

ارزیابی لرزه‌ای فروریزش پیش‌رونده در ساختمان‌های کوتاه‌مرتبه ۳ طبقه بتن مسلح ناشی از حذف ستون میانی

سمیه کریمیان^{*۱}

۱- دانشگاه آزاد اسلامی، واحد اسلامشهر

چکیده

فروریزش پیش‌رونده خرابی تمام یا بخش عمده‌ای از یک سازه است که ناشی از گسیختگی موضعی در قسمت کوچکی از سازه شروع شده، در بخش‌های دیگر سازه ادامه یافته و بدین ترتیب فروریزش در المان‌های سازه، یکی پس از دیگری بیشتر و بیشتر می‌گردد. به گونه‌ای که سیستم سازه‌ای باقیمانده توانایی تحمل بارهای جانبی و ثقلی را نداشته باشد. لذا پیش‌بینی حاشیه امنیت در ساختمان‌ها در مقابل فروریزش پیش‌رونده ناشی از بار زلزله یکی از موضوعات مهم در مهندسی سازه می‌باشد. در این مقاله، مدل‌سازی چگونگی پیشرفت و گسترش آسیب در المان‌های سازه‌ای، یکی پس از دیگری، در ساختمان‌های قاب خمشی بتن مسلح کوتاه‌مرتبه تحت بار زلزله انجام یافته و تاثیر حذف ستون در نحوه گسترش و پیشرفت خرابی بررسی گردید. بدین منظور، با استفاده از نتایج تحلیل‌های تاریخیچه زمانی غیرخطی، پتانسیل خرابی پیش‌رونده یک ساختمان کوتاه‌مرتبه بتن مسلح ۳ طبقه با قاب خمشی معمولی، ناشی از حذف ستون تحت شتاب‌نگاشت‌های دو مولفه‌ای پیشنهاد شده دستورالعمل FEMA_P695 مورد بررسی و مطالعه قرار گرفت. بر اساس نتایج تحقیق حاضر، توزیع شکست در خرابی پیش‌رونده متأثر از نوع شتاب‌نگاشت نبوده و الگوی خاص و ویژه‌ای را دنبال می‌کند. شکست در مراحل اولیه توزیع، در تیرهای اطراف و فوقانی محل حذف ستون رخ داده، سپس به صورت عمودی در ارتفاع سازه از سقف همکف به سقفهای فوقانی منتقل شده و در نهایت به صورت افقی در طبقات توزیع یافته است. لذا پیشنهادات و راهکارهایی به منظور بهسازی لرزه‌ای ساختمان‌های کوتاه‌مرتبه بتن مسلح در برابر خرابی پیش‌رونده ارائه شده و همچنین به منظور پیش‌بینی توزیع و گسترش خرابی پیش‌رونده ناشی از بار زلزله، الگوهای رفتاری توزیع گسیختگی ارائه گردیده است.

کلمات کلیدی: فروریزش پیش‌رونده، توزیع خرابی، قاب خمشی معمولی، ساختمان کوتاه‌مرتبه بتن مسلح، حذف ستون، تحلیل تاریخیچه زمانی غیر خطی

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
10.22065/JSCE.2018.142459.1617	doi: 10.22065/JSCE.2018.142459.1617	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
		۱۳۹۹/۰۱/۱۵	۱۳۹۹/۰۱/۱۵	۱۳۹۷/۰۹/۰۹	۱۳۹۷/۰۷/۰۸	۱۳۹۷/۰۵/۱۴
سمیه کریمیان					*نویسنده مسئول:	
S_Karimiyan@iaau.ac.ir					پست الکترونیکی:	

Seismic Progressive Collapse Evaluation in 3 Story Reinforced Concrete Buildings due to Inner Column Removal

Somayyeh Karimiyan

Department of Civil Engineering, Islamshahr Branch, Islamic Azad University, Islamshahr, Iran.

ABSTRACT

Progressive collapse in the structures is defined failure of the entire or major part of a structure that has initiated from the small part of the building, continued in the other structural elements and in this way, progressive collapse become larger and larger in the structural elements, one after another. Finally, the remaining structural system will not be able to resist the lateral and gravity loads. So, the prediction of safety margin in buildings against the progressive collapse due to the earthquake loads is one of the important issues in the earthquake and structural engineering. In this paper, modeling of the progress and distribution of the collapse in the elements of the structures, one after another, was carried out in moment resisting reinforced concrete short buildings due to the earthquake loads and effects of the column removal have been investigated on the progress and propagation of the collapse. For this purpose, the progressive collapse potential of a 3 story reinforced concrete building with ordinary moment resisting frame has been evaluated due to the column removal in presence of FEMA_P695 two component ground motions. According to the results of the nonlinear time history analyses, collapse distribution is not affected by the earthquake records in the progressive collapse and follows a special pattern. In the early stages of distribution, collapse occurred in the beams surrounding and upper parts of the column removal area, then transferred at the height of the structure from the first ceiling to the upper ceiling, vertically and eventually, distributed horizontally in the stories. Therefore, recommendations and suggestions have been presented for seismic optimization of the reinforced concrete short buildings against the progressive collapse. Also, distribution patterns of the collapse have been presented to predict the collapse propagation due to the column removal in presence of the earthquake loads.

ARTICLE INFO

Receive Date: 05 August 2018

Revise Date: 30 September 2018

Accept Date: 30 November 2018

Keywords:

*Progressive collapse
Collapse Distribution
Reinforced Concrete Short
Building Column removal
Nonlinear Time History
Analyses*

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/JSCE.2018.142459.1617

*Corresponding author: Somayyeh Karimiyan

Email address: S_Karimiyan@iiu.ac.ir

۱- مقدمه

فروریزش پیش‌رونده عبارتست از خرابی جزئی و موضعی اولیه که منجر به خرابی بخش بزرگی از سازه و یا کل آن می‌شود. به گونه‌ای که خرابی نهایی تناسبی با خرابی اولیه ندارد. این پدیده ناشی از هرگونه تهدید و یا بارگذاری مانند انفجار بمب، گاز، ضربه ناشی از برخورد با کشتی و یا هواپیما، زلزله، آتش سوزی، اضافه بارهای تصادفی، و غیره امکان رخداد دارد. پیشرفت در تکنیک‌های تحلیل و طراحی سازه‌ها و گسترش مفاهیم طراحی بر اساس عملکرد همزمان با مشاهده فروریزش سازه‌ها در اثر حوادث طبیعی و غیر طبیعی، محققان را به بررسی سازه‌ها در شرایط غیر عادی که در طراحی‌های معمول در نظر گرفته نمی‌شود سوق داده‌است.

۲- مروری بر مطالعات گذشته

تحقیقات اخیر حاکی از آن است که اکثر مطالعات صورت گرفته در زمینه فروریزش پیش‌رونده پیرامون موضوعاتی نظیر انفجار، برخورد وسائط نقلیه و تصادف متمرکز شده‌است و از آنجائیکه ایران کشوری لرزه خیز است و بخش مهمی از ساختمان‌های قدیمی و سنتی پر اهمیت موجود در کشور نسبتاً کوتاه‌مرتبه و دارای سیستم قاب خمشی معمولی است، در این مطالعه خرابی پیش‌رونده ناشی از بار زلزله در ساختمان‌های بتن مسلح کوتاه‌مرتبه مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته‌است. نظر به اهمیت این موضوع، در آیین‌نامه‌ها و دستورالعمل‌های طراحی نیز مبحث خرابی پیش‌رونده گنجانده شده‌است. Griffiths و موسسه استاندارد ساختمان انگلستان (HSMO) در سال ۱۹۶۸، اولین تحقیقات در زمینه تخریب پیش‌رونده را ارائه دادند و در آن به بررسی و توضیح تخریب پیش‌رونده پرداختند [۱].

