و در جهت محور  $X$  پلان سازه رخ داده است. بیشترین میزان دوران ستون‌های گوشه تحت رکورد SYL در جهت محور  $X$  پلان سازه مطالعاتی به میزان ۰/۰۲۴ رادیان است.



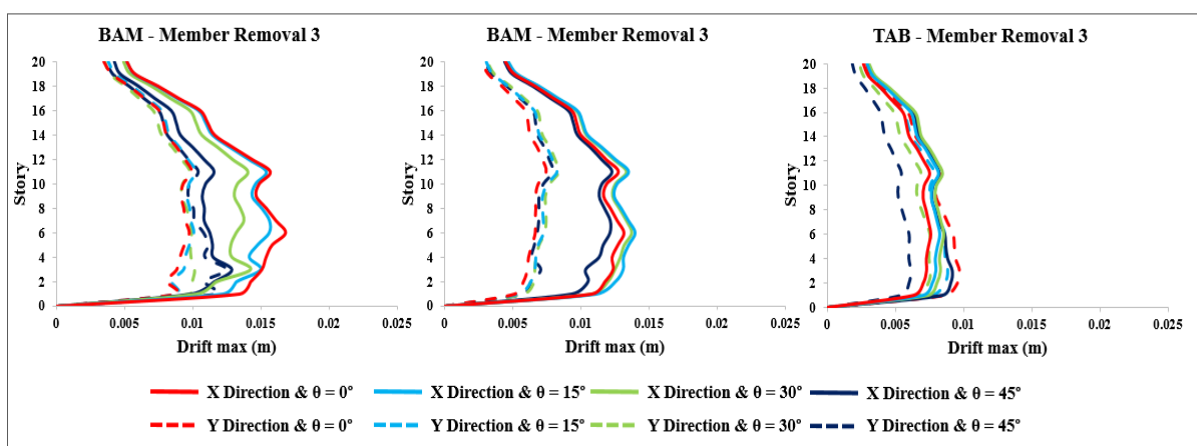
شکل ۱۰: نمودار پوش بیشینه دوران ستون‌های گوشه در قاب پیرامونی در دو جهت  $X$  و  $Y$  در سازه کامل ۲۰ طبقه تحت رکوردهای BAM، SYL و TAB با زوایای تابش مختلف (شکل‌های ۳ و ۵)



شکل ۱۱: نمودار پوش بیشینه دوران ستون‌های گوشه در قاب پیرامونی در دو جهت  $X$  و  $Y$  در سازه ۲۰ طبقه همراه با حذف ستون گوشه در تراز پایه تحت رکوردهای BAM، SYL و TAB با زوایای تابش مختلف (شکل‌های ۳ و ۵)



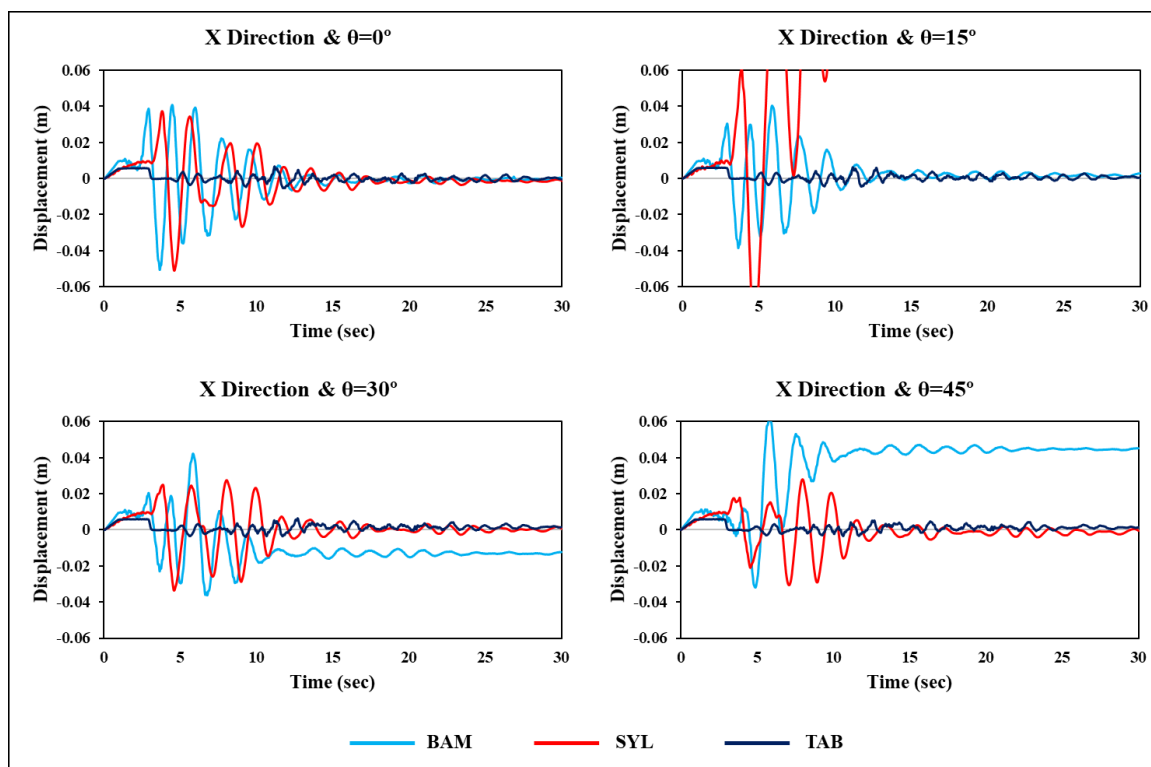
شکل ۱۲: نمودار پوش بیشینه دوران ستون‌های گوشه در قاب پیرامونی در دو جهت X و Y در سازه ۲۰ طبقه همراه با حذف ستون میانی در تراز پایه تحت رکوردهای BAM، SYL و TAB با زوایای تابش مختلف (شکل‌های ۳ و ۵)