سپس Ferahian در سال ۱۹۷۲ تغییراتی را که در آیین‌نامه‌های BS و کانادا در این زمینه اعمال شده بود بررسی کرد [۲]. پیرو حملات تروریستی بسیار زیاد رخ داده در سال‌های گذشته و در کشورهای مختلف، در آیین‌نامه‌های مثل BS59502001، GSA2003 و ODPM2004 بررسی‌ها، بازبینی‌ها و اصطلاحات بی‌شماری در ارتباط با فروریزش پیش‌رونده لحاظ شده، با این حال برخی موارد اضافه شده در این آیین‌نامه‌ها استاندارد نیستند [۳]. در Unified Facilities Criteria (UFC) [۴] نیز روش‌هایی مانند روش مقاومت موضعی اصلاح شده، روش مسیر جایگزین بار و روش نیروی کلافی به منظور مقاومت در برابر خرابی پیش‌رونده معرفی شده‌است. استفاده از روشهای مذکور منجر به افزایش درجه نامعینی، مقاومت، شکل‌پذیری و یکپارچگی اعضای سازه شده و بدین ترتیب از احتمال بروز خرابی پیش‌رونده در سازه‌ها کاسته می‌شود. در این مرجع سه روش نیروی کلافی (Tie force (TF)، روش مسیر جایگزین (Alternate path (AP) و روش مقاومت موضعی بهبود یافته (Enhanced local resistance (ELR) به منظور مقاومت در برابر خرابی پیش‌رونده معرفی شده‌است. استفاده از روشهای مذکور منجر به افزایش درجه نامعینی، مقاومت، شکل‌پذیری و یکپارچگی اعضای سازه شده و بدین ترتیب احتمال بروز خرابی پیش‌رونده در سازه‌ها کاهش می‌یابد. دو شیوه جامع طراحی نیز جهت مقاومت در برابر خرابی پیش‌رونده در این مرجع ارائه شده‌است: روش طراحی مستقیم و روش طراحی غیر مستقیم. در روش طراحی مستقیم موضوع مقاومت در برابر فروریزش پیش‌رونده در طول مراحل طراحی به صورت ملاحظات صریح مقاومتی مورد توجه قرار می‌گیرد. این روش شامل دو روش مسیر جایگزین و مقاومت موضعی بهبود یافته‌است. در روش مسیر جایگزین، در صورت حذف المانهای سازه‌ای باربر تحت بار زلزله، مسیرهای جایگزین باربر دیگری جهت افزایش مقاومت و پایداری سازه، در تحمل بار، وارد عمل شده و مشارکت می‌کنند. در روش مقاومت موضعی بهبود یافته، بخشی از سازه که به صورت موضعی آسیب دیده‌است، مقاومسازی می‌گردد. در روش طراحی غیر مستقیم مقاومت در برابر فروریزش پیش‌رونده، غیر صریح، با ایجاد حداقل سطحی از شکل‌پذیری، مقاومت و پیوستگی تامین می‌گردد که این روش شامل روش نیروی کلافی است. در مطالعه حاضر، پس از شبیه‌سازی مراحل فروریزش پیش‌رونده در المانها، یکی پس از دیگری، سه روش پیشنهادی فوق جهت مقاومسازی سازه مورد مطالعه در برابر فروریزش پیش‌رونده ناشی از اثر توامان حذف ستون و بارزلزله پیشنهاد شده‌است.

LU و همکاران در سال ۲۰۰۸ به شبیه سازی فروریزش پیش‌رونده ناشی از بار زلزله در قاب‌ها و دیوارهای برشی سازه‌های بتن آرمه پرداختند. در این فرایند رفتار پرئودیک المان‌های سازه تحت کوپل نیروی محوری، لنگر خمشی و نیروی برشی، فروپاشی اجزای سازه در حالات حدی به همراه برخورد بین المان‌های تیر و ستون سازه در طول شکست، با استفاده از المان‌های فایبری و پوسته‌ای چند لایه، شبیه‌سازی گردید [۶و۵].

در سال ۲۰۱۲، جهت بررسی پتانسیل فروریزش پیش‌رونده از روش مسیر جایگزین استفاده شد و پایداری کلی قاب‌های خمشی و غیرخمشی در برابر بار زلزله ارزیابی گردید. نتایج نشان داد که بررسی پاسخ کلی سازه جهت ارزیابی مکانیسم فروریزش پیش‌رونده ضروری بوده و فروریزش پیش‌رونده باید تحت بارهای لرزه‌ای، ضربه و انفجار ارزیابی گردد [۷].

در سال ۲۰۱۲، مقاومت سازه‌ها در برابر فروریزش پیش‌رونده از طریق مقایسه و بررسی مکانیسم‌های شکست ناشی از بار زلزله و بار انفجار به روش سفارش شده در دستورالعمل GSA ارزیابی گردید. نتایج حاکی از آن بود که آسیب ناشی از هر دو بار انفجار و زلزله منجر به حذف اعضای باربر در سیستم سازه‌ای می‌گردد. همچنین بررسی مکانیسم فروریزش پیش‌رونده در برابر بار زلزله از اهمیت زیادی برخوردار است و جهت افزایش مقاومت سازه در برابر فروریزش پیش‌رونده، می‌بایست شکل پذیری در دهانه‌های شامل ستون‌های حذف شده ارزیابی گردد [۸]. Yi و همکاران در سال ۲۰۱۱ جهت بررسی مکانیسم خرابی پیش‌رونده، از روش مسیر جایگزین در دو نوع دال درجا ریخته و همچنین دال غیر یکپارچه با مقاومت‌های مختلف لرزه‌ای استفاده نمودند. نتایج حاصل از تحلیل‌های تاریخچه زمانی غیر خطی نشان داد که مقاومت تمامی المان‌های سازه‌ای اعم از تیرها و ستون‌ها در برابر خرابی پیش‌رونده مشارکت داشته و عملکرد زنجیره‌ای در سازه‌های بتن آرمه مقاومت سازه را در برابر خرابی پیش‌رونده افزایش می‌دهد. همچنین عدم کفایت سختی جانبی در ستونها منجر به افقی شدن توزیع شکست در طبقات می‌گردد [۹]. در سال ۲۰۱۶، Li و Jian با استفاده از روش اجزا محدود و یک تست استاتیکی، مکانیسم خرابی پیش‌رونده یک قاب بتن مسلح را تحت جابجایی عمودی یکنواخت ستون کناری جهت شبیه سازی حذف ستون کناری در یک مدل آزمایشگاهی با مقیاس ۱/۳ بررسی نمودند. بررسی موده‌های شکست حاکی از آن است که شکست در تیرها و دال‌های مجاور ستون حذف شده رخ می‌دهد. همچنین در تیرها و دال‌های قاب ابتدا عملکرد زنجیره‌ای و سپس کشش صفحه در تغییر شکل‌های زیاد رخ می‌دهد. در نهایت بر اساس نتایج محاسباتی و آزمایشگاهی، یک روش ساده شده محاسباتی جهت عملکرد زنجیره‌ای و عملکرد کششی، در تغییر شکل‌های زیاد پیشنهاد نمودند [۱۰].

در سال ۲۰۱۶، Lin و همکارانش به بررسی خرابی پیش‌رونده در ساختمان‌های ۶ طبقه بتن مسلح طراحی شده در برابر زلزله پرداختند. تحلیل منحنی‌های شکنندگی و بررسی موده‌های شکست حاکی از آن است که طراحی در برابر خرابی پیش‌رونده موجب موده‌های نامناسب شکست (تیر قوی- ستون ضعیف) تحت بار زلزله می‌گردد و لذا متعاقباً، طراحی مجدد در برابر بار زلزله ضروری خواهد بود. بنابراین یک روش طراحی جامع و یکپارچه برای مقاومت در برابر خرابی پیش‌رونده و بار زلزله ضروری است. گرچه میزان خرابی پیش‌رونده در سازه‌های طراحی شده در برابر زلزله در مقایسه با دیگر سازه‌ها کمتر است [۱۱].

در سال ۲۰۱۶، Usefi و همکاران به مقایسه سناریوی خرابی پیش‌رونده به دو روش آزمایشگاهی و تحلیل اجزای محدود در ساختمان‌های بتن مسلح پرداختند. مقایسه کیفی نتایج بیانگر وجود تطابق مناسب بین نتایج آزمایشگاهی و نتایج بدست آمده از روش اجزای محدود است. همچنین مقایسه عددی نتایج حاکی از توانمندی روش اجزای محدود جهت تخمین و پیش بینی رفتار سازه‌های بتن آرمه در خرابی پیش‌رونده است [۱۲].