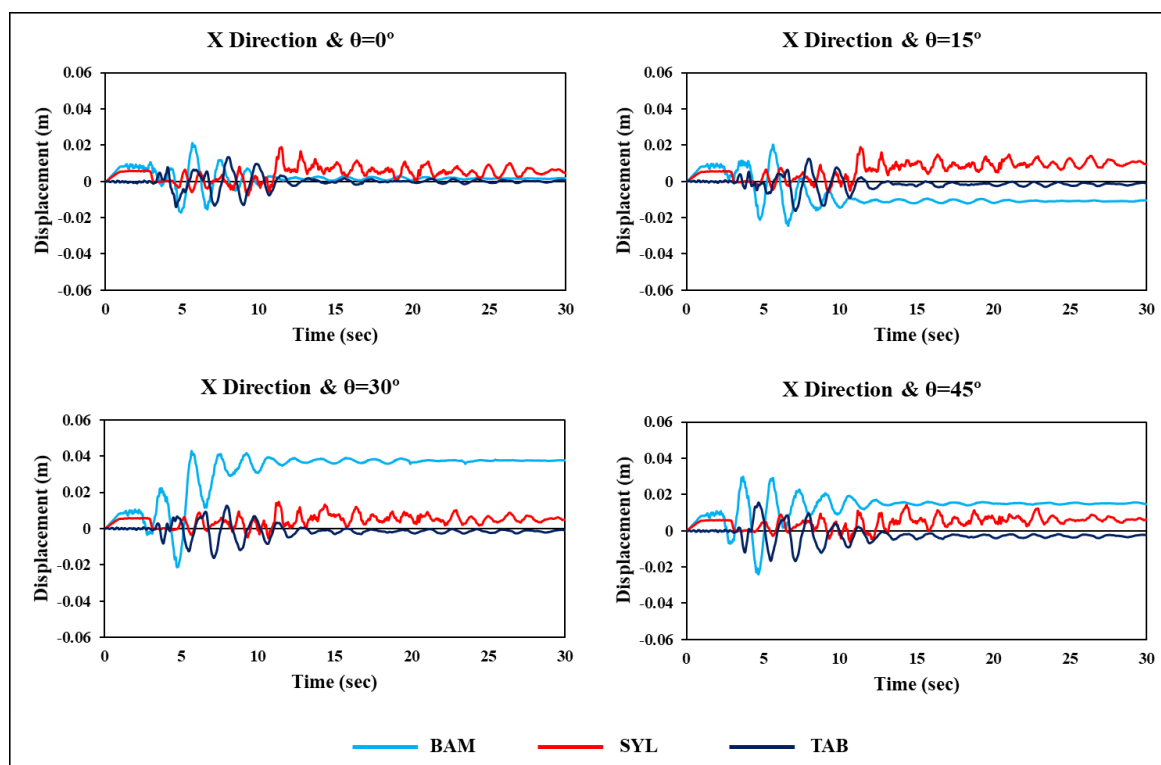
شکل ۱۳: نمودار پوش بیشینه دوران ستون‌های گوشه در قاب پیرامونی در دو جهت X و Y در سازه ۲۰ طبقه همراه با حذف ستون گوشه در تراز طبقه دهم تحت رکوردهای BAM، SYL و TAB با زوایای تابش مختلف (شکل‌های ۳ و ۵)

تغییر مکان قائم در محل حذف عضو (حذف ستون) در طول مدت زمان اعمال بار لرزه‌ای ناشی از رکوردهای BAM، SYL و TAB به سازه‌های مطالعاتی در شکل‌های ۱۴ تا ۱۶ نشان داده شده است. همان طور که در نمودارها مشخص است، گره بالایی ستون حذف شده تا زمان رسیدن به مرحله حذف کامل عضو دچار تغییر مکان قابل توجهی نشده است. سپس با گذر از این مرحله، گره مذکور به تدریج دچار جابجایی قائم شده و در نهایت با نزدیک شدن به زمان پایانی زلزله، دچار تغییر مکان دائمی می‌گردد. با بررسی نمودارهای جابجایی قائم در گره بالایی ستون حذف شده تحت زلزله‌های انتخابی، نتایج مشابهی استنباط می‌شود. نکته دیگر آن که بیشترین میزان تغییر مکان قائم تحت رکورد نیرومند SYL، در حالت زاویه تابش زلزله ۰ درجه و برای سازه سازه آسیب دیده (آرایش حذف ۱) اتفاق افتاده و مقدار این جابجایی در حدود ۲۰ سانتیمتر است. پدیدار شدن یک یا چند ساختار موجی شکل در تاریخچه زمانی تغییر مکان مربوط به یک رکورد نیرومند حوزه نزدیک نیز متأثر از پالس پر دامنه و پر یود بلند سرعت می‌باشد. نمود این فرآیند لرزه ای به صورت یک جنبش بسیار پرنرژی و ضربه‌ای زمین در ساختگاه پروژه خواهد بود. نمود این جنبش‌های ضربه‌ای بر روی تغییر مکان کلی سازه و مولفه‌های تغییر شکل المان‌های اسکلت مقاوم، بصورت نمودارهای حاوی ساختارهای موجی شکل پر دامنه، بویژه در محدوده پالس اصلی سرعت خواهد بود. بر این پایه،