در سال ۲۰۱۷، Ibrahim و همکارانش به مطالعه و مقایسه خرابی پیش‌رونده در قاب خمشی بتن مسلح ۴ طبقه ناشی از بار انفجار پرداخته و اذعان نمودند که نوع مقطع انتخابی در نظر گرفته شده جهت ستون‌ها در مقاومت سازه در برابر خرابی پیش‌رونده تعیین‌کننده-

است. نتایج نشان داد که تغییر در طراحی ستون‌های بیرونی، خصوصا زمانی که از مقاطع لوله‌ای فولادی پر شده از بتن استفاده گردد، مقاومت سازه را در برابر خرابی پیش‌رونده افزایش می‌دهد [۱۳]. مطالعات بسیار دیگری در حوزه بررسی مکانیسم فروریزش پیش‌رونده، تحت بارگذاری ضربه و یا انفجار صورت پذیرفته است [۱۴، ۱۵، ۱۶، ۱۷، ۱۸، ۱۹]. همچنین تحقیقاتی نیز در سازه‌های بتن مسلح پیچشی ناشی از بارگذاری زلزله صورت گرفته است [۲۰، ۲۱، ۲۲، ۲۳، ۲۴، ۲۵، ۲۶، ۲۷، ۲۸] که جهت راستی آزمایی و صحت سنجی، در مدلسازی شکست از این مقالات استفاده شده است. در حالیکه فروریزش پیش‌رونده ناشی از حذف ستون تحت بارگذاری زلزله تاکنون مطالعه نشده است. تفاوت مطالعه حاضر با دیگر تحقیقات صورت گرفته ناشی از بارگذاری زلزله در این است که در تحلیل‌های معمول و مرسوم لرزه‌ای که تا کنون صورت گرفته است، معیار خاتمه تحلیلها، خرابی اولین المان از سازه بوده و چگونگی گسترش و توزیع گسیختگی پی در پی و یا به عبارتی پیش‌رونده بودن خرابی در اعضای سازه مطالعه و بررسی نشده است. در حالیکه در مطالعه حاضر، چگونگی گسترش و توزیع شکست در دیگر اعضای سازه مطالعه و بررسی شده است. به عبارت دیگر مدلسازی چگونگی گسترش و پیشرفت شکست در اعضای سازه‌ای، یکی پس از دیگری، در ساختمانهای بتن مسلح تحت اثر توامان بار زلزله و حذف ستون، برای نخستین بار، در مطالعه حاضر صورت گرفته است. لذا در متن مقاله نیز ادعای نویسنده در خصوص بررسی فروریزش پیش‌رونده، ناشی از حذف ستون تحت بارگذاری زلزله می‌باشد که تاکنون مطالعه نشده است. بدین ترتیب توسعه نحوه مدلسازی و تحلیل تخریب پیش‌رونده لرزه‌ای ناشی از حذف ستون در المانهای سازه‌ای یکی پس از دیگری، و همچنین ارائه الگوهای رفتاری توزیع شکست، جهت پیش‌بینی فروریزش پیش‌رونده لرزه‌ای در سازه‌های مشابه که از نتایج این تحقیق است در دیگر مطالعات گذشته بررسی نگردیده است.

در سال ۲۰۱۷، Krishna و همکاران به بررسی و مقایسه میزان خرابی پیش‌رونده ناشی از حذف ستون در مکان‌های گوشه، کناری و میانی ساختمان‌های بتن مسلح نامتقارن میان مرتبه مطابق با دستورالعمل GSA پرداختند. نتایج حاکی از آن است که از میان حالات حذف ستون، میزان خرابی پیش‌رونده در حالت حذف ستون میانی در مقایسه با دیگر حالات، بیشتر است. همچنین خرابی در تیرهای سازه‌های نامتقارن هندسی به صورت تصادفی توزیع شده است و در نهایت روش مسیر جایگزین برای جلوگیری از خرابی پیش‌رونده پیشنهاد شده است [۳۰].

در سال ۲۰۱۷، Yenidogan و همکاران به بررسی خرابی پیش‌رونده ناشی از بار زلزله به روش آزمایشگاهی پرداختند. بدین روش که عملکرد یک سازه بتن مسلح چند طبقه را به وسیله میز لرزان مورد آزمایش و مطالعه قرار دادند. نتایج حاکی از خرابی نسبتا شدید در پای ستون‌ها بوده و ضمن ارائه روش طراحی عملی جهت مقاومت در برابر خرابی پیش‌رونده لرزه‌ای، درک عمیقی از مکانیزم خرابی پیش‌رونده در سازه‌های بتن مسلح قاب خمشی در حین زلزله‌های قوی ارائه نموده‌اند [۳۱].

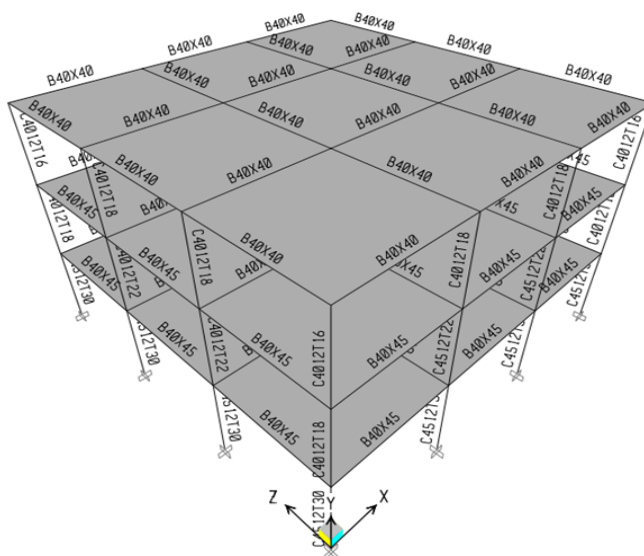
در سال ۲۰۱۷، Thombare و همکاران به تحلیل استاتیکی غیرخطی خرابی پیش‌رونده سازه‌های بلند مرتبه ۱۲ طبقه بتن مسلح ناشی از حذف ستون مطابق با دستورالعمل GSA پرداختند. سازه‌های مذکور دارای ۶ دهنه در جهت X، ۵ دهنه در جهت Y، طول دهانه‌ها ۳ متر و طراحی شده مطابق با آیین نامه هند بود. نتایج تحلیل استاتیکی غیر خطی نشان داد که در خرابی پیش‌رونده، حذف ستون میانی بحرانی تر از حذف ستون در دو موقعیت دیگر (گوشه و کناری) است [۳۲].

در سال ۲۰۱۶، سلیمانی و اصفهانی، اثر غشایی دال، مقاومت بتن و ضخامت دال را در جلوگیری از خرابی پیش‌رونده پس از حذف یک ستون میانی مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که اثر غشایی دال که معمولا در طراحی لحاظ نمی‌گردد می‌تواند به طرز چشمگیری مقاومت سازه را در برابر خرابی پیش‌رونده افزایش دهد. همچنین با افزایش مقاومت بتن و ضخامت دال نسبت به حداقل‌های پیشنهادی در آیین نامه‌ها می‌توان احتمال خرابی پیش‌رونده را در سازه‌ها به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش داد [۳۳].

در ادامه مطالعات قبلی، در این مقاله جهت بررسی و مطالعه خرابی پیش‌رونده ساختمان‌های کوتاه‌مرتبه، به عنوان نمونه یک ساختمان سه طبقه بتن مسلح با قاب خمشی معمولی در نظر گرفته شده‌است. سپس فروریزش پیش‌رونده، توزیع و گسترش خرابی از اولین المان تا خرابی بخش بزرگی از سازه و یا ناپایداری آن ناشی از حذف ستون میانی در طبقه همکف از طریق مقایسه نتایج حاصل از تحلیل‌های تاریخیچه زمانی غیرخطی ناشی از شتاب‌نگاشت‌های دو مولفه‌ای مطالعه شده‌است. نوآوری این تحقیق تعیین الگوی توزیع گسیختگی و پیش‌بینی نحوه تخریب پیش‌رونده در ساختمان‌های کوتاه مرتبه بتن مسلح تحت تأثیر حذف ستون میانی است. به طوریکه با پیش‌بینی الگوی خرابی پیش‌رونده می‌توان نقاط ضعف سازه را در مقاومت در برابر خرابی پیش‌رونده مشخص نموده و همچنین در طراحی سازه‌ها در برابر فروریزش پیش‌رونده راهکارهایی به منظور تقویت و بهسازی ساختمان‌ها ارائه نمود. همچنین در مطالعه حاضر علاوه بر اینکه مدل سه بعدی و چند درجه آزاد است، توامان اثر بار زلزله و حذف ستون با همدیگر بررسی شده‌است. همانطور که می‌دانیم سازه‌های با قاب خمشی معمولی در برابر بار زلزله مقاوم نیستند. در این تحقیق فرض شده‌است که ستون میانی ناشی از مشکلات محاسباتی و یا اجرایی مقاوم نبوده و تحت شوک‌های اولیه زلزله از سیستم سازه‌ای حذف شود. سپس چگونگی توزیع شکست و فروریزش پیش‌رونده پس از حذف ستون ناشی از شوک‌های شدیدتر زلزله مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته است. به عبارت دیگر هم اثر بار زلزله و هم اثر حذف ستون، توامان با یکدیگر بررسی و نتایج ارائه شده‌است. از دیگر نوآوری‌های این مطالعه می‌توان به مدلسازی نحوه گسترش و پیشرفت گسیختگی در اعضای تیر و ستون سازه به صورت متوالی، یکی پس از دیگری در اعضای ساختمان‌های بتن مسلح اشاره نمود که برای نخستین بار است که در این مطالعه بررسی می‌گردد. همچنین در تحلیل‌های مرسوم لرزه‌ای که تا کنون صورت گرفته‌است، معیار خاتمه تحلیل‌ها، خرابی اولین المان از سازه بوده و چگونگی گسترش و توزیع گسیختگی پی در پی و یا به عبارتی پیش‌رونده بودن خرابی در اعضای سازه مطالعه و بررسی نشده است. توسعه نحوه مدلسازی مکانیسم فروریزش پیش‌رونده لرزه‌ای ناشی از حذف ستون، ارائه الگوهای پیش‌بینی توزیع گسیختگی و متعاقباً تخمین حاشیه ایمنی در ساختمان‌های مشابه از دیگر نوآوری‌های این تحقیق است. در این مقاله از منحنی رفتاری اصلاح شده ایبارا-مدینا - کراوینکلر (IMK) [۳۴] جهت مدلسازی شکست در خرابی پیش‌رونده استفاده شده‌است.

۳- سازه مبنای مطالعه

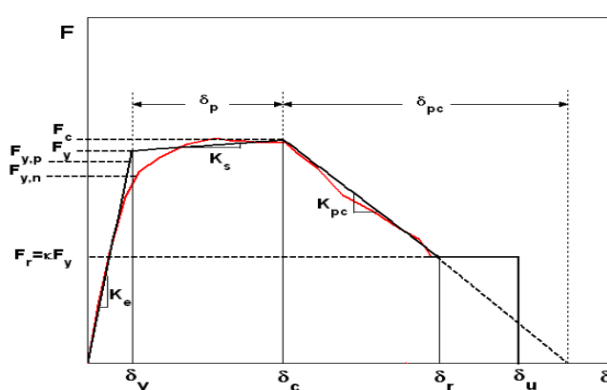
سازه مبنای مطالعه، سازه کوتاه‌مرتبه متقارن سه طبقه بتن مسلح با قاب خمشی معمولی، دارای سه دهانه با طول ۵ متر، ارتفاع طبقات ۳/۵ متر و طراحی شده بر اساس آیین‌نامه ۱۴-۳۱۸ ACI است. بار مرده و زنده طراحی به ترتیب ۵/۳ و ۱/۹۶ KN/m²، ضریب برش پایه طرح ۰/۲۱۵۹ و سقف‌ها به صورت دیافراگم صلب در نظر گرفته شده‌است. مشخصات سازه مذکور به نحوی انتخاب شده‌است که نتایج حاصل از این تحلیل‌ها برای طیف وسیعی از ساختمان‌های متداول کوتاه‌مرتبه سه طبقه قابل تعمیم است. شایان ذکر است که در این مدل سازه‌ای اثر میانقاب‌ها در نظر گرفته نشده‌است. جهت بررسی خرابی پیش‌رونده، ستون میانی در طبقه همکف در این سازه حذف شده‌است. شکل ۱ نمای سه بعدی مدل مورد مطالعه را نشان می‌دهد.



شکل ۱: الف) نمایی از مدل سازه‌ای.

مهندسی زلزله مستلزم توسعه مدل‌های غیرخطی قابل اعتمادی است که قادر به شبیه‌سازی رفتار سازه از لحظه شروع آسیب تا لحظه شکست کامل باشد.

استفاده از یک منحنی رفتاری مناسب جهت شبیه‌سازی گسیختگی در سازه به طوریکه توزیع گسیختگی به صورت مرحله به مرحله امکانپذیر باشد، بسیار مهم است. در این مقاله به منظور مدلسازی گسیختگی در سازه بتن مسلح از منحنی رفتاری اصلاح شده ایبارا - مدینا - کراوینکلر استفاده شده است. شکل ۲ منحنی رفتاری مبنای اصلاح شده ایبارا - مدینا - کراوینکلر را نشان می‌دهد. با استفاده از منحنی رفتاری اصلاح شده مذکور، مدلسازی رفتار کرنش - نرم‌شدگی مرتبط با خرد شدگی بتن، کمانش میلگردها و گسیختگی آن امکانپذیر است [۳۴]. دلیل استفاده از مفاصل پلاستیک به جای المان‌های فایبری این است که مدل‌های با المان‌های فایبری نمی‌توانند کرنش - نرم‌شدگی مرتبط با کمانش میلگردها را شبیه‌سازی کنند. بنابراین قادر به شبیه‌سازی شکست خمشی قاب‌های بتن مسلح نیستند [۳۴ و ۳۵].



شکل ۲: رفتار یکنواخت نیرو-تغییر شکل منحنی اصلاح شده ایبارا-مدینا-کراوینکلر [۳۷ و ۳۸ و ۳۹ و ۴۰ و ۴۱ و ۴۲].

δc : تغییر شکل نقطه ماکزیمم که در بارگذاری یکنواخت متناظر با مقاومت ماکزیمم است

Fy: مقاومت تسلیم موثر با در نظر گرفتن سخت شدگی کرنشی میانگین

δy : تغییر شکل تسلیم موثر

Kc: سختی الاستیک موثر

Fr: ظرفیت مقاومت باقیمانده

δr : تغییر شکل در مقاومت باقیمانده

δu : ظرفیت تغییر شکل نهایی

δp : ظرفیت تغییر شکل پلاستیک در بارگذاری یکنواخت

δpc : ظرفیت تغییر شکل پس از نقطه ماکزیمم در بارگذاری یکنواخت

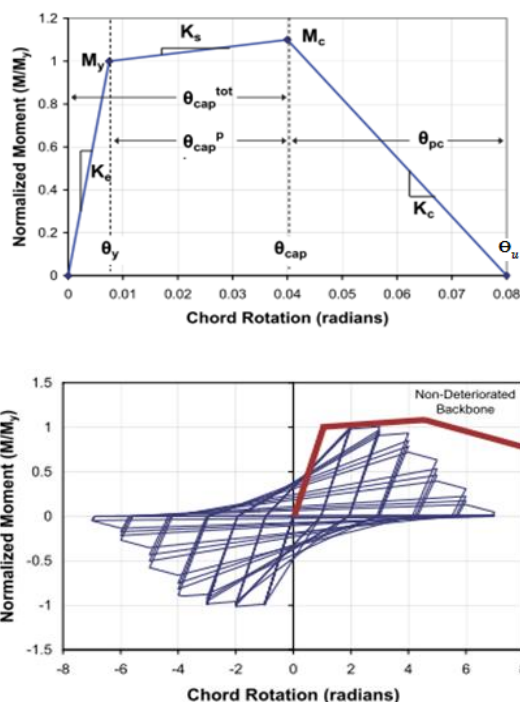
Fyp: مقاومت تسلیم موثر پیش بینی شده از خصوصیات تجربی مصالح