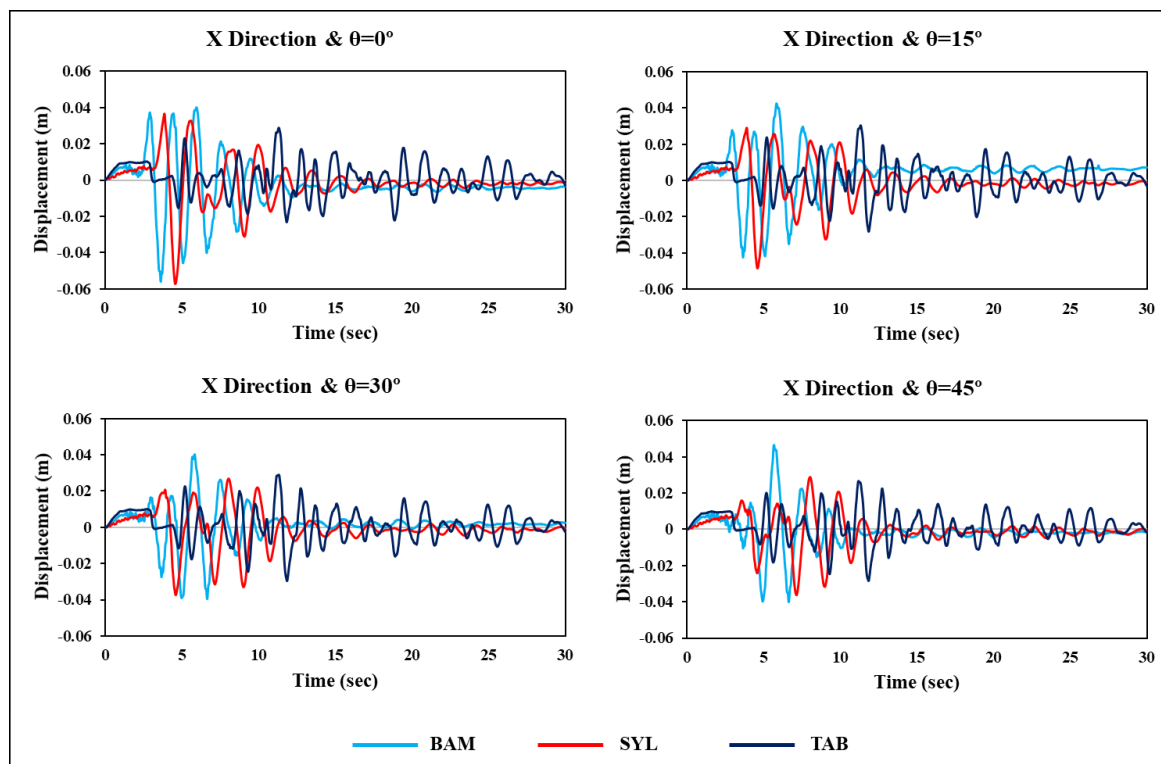
نتایج حاصل از مقایسه نمودارها نشان دهنده تاثیر بیشتر حذف ستون گوشه نسبت به دو حالت دیگر حذف عضو در میزان پاسخ سازه برای این پارامتر است.



شکل ۱۴: نمودار تاریخچه زمانی جابجایی قائم گره بالایی ستون حذف شده در سازه ۲۰ طبقه، همراه با حذف ستون گوشه در تراز پایه تحت رکوردهای انتخابی با زوایای تابش مختلف (شکل‌های ۳ و ۵)؛ (نمودار مربوط به حالت آرایش حذف ۱ عضو تحت رکورد SYL با زاویه تابش صفر درجه، دچار تغییر مکان دائمی قابل توجهی شده است. علت این جابجایی بزرگ نیز عدم تحمل اضافه بار وارده و تشدید مشخصات موضعی رفتار غیرخطی در محدوده و موقعیت حذف ستون می‌باشد)



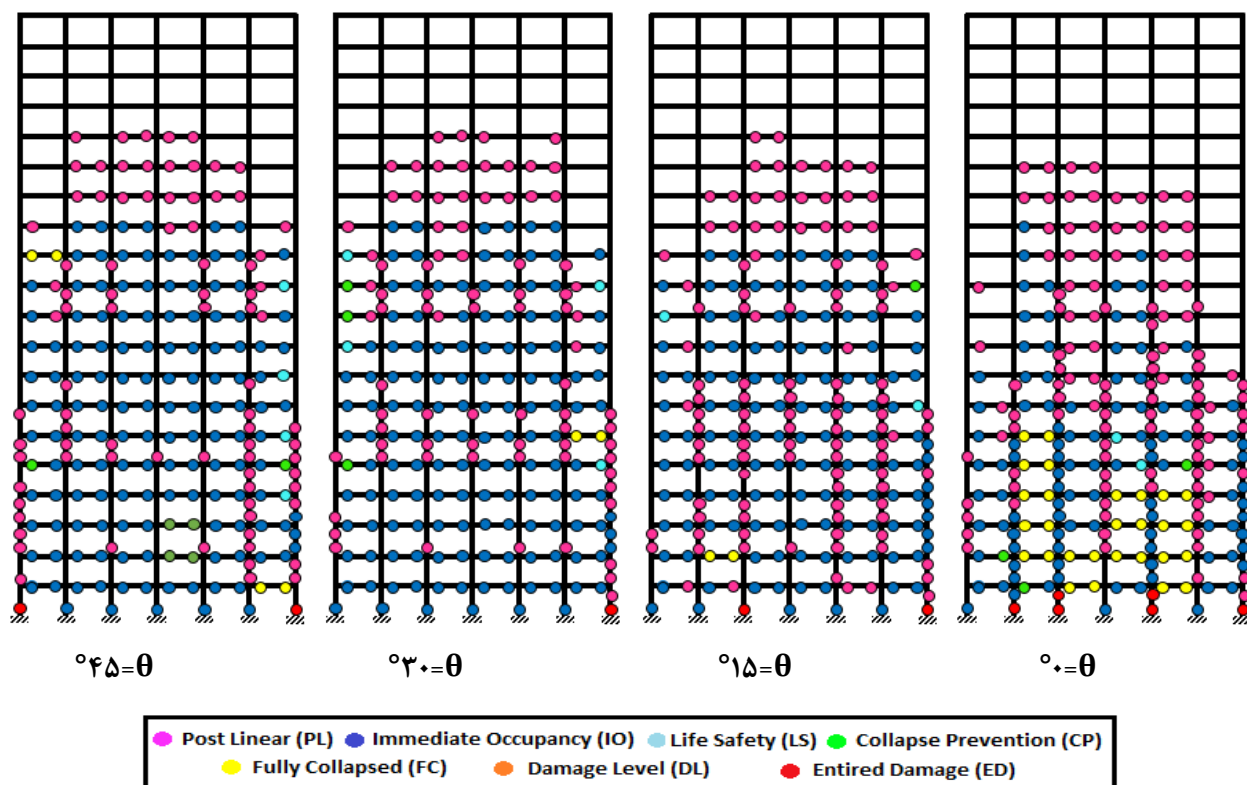
شکل ۱۵: نمودار تاریخچه زمانی جابجایی قائم گره بالایی ستون حذف شده در سازه ۲۰ طبقه، همراه با حذف ستون میانی در تراز پایه تحت رکوردهای انتخابی با زوایای تابش مختلف (شکل‌های ۳ و ۵)



شکل ۱۶: نمودار تاریخچه زمانی جابجایی قائم گره بالایی ستون حذف شده در سازه ۲۰ طبقه، همراه با حذف ستون گوشه در تراز طبقه دهم تحت رکوردهای انتخابی با زوایای تابش مختلف (شکل‌های ۳ و ۵)

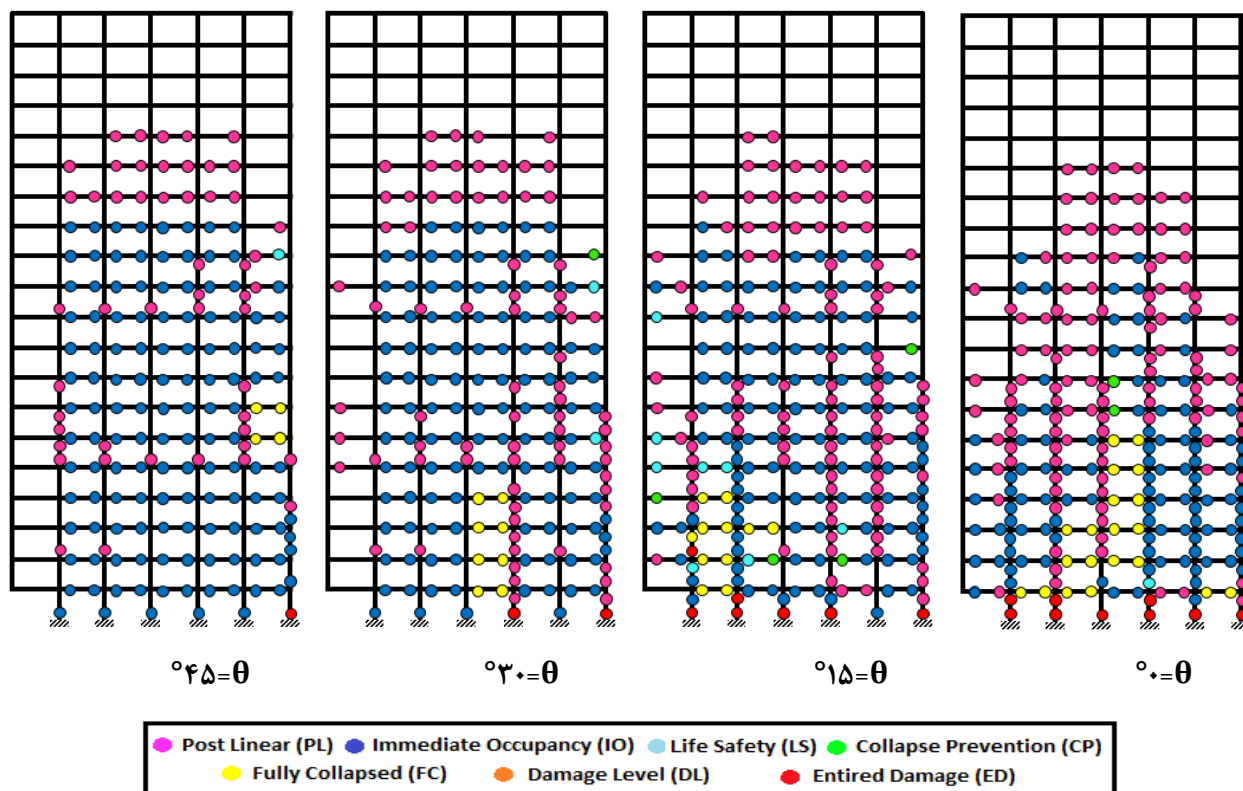
شکل‌های ۱۷ تا ۲۰ نمایش دهنده ساختار نهایی مکانیزم مفاصل تشکیل شده تحت تاریخچه زمانی رکورد BAM در قاب پیرامونی جهت Y سازه مطالعاتی است. تشکیل مفاصل پلاستیک در حوزه‌های با مشخصه رفتار غیرخطی صورت می‌گیرد. با توجه به شکل‌های زیر چیدمان نهایی مفاصل پلاستیک تشکیل شده در اسکلت مقاوم تحت رکورد BAM با هر چهار زاویه تابش زلزله و همچنین سه حالت سازه با حذف ستون‌های مختلف، نشان داده شده است. بر اساس بررسی دامنه تغییرات پارامترهای پاسخ، ملاحظه شد که پایداری سازه مطالعاتی در تمامی حالات بارگذاری لرزه ای برقرار بوده و ساختار رفتاری پیش‌سخت نیز حاکم باقی می‌ماند. برقراری این وضعیت در هر دو حالت اسکلت کامل و نیز آسیب دیده با حذف ستون و تحت اعمال زوایای مختلف تابش زلزله انتخابی دیده شد. قابل ذکر است که بیشترین تعداد مفاصل CP در ترازهای پایینی سازه‌های مطالعاتی و در نزدیک ستون حذف شده تشکیل گردید. آرایش پراکنده و کم تعدادی از مفاصل LS نیز در نیمه پایینی اسکلت سازه مطالعاتی پدیدار شد. همچنین، تحت هر سه رکورد وارده با زاویه تابش مختلف نیز در چند طبقه بالایی سازه (کامل و یا آسیب دیده) هیچ گونه مفصل غیرخطی ایجاد نشده است.