Fyn: مقاومت تسلیم موثر اسمی پیش بینی شده از خصوصیات اسمی مصالح

$k = Fr/Fy$: نسبت مقاومت باقیمانده

FC: مقاومت نقطه ماکزیمم با در نظر گرفتن سخت شدگی کرنشی میانگین

همانطور که شکل ۲ نشان می‌دهد برای شبیه سازی شکست سازه‌ای پارامتر K باید صفر در نظر گرفته شود. همچنین بر اساس منحنی اصلاح شده نشان داده شده در شکل ۳ مقاومت صفر متناظر با مقدار θ_{u1} است. صفر نمودن K در تعریف منحنی رفتاری المان‌ها در مدل اصلاح شده ایبارا - مدینا - کراوینکلر بدین معنی است که هر المان در حین بارگذاری جانبی پس از اینکه مقاومتش صفر شد، ضمن همگرا بودن محاسبات و ادامه تحلیل، از سازه حذف شده و تحلیل در سازه بدون المان مذکور و با سیستم سازه‌ای باقیمانده ادامه یافته تا سازه طبق شاخص خرابی تعریف شده که در منحنی اصلاح شده ایبارا - مدینا - کراوینکلر مقدار θ_{u1} برای هر عضو است به شکست کامل برسد. زیرا طبق شکل منحنی رفتاری اصلاح شده مذکور، مقدار تحمل بار در مفاصل متناظر با θ_{u1} صفر است و این بدین معنی است که به محض اینکه مقدار θ در مفاصل به میزان θ_{u1} برسد تحمل بار المان نیز صفر شده و این به معنای حذف عضو در سازه است. به عبارت دیگر هنگام تحلیل تاریخچه زمانی هنگامیکه اولین مفصل به مقدار θ_{u1} مربوطه اش رسید به طور خودکار آن عضو از مدل سازه‌ای حذف شده و تحلیل بدون وجود آن ادامه یافته تا از اعضای باقیمانده تیر و ستون، دومین المان به مقدار θ_{u1} مربوطه اش برسد و از سازه حذف شود و تحلیل به همین ترتیب ضمن همگرا بودن محاسبات ادامه یافته تا هنگامیکه آنالیز تاریخچه زمانی به اتمام برسد و یا اینکه سازه ناپایدار شود. پس از این، منظور از مفصل شکست یافته، مفصلی است که مقدار θ آن بزرگتر یا مساوی میزان θ_{u1} است که این امر متناظر با این مفهوم است که مقدار تحمل بار مفصل به صفر رسیده‌است. در مدل‌های سازه‌های برای هر عضو تیر و ستون هر کدام دو مفصل در نظر گرفته شده- است.



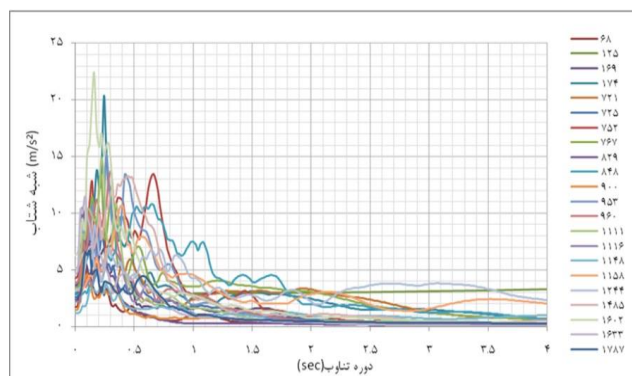
شکل ۳: رفتار یکنواخت و هیستریزس مفاصل تعریف شده ایبارا-مدینا-کراوینکلر استفاده شده در این مطالعه [۳۴ و ۳۵ و ۳۶ و ۴۳ و ۴۴ و ۴۵].

سپس سازه فوق الذکر تحت شتاب نگاشت‌های دو مولفه‌ای پیشنهاد شده در دستورالعمل FEMA-p695، جدول A-4C نشان داده شده در جدول ۱ آنالیز تاریخیچه زمانی غیرخطی شدند [۳۴].

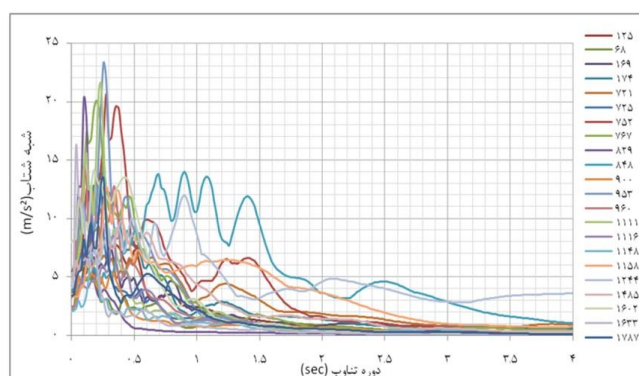
از آنجائی که هدف بررسی روند توزیع و گسترش خرابی در مدل‌های انتخابی است شتاب‌نگاشت‌های مذکور جهت اعمال اثر شدید بار زلزله به سازه و شکست المان‌های تیر و ستون یکی پس از دیگری و در نتیجه افزایش احتمال شکست در کل سازه به شتاب حدوداً $1/5g$ همپایه شدند [۳۴]. این شتاب نگاشت‌ها به صورت دو مولفه افقی در راستای X و Z به سازه اعمال شده‌اند. در کلیه تحلیل‌های تاریخیچه زمانی مولفه قویتر زلزله در راستای Z به سازه اعمال شده‌است. به دلیل سرعت و دقت بالا از نرم افزار مورد استفاده (ورژن ۲.۲.۲) OPENSEES استفاده گردید [۴۶]. در تحلیل تاریخیچه زمانی از روش نیومارک به عنوان روش غیر خطی حل معادلات استفاده شده و جهت پاسخ به معادلات غیرخطی نیز الگوریتم نیوتن در نظر گرفته شده‌است. طیف پاسخ دو مولفه‌ای هر کدام از رکوردها در شکل‌های ۴ الف و ۴ ب نشان داده شده‌است.

جدول ۱: خلاصه‌ای از داده‌های اطلاعاتی استفاده شده PEER NGA و پارامترهای ثبت شده شتاب‌نگاشت‌های حوزه دور استفاده شده در این مطالعه [۳۴].

شماره	اطلاعات شتاب‌نگاشت‌های PEER-NGA				حرکات ثبت شده	
	نام شتاب‌نگاشت‌ها	کمترین فرکانس (Hz.)	مولفه‌های افقی و اسامی آنها		PGA max (g)	PGV max (cm/s.)
			مولفه ۱	مولفه ۲		
1	953	0.25	NORTHR/MUL009	NORTHR/MUL279	0.52	63
2	960	0.13	NORTHR/LOS000	NORTHR/LOS270	0.48	45
3	1602	0.06	DUZCE/BOL000	DUZCE/BOL090	0.82	62
4	1787	0.04	HECTOR/HEC000	HECTOR/HEC090	0.34	42
5	169	0.06	IMPVALL/H-DLT262	IMPVALL/H-DLT352	0.35	33
6	174	0.25	IMPVALL/H-E11140	IMPVALL/H-E11230	0.38	42
7	1111	0.13	KOBE/NIS000	KOBE/NIS090	0.51	37
8	1116	0.13	KOBE/SHI000	KOBE/SHI090	0.24	38
9	1158	0.24	KOCAELI/DZC180	KOCAELI/DZC270	0.36	59
10	1148	0.09	KOCAELI/ARC000	KOCAELI/ARC090	0.22	40
11	900	0.07	LANDERS/YER270	LANDERS/YER360	0.24	52
12	848	0.13	LANDERS/CLW-LN	LANDERS/CLW-TR	0.42	42
13	752	0.13	LOMAP/CAP000	LOMAP/CAP090	0.53	35
14	767	0.13	LOMAP/G03000	LOMAP/G03090	0.56	45
15	1633	0.13	MANJIL/ABBAR--L	MANJIL/ABBAR—T	0.51	54
16	721	0.13	SUPERST/B-ICC000	SUPERST/B-ICC090	0.36	46
17	725	0.25	SUPERST/B-POE270	SUPERST/B-POE360	0.45	36
18	829	0.07	CAPEMEND/RIO270	CAPEMEND/RIO360	0.55	44
19	1244	0.05	CHICHI/CHY101-E	CHICHI/CHY101-N	0.44	115
20	1485	0.05	CHICHI/TCU045-E	CHICHI/TCU045-N	0.51	39
21	68	0.25	SFERN/PEL090	SFERN/PEL180	0.21	19
22	125	0.13	FRIULI/A-TMZ000	FRIULI/A-TMZ270	0.35	31



الف) مولفه های X



ب) مولفه های Z

شکل ۴: طیف شبه شتاب رکوردها، الف) مولفه های X، ب) مولفه های Z.

۴- راستی آزمائی:

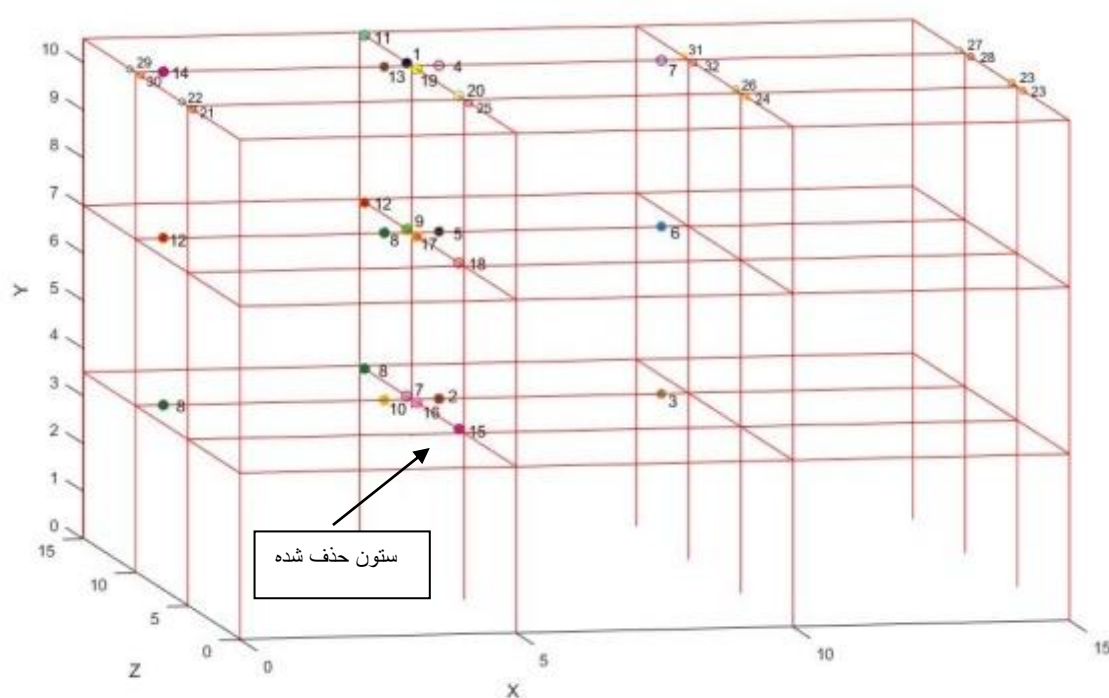
طبق مراجع ارائه شده، دستورالعمل FEMA_P695 و رساله و تحقیقات Haselton و همکارانش [۳۴ و ۳۵ و ۳۶ و ۴۳ و ۴۴ و ۴۵]، مطالعات انجام شده در زمینه فروریزش پیش‌رونده در حالت دو بعدی بوده است. در مطالعه حاضر، همان روال با همان فرضیات و در حالت سه بعدی بررسی شده است. به گونه‌ای که مراجع مذکور مبنای مقایسه و شاهد پژوهش ما باشند. علاوه بر این تحقیقاتی نیز توسط نویسندگان در سازه‌های بتن مسلح پیچشی ناشی از بارگذاری زلزله صورت گرفته است [۲۸، ۲۷، ۲۶، ۲۵، ۲۴، ۲۳، ۲۲، ۲۱، ۲۰ و ۲۹] که جهت راستی آزمایی و صحت سنجی، در مدلسازی شکست از این مقالات نیز استفاده شده است.

۵- بررسی توزیع شکست:

جهت بررسی روند توزیع خرابی و گسترش شکست در خرابی پیش‌رونده تحت شتاب نگاشت‌های پیشنهاد شده در دستورالعمل FEMA P695، پس از تحلیل تاریخچه زمانی در سازه ۳ طبقه، ترتیب خرابی اعضا یا به عبارت دیگر سناریوی خرابی در هر سازه بررسی گردید. بدین صورت که ترتیب خرابی از اولین المان تیر یا ستون یکی پس از دیگری تا هنگامی که سازه ناپایدار شود و یا تحلیل تاریخچه زمانی به اتمام رسد بررسی شد و در نهایت سناریوی خرابی ارائه و المان‌های بحرانی تیر و ستون مشخص گردید. نتایج حاکی از آن است که نه تنها نقاط شروع خرابی و اعضای بحرانی تیر و ستون در بسیاری از شتابنگاشت‌ها تکراری است بلکه روال توزیع گسیختگی نیز مشابه است به گونه‌ای که می‌توان ضمن پیش‌بینی اعضای بحرانی، ترتیب و توزیع خرابی را نیز در سازه‌های ۳ طبقه مشابه ناشی از حذف ستون میانی پیش‌بینی نمود.

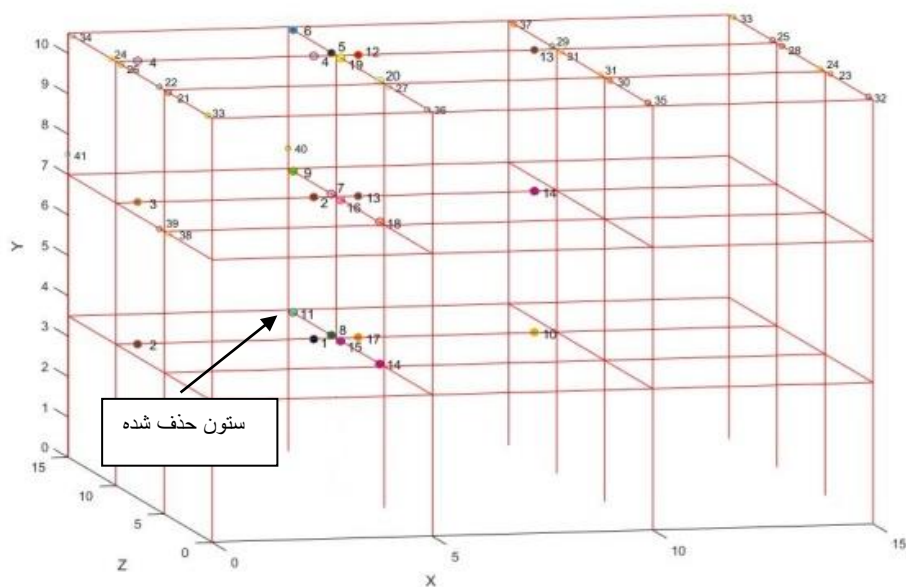
در خصوص مفاصل تشکیل شده در شکلها نیز به استحضار می‌رساند که سطح عملکرد همه مفاصل موجود در کلیه شکلها، سطح عملکرد آستانه فروریزش (CP) است. در خصوص رنگ مفاصل تشکیل شده در شکلها به استحضار می‌رساند که رنگ مفاصل حاکی از ترتیب و توالی شکست مفاصل است که از رنگ تیره به سمت رنگ روشن متغیر است. به عبارت دیگر نقاط اولیه شکست با رنگهای تیره‌تر و دیگر نقاط بعدی با رنگهای روشن‌تر مشخص شده‌است. به عنوان مثال، اولین نقطه شکست با رنگ مشکی مشخص گردیده است که در ادامه رخداد شکست در دیگر نقاط سازه به رنگ روشن تغییر یافته‌است. بدین وسیله می‌توان نقاط شروع شکست را در سازه‌ها پیش بینی و راهکارها و تمهیداتی را جهت جلوگیری از فروریزش پیشرونده، در نقاط اولیه شکست ارائه نمود.