رکوردهای سه مولفه‌ای انتخابی، حاوی پالس‌های پر یود بلند و پرمایه در تاریخچه زمانی سرعت، همراه با اسپایک‌های پرنرژی شتاب می‌باشند. بازتاب اعمال این رکوردهای زلزله بر سازه مطالعاتی نیز به گونه‌ای است که پس از گذر از نخستین نقاط بیشینه در حوزه پیک‌های مثبت و منفی پالس سرعت، بروز اثرات ناشی از کنش ضربه‌ای زمین ساختگاه بر روی اسکلت مقاوم، سبب ایجاد رفتار لرزه‌ای با مشخصات غیرخطی هندسی-مادی خواهد شود. بروز این روند تشدید یافته نیز با تشکیل و افزایش سریع مولفه‌های پاسخ غیرخطی با دامنه بزرگ همراه خواهد بود. اثرات مذکور می‌تواند به شکل ایجاد حوزه‌های تسلیم موضعی و نیز گسترده، در المان‌های ستون باشد و روند نرم شدن اسکلت مقاوم را در پی داشته باشد. همچنین، برقراری شرط طراحی ستون قوی-تیر ضعیف نیز یک عامل مهم در حفظ پایداری سازه در بازه زمانی جنبش شدید زمین تحت اثرات نیرومند جهت‌داری پیش‌رونده و انتشار امواج لرزه‌ای ناشی از آن، برای حالت‌های وقوع حذف عضو می‌باشد.