به عنوان نمونه توزیع خرابی در شکل‌های ۵، ۶، ۷، ۸، ۹، ۱۰ و ۱۱ ترتیب شکست رخ داده در مفاصل ناشی از شتاب‌نگاشت‌های ۰.۹۶۰، ۱۱۱۱، ۱۱۱۶، ۱۱۴۸، ۱۱۵۸، ۷۲۵ را با شماره‌های نشان داده شده ارائه می‌کند که به ترتیب نشان داده شده‌است.



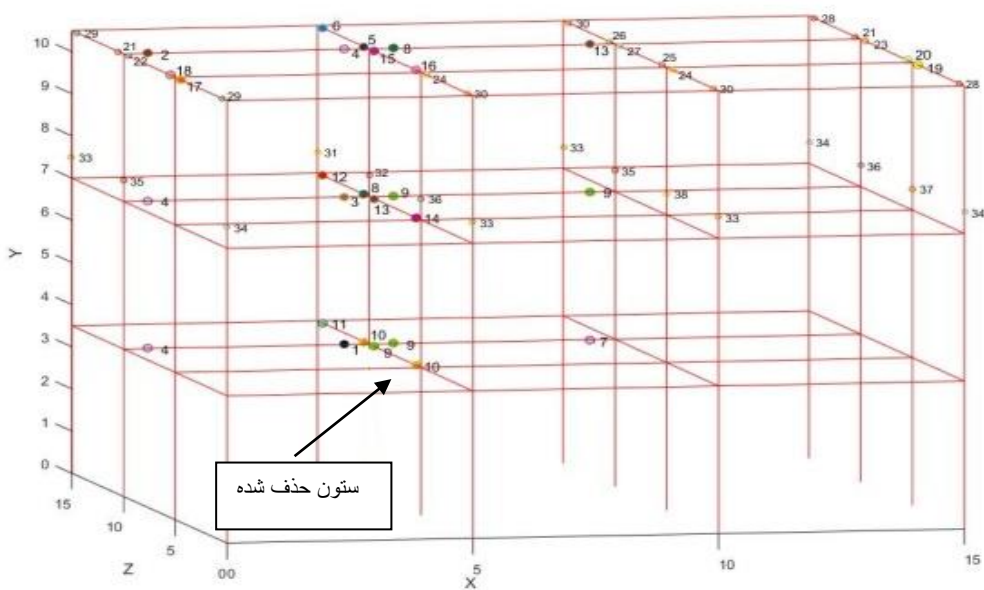
شکل ۵: توزیع گسیختگی در سازه سه طبقه ناشی از حذف ستون میانی تحت شتاب‌نگاشت ۰.۹۵۳.

مطابق شکل ۵ در سازه سه طبقه ناشی از حذف ستون میانی در طبقه همکف تحت شتاب‌نگاشت ۰.۹۵۳، شروع گسیختگی و تشکیل مفصل پلاستیک بر اساس منحنی رفتاری اصلاح شده ایبارا - مدینا - کراوینکلر، در تیر کناری بالای ستون حذف شده در سقف سوم است. در ادامه گسیختگی در تیرهای سقف اول و دوم در ناحیه فوقانی و کناری ستون حذف شده تشکیل شده‌است. گسیختگی در نهایت به تیرهای دیگر در طبقه سوم منتقل شده‌است. توزیع گسیختگی به صورت عمودی و حوالی ستون حذف شده‌است. شماره‌های موجود در شکل ۵ و دیگر شکل‌ها در ادامه مقاله، ترتیب شکست را در مفاصل تیر و ستون، در سطح عملکرد CP (آستانه فروریزش) نشان می‌دهد.



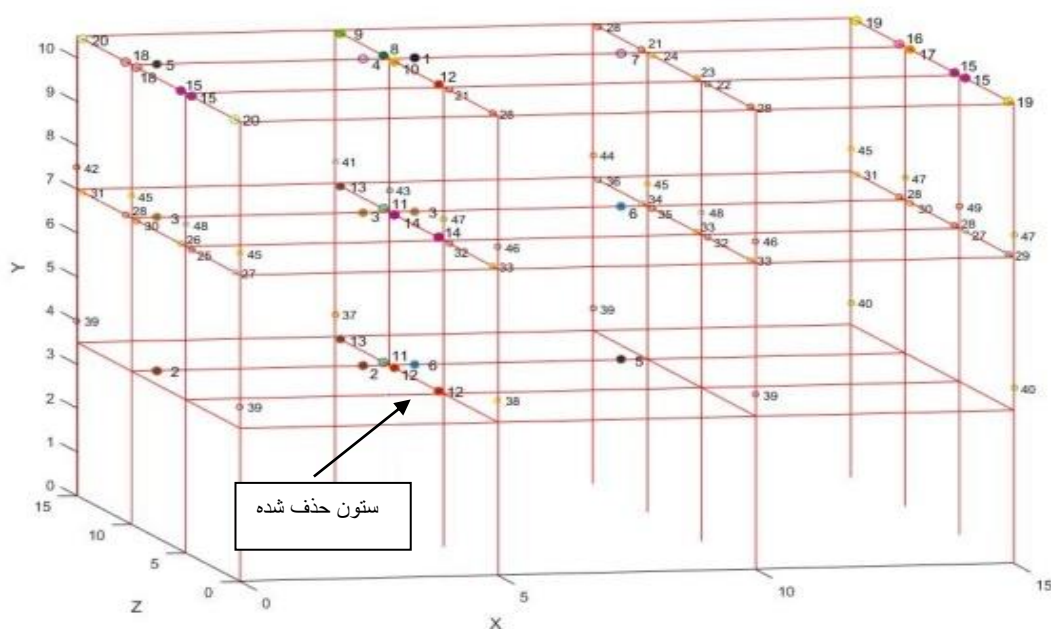
شکل ۶: توزیع گسیختگی در سازه سه طبقه ناشی از حذف ستون میانی تحت شتابنگاشت ۹۶۰.

در شکل ۶ در سازه سه طبقه ناشی از حذف ستون میانی در طبقه همکف تحت شتابنگاشت ۹۶۰ شروع گسیختگی در بالای ستون حذف شده و در تیر کناری در سقف اول است. در ادامه توزیع گسیختگی به تیرهای کناری بالای ستون حذف شده در سقف دوم منتقل شده است و در نهایت در طبقه سوم گسترش یافته است. توزیع گسیختگی به صورت عمودی از پائین به بالا و حوالی ستون حذف شده است که در نهایت در طبقه سوم پخش شده است.



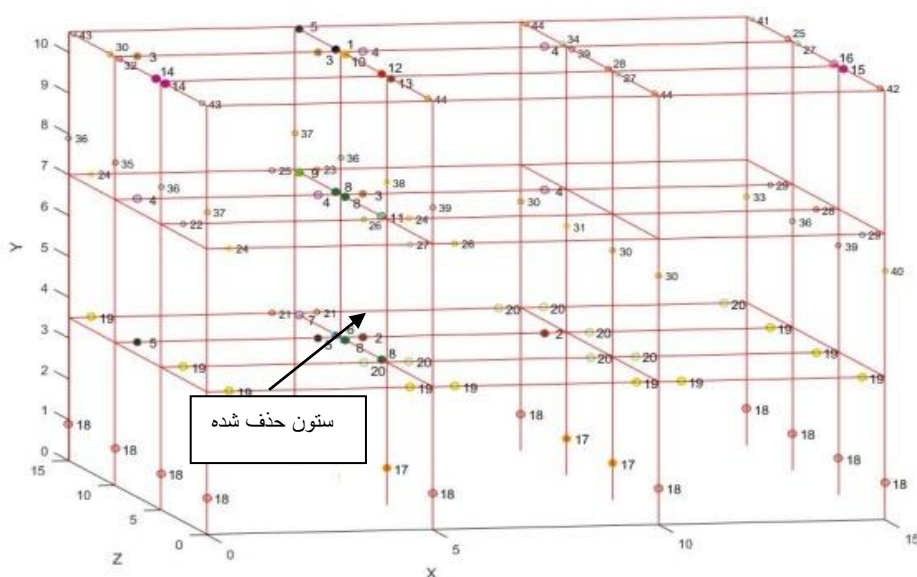
شکل ۷: توزیع گسیختگی در سازه سه طبقه ناشی از حذف میانی ستون تحت شتابنگاشت ۱۱۱۱.