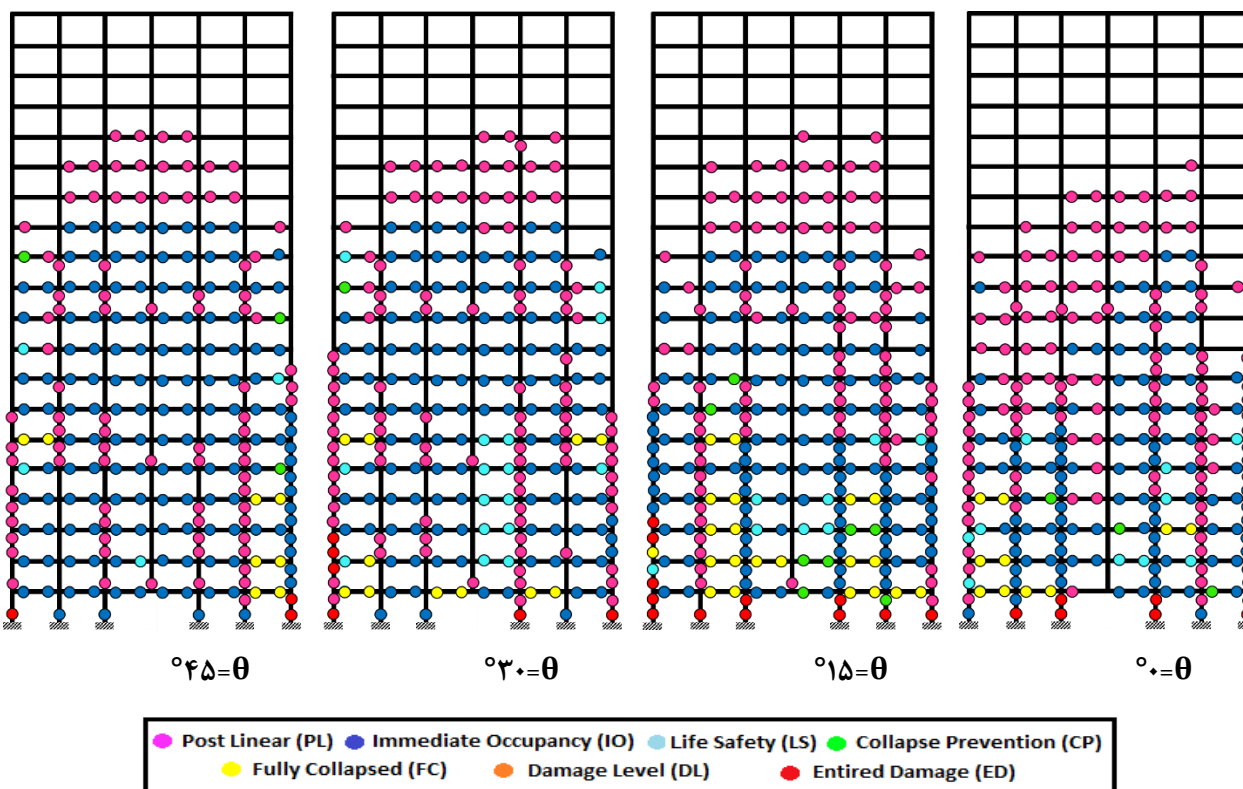


شکل ۱۷: مکانیزم مفاصل غیرخطی مربوط به چهار زاویه تابش  $\theta$  در سازه ۲۰ طبقه با اسکلت کامل تحت رکورد BAM

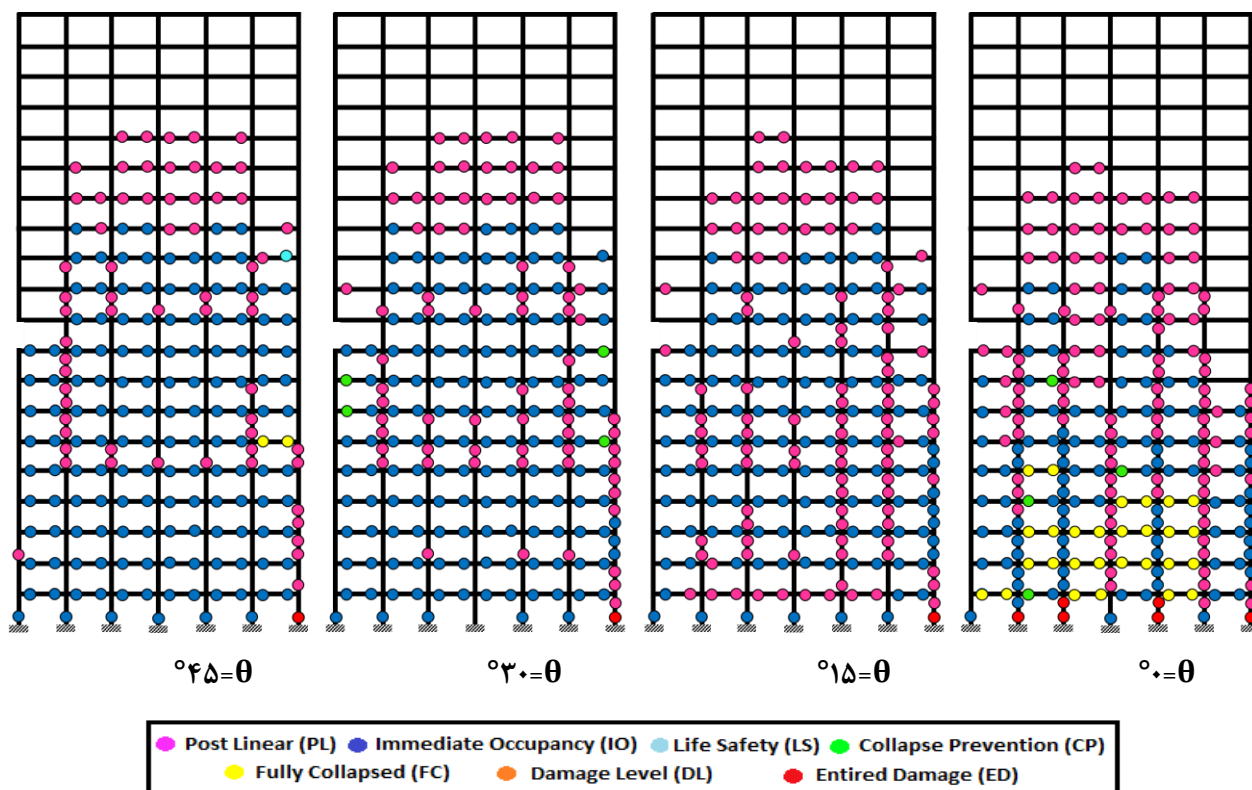




شکل ۱۸: مکانیزم مفاصل غیرخطی تحت چهار زاویه تابش  $\theta$  در سازه ۲۰ طبقه با حذف ستون گوشه در تراز پایه تحت رکورد BAM



شکل ۱۹: مکانیزم مفاصل غیرخطی مربوط به چهار زاویه تابش  $\theta$  در سازه ۲۰ طبقه همراه با حذف ستون میانی در تراز پایه تحت رکورد BAM



شکل ۲: مکانیزم مفاصل غیرخطی مربوط به چهار زاویه تابش  $\theta$  در سازه ۲۰ طبقه همراه با حذف ستون گوشه در تراز طبقه دهم تحت رکورد BAM

## ۶- نتیجه گیری

در این پژوهش، رفتار لرزه‌ای یک سازه مطالعاتی قاب خمشی محیطی دسته شده در دو حالت کامل و نیز آسیب دیده تحت مجموعه‌ای از رکوردها، همراه با بررسی اثرات زاویه تابش زلزله و فرآیند خرابی پیشرونده مورد ارزیابی قرار گرفت. رکوردهای انتخابی حاوی پالس بزرگ و اسپایک‌های پدمانه همراه آن در تاریخچه زمانی سرعت بوده و آنالیزهای غیرخطی تاریخچه زمانی تحت نگاشت‌های سه مولفه‌ای انجام گردید. پارامترهای پاسخ لرزه‌ای نیز شامل بیشینه دررفت جانبی، بیشینه دوران ستون‌های گوشه‌ای پلان، تاریخچه زمانی جابجایی قائم گره بالایی ستون حذف شده و آرایش تشکیل مفاصل غیرخطی تحت زوایای مختلف تابش زلزله مورد بررسی قرار گرفت.

بر پایه آورده‌های تحلیلی این تحقیق نتایج زیر حاصل شد:

۱- تغییرات دررفت جانبی طبقات به گونه‌ای است که به ویژه تحت رکوردهای نیرومند حاوی پالس‌های بزرگ سرعت، مقادیر بیشینه در نزدیکی ترازهای میانی اسکلت مقاوم اتفاق می‌افتد. دامنه عددی این پارامتر پاسخ در جهت Y که مولفه نیرومندتر زلزله اعمال می‌گردد، دارای مقادیر بالاتری نسبت به جهت X است. بررسی نمودارهای پاسخ سازه کامل و آسیب دیده، به جهت بررسی فرآیند خرابی پیشرونده نشان دهنده تاثیر نه چندان زیاد حذف ستون در پارامتر مذکور است. با این وجود ملاحظه شد که حذف ستون گوشه در تراز پایه موجب بروز دررفت بالاتری در سازه نسبت به حالات دیگر می‌شود.

۲- با توجه به ارزیابی تغییرات بیشینه دوران ستون‌های گوشه اسکلت سازه، یک فزونی نسبی در میزان این پارامتر با افزایش زاویه تابش زلزله از ۰ به ۴۵ درجه دیده می‌شود. همچنین این بررسی‌ها، نشان‌دهنده تاثیرات نه چندان زیاد و کم دامنه ناشی از حذف ستون در پارامتر پاسخ یاد شده است.

۳- با حذف ستون در اسکلت سازه، عضوهای متصل به ستون حذف شده دچار تغییر مکان‌های بزرگ می‌شوند. بررسی نمودارهای جابجایی قائم گره بحرانی تحت زلزله‌های انتخابی، نشان‌دهنده بیشتر بودن میزان این تغییر مکان‌ها در حالت حذف ستون گوشه نسبت به دو حالت مفروض دیگر است.

۴- چگونگی تشکیل ساختار و آرایش مفاصل غیرخطی در سازه‌های مطالعاتی، ارتباط دریافت و تقاضای شکل پذیری را به خوبی نمایش می‌دهد. بیشترین تعداد مفاصل پلاستیک با سطح عملکرد CP و فراتر از CP در ترازهای پایینی و نزدیک به ستون حذف شده در اسکلت سازه تشکیل شدند.

۵- عملکرد لرزه‌ای سازه مطالعاتی قاب خمشی محیطی دسته شده حتی با وجود حذف ستون برای ایجاد خرابی پیشرونده، بر اساس رعایت دو معیار محدودیت جابجایی نسبی جانبی طبقات و نیز اصل ستون قوی - تیر ضعیف در اتصالات، تحت اثر رکوردهای نیرومند زلزله با زوایای تابش مختلف نیز پایدار بوده و حذف عضو تغییرات چشمگیری در رفتار لرزه‌ای سازه ایجاد نمی‌نماید.

## مراجع

- [1]. Kim, J., & Park, J., (2008). Design of steel moment frames considering progressive collapse. *Steel and Composite Structures*, 8(1), 85-98.
- [2]. El-Tawil, S., & Li, H.H., (2013). Progressive collapse research: Current state and future needs. In *Advanced Materials Research* (Vol. 639, pp. 3-12). Trans Tech Publications.
- [3]. Kim, J., Park, J.H., & Lee, T.H., (2011). Sensitivity analysis of steel buildings subjected to column loss. *Engineering Structures*, 33(2), 421-432.
- [4]. Gurley, C., (2008). Progressive collapse and earthquake resistance. *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, 13(1), 19-23.
- [5]. Unified Facilities Criteria (UFC). 2005. Design of Buildings to Resist Progressive Collapse, (UFC4-023-03). Department of Defense
- [6]. US General Services Administration (US GSA). 2003. Progressive Collapse Analysis and Design Guidelines for New Federal Office Buildings and Major Modernization Projects. GSA.
- [7]. Kim, J., & An, D., (2009). Evaluation of progressive collapse potential of steel moment frames considering catenary action. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 18(4), 455-465.
- [8]. Fu, F., (2009). Progressive collapse analysis of high-rise building with 3d finite element modeling method. *Constructional Steel Research*, 65(6), 1269-1278.
- [9]. Fu, F., (2010). 3D nonlinear dynamic progressive collapse analysis of multi-storey steel composite frame buildings (parametric study). *Engineering Structures*, 32(12), 3974-3980.
- [10]. Khandelwal, K., El-Tawil, S., & Sadek, F., (2009). Progressive collapse analysis of seismically designed steel braced frames. *Constructional Steel Research*, 65(3), 699-708.
- [11]. Liu, M., (2011). Progressive collapse design of seismic steel frames using structural optimization. *Constructional Steel Research*, 67(3), 322-332.
- [12]. Kim, J., & Kong, J., (2013). Progressive collapse behavior of rotor-type diagrid buildings. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 22(16), 1199-1214.
- [13]. Kim, S.W., Lee, C.H., & Lee, K.K., (2014). Effects of composite floor slab on progressive collapse resistance of steel moment frames. *Journal of the Architectural Institute of Korea Structure and Construction*, 30(2), 3-10.
- [14]. PourAsil, M.B., Mohammadi, Y., & Gholizad, A., (2017). A proposed procedure for progressive collapse analysis of common steel building structures to blast loading. *KSCCE Journal of Civil Engineering*, 21(6), 2186-2194.
- [15]. Avanaki, M.J., & Estekanchi, H.E., (2012). Collapse analysis by endurance time method. *International Journal of Optimization in Civil Engineering*, 2(2), 287-299.
- [16]. Gioncu, V., & Mazzolani, F.M., (2006). Influence of earthquake types on the design of seismic resistant steel structures I, challenges for new design approaches. STESSA Conference, Yokohama, Japan.
- [17]. Mehrain, M., & Naeim, F., (2003). Exact three dimensional linear and nonlinear seismic analysis of structures with two-dimensional models. *Earthquake Spectra*, 19(4), 897-912.
- [18]. Haj Najafi, L., & Tehranizadeh, M., (2013). Evaluation of seismic behavior for moment frames and eccentrically braced frames due to near-field ground motions, *Asian Journal of Civil Engineering (BHRC)*, 14(6), 809-830.
- [19]. Hayden, C.P., Bray, J.D., & Abrahamson, N.A., (2014). Selection of near-fault pulse motions. *Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 140(7), DOI: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001129.
- [20]. Gioncu, V., Mosoarca, M., & Anastasiadis, A., (2014). Local ductility of steel elements under near-field earthquake loading. *Journal of Constructional Steel Research*, 101, 33-52.
- [21]. Iervolino, I., Manfredi, G., & Cosenza, E. (2006). Ground motion duration effects on nonlinear seismic response. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 35(1), 21-38.
- [22]. Stafford Smith, B., & Coull, A. (1991). Tall building structures: analysis and design.
- [23]. Iranian Standard No. 2800. (2014). Iranian code of practice for seismic resistant design of buildings, fourth edition, Road, Housing and Urban Development Research Center, Tehran, Iran.

- [24]. Iranian National Building Code. (2014). Steel Structures - Issue 10, Tehran, Iran: Bureau of National Building Regulations.
- [25]. Iranian National Building Code. (2014). Design Loads for Buildings - Issue 6, Tehran, Iran: Bureau of National Building Regulations.
- [26]. Alghasi, E. (2019). "Evaluation of dynamic instability of middle structures of steel modular moment frames under Impact loads caused by an earthquake with progressive collapse approach", MSc. Thesis, Kharazmi University, Faculty of Engineering, Tehran, Iran.
- [27]. FEMA 356, Federal Emergency Management Agency, 1998.
- [28]. FEMA 440, Improvement of Nonlinear Static Analysis Procedures, Applied Technology Council (ATC-55 Project), 2005.
- [29]. PEER Ground Motion Database, <http://peer.berkeley.edu>.
- [30]. SAP2000, Integrated Structural Analysis and Design Software. Berkeley, CA, 2000.
- [31]. CSI (2013). PERFORM-3D. Version 5.0.1. Computers and Structures, Inc. Berkeley, CA.
- [32]. Fu, F., (2012). Response of a multi-storey steel composite building with concentric bracing under consecutive column removal scenarios. *Constructional Steel Research*, 70, 115-126.
- [33]. Wang, Z., Carpenter, N.S., Zhang, L., Woolery, E.W., (2017). "Assessing potential ground motion hazards from induced earthquakes", *Natural Hazards Review (ASCE)*, 18(4), DOI: 10.1061/(ASCE)NH.1527-6996.0000264.
- [34]. Bradley, B.A., Pettinga D., Baker J.W., Fraser J., (2017). "Guidance on the utilization of earthquake-induced ground motion simulations in engineering practice", *Earthquake Spectra (EERI)*, 33(3), DOI: <https://doi.org/10.1193/120216EQS219EP>
- [35]. Whitney, R., (2019). "Quantifying near fault pulses using generalized Morse wavelets", *Journal of Seismology (Springer)*, DOI: <https://doi.org/10.1007/s10950-019-09858-7>
- [36]. Stephen, D., Lam, D., Forth, J., Ye, J., Tsavdaridis, K.D., (2019). "An evaluation of modelling approaches and column removal time on progressive collapse of building", *Constructional Steel Research (Elsevier)*, 153, 243-253, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2018.07.019>
- [37]. Wang, F., Yang, J., Pan, Z., (2020). "Progressive collapse behaviour of steel framed substructures with various beam-column connections, *Engineering Failure Analysis (Elsevier)*, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.104399>
- [38]. Vaseghi Amiri, J., Davoodi, M.R., Sahafi, A., (2008) "Simulation of near-fault ground motions with equivalent pulses and compare their effects on MRF structures", 14th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China.
- [39]. Guan, X., Burton, H., Sabol, T. (2020). Python-based computational platform to automate seismic design, nonlinear structural model construction and analysis of steel moment resisting frames. *Engineering Structures*, 224. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111199>
- [40]. Kalkan, E., & Kunnath, S.K., (2006). "Effects of fling step and forward directivity on seismic response of buildings", *Earthquake Spectra*, 22(2), 367-390.