در شکل ۷ در سازه سه طبقه ناشی از حذف ستون میانی در طبقه همکف تحت شتابنگاشت ۱۱۱۱ نیز شروع گسیختگی در تیر و بالای ستون حذف شده در سقف اول، سپس در تیر کناری بالای ستون حذف شده در سقف دوم و در نهایت به طبقه سوم منتقل شده است. توزیع گسیختگی به صورت عمودی از پائین به بالا و حوالی ستون حذف شده و بیشتر در طبقه سوم رخ داده است.



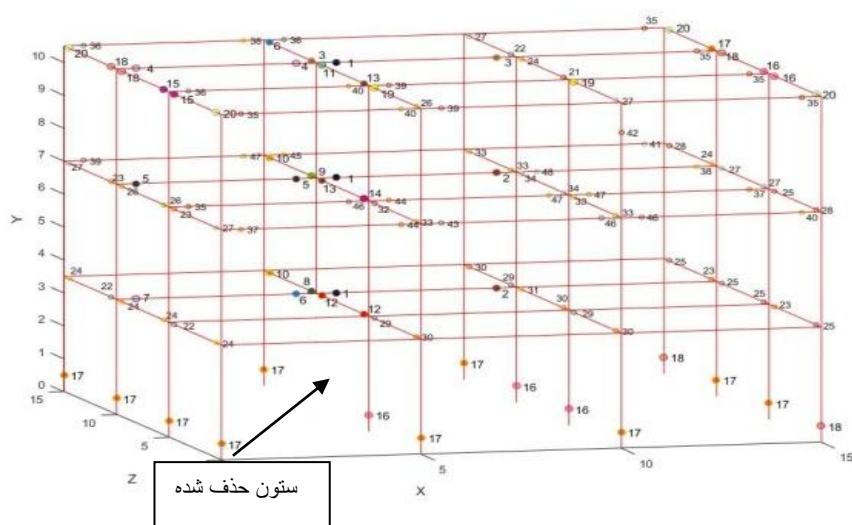
شکل ۸: توزیع گسیختگی در سازه سه طبقه ناشی از حذف ستون میانی تحت شتابنگاشت ۱۱۱۶.

در شکل ۸ در سازه سه طبقه ناشی از حذف ستون میانی در طبقه همکف تحت شتابنگاشت ۱۱۱۶، شروع گسیختگی در تیر کناری در سقف سوم بالای ستون حذف شده رخ داده است. در ادامه گسیختگی به تیر کناری بالای ستون در سقف اول و سپس سقف دوم منتقل و در نهایت در طبقه سوم توزیع شده است. در اینجا نیز توزیع شکست به صورت عمودی از پائین به بالا و در سمتی که ستون حذف شده قرار دارد بیشتر رخ داده است.



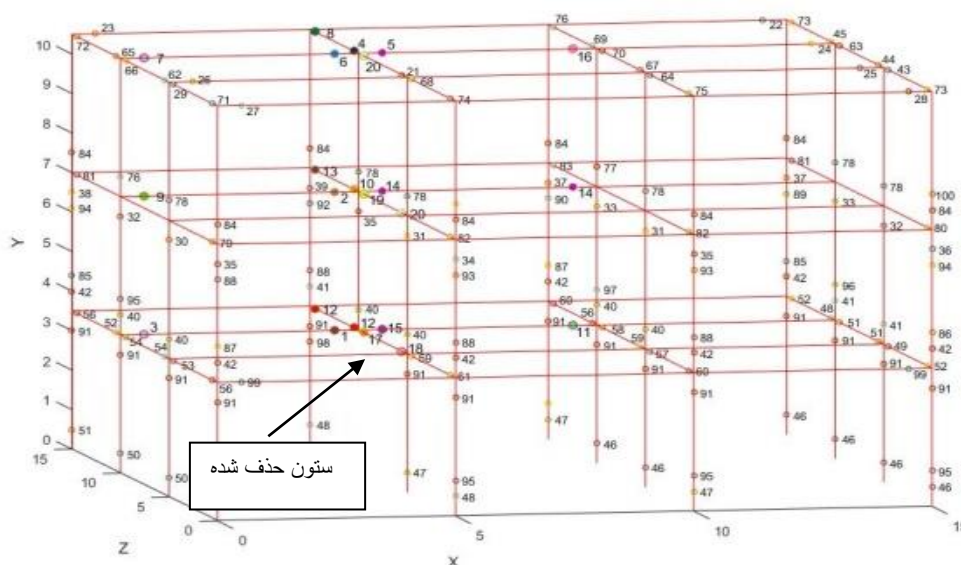
شکل ۹: توزیع گسیختگی در سازه سه طبقه ناشی از حذف ستون میانی تحت شتابنگاشت ۱۱۴۸.

در شکل ۹ در سازه سه طبقه ناشی از حذف ستون میانی در طبقه همکف تحت شتابنگاشت ۱۱۴۸، شروع شکست در بالای ستون حذف شده و در تیر کناری در سقف سوم (شماره ۱) و سقف اول (شماره ۲) رخ داده و در ادامه به تیرهای کناری در سقف دوم منتقل شده است. سپس روند توزیع گسیختگی در المان‌های اطراف ستون حذف شده ادامه یافته و در نهایت به سایر المان‌های هر سه طبقه منتقل شده است. در اینجا در تعداد بیشتری از ستون‌ها مفصل پلاستیک تشکیل شده است. گر چه تشکیل مفصل پلاستیک در ستون‌ها از الگوی خاصی پیروی نمی‌کند.



شکل ۱۰: توزیع گسیختگی در سازه سه طبقه ناشی از حذف ستون میانی تحت شتابنگاشت ۱۱۵۸.

مطابق شکل ۱۰ در سازه سه طبقه با حذف ستون میانی در طبقه همکف تحت شتابنگاشت ۱۱۵۸، شروع گسیختگی همزمان در تیرهای کناری بالای ستون حذف شده در سقف‌های اول، دوم و سوم رخ داده است. در ادامه گسیختگی به سایر تیرهای کناری در هر سه سقف منتقل شده است. سپس در پایه ستون‌ها و سقف سوم ادامه یافته و در نهایت در هر سه طبقه بدون الگوی خاصی توزیع شده است. بر اساس شکل فوق نقطه شروع گسیختگی و توزیع اولیه شکست بیشتر در اطراف ستون حذف شده رخ داده و همچنین شکست، عمودی و در ارتفاع سازه توزیع شده است.



شکل ۱۱: توزیع گسیختگی در سازه سه طبقه ناشی از حذف ستون میانی تحت شتابنگاشت ۷۲۵.

در شکل ۱۱ در سازه سه طبقه با حذف ستون میانی در طبقه همکف تحت شتابنگاشت ۷۲۵، نقطه شروع شکست در تیر بالای ستون حذف شده در سقف اول بوده، سپس در تیر متناظر در سقف دوم و سوم ادامه داشته و در نهایت در طبقه سوم و سپس در دیگر طبقات ادامه یافته است.

۶- الگوی توزیع شکست

با توجه به تصاویر مربوط به توزیع گسیختگی در سازه سه طبقه متقارن ناشی از حذف ستون میانی می‌توان ملاحظه نمود که شکست اکثراً در اطراف ستون حذف شده توزیع شده است. برای مثال در شکل ۶ تحت شتابنگاشت ۹۶۰، توزیع گسیختگی ناشی از حذف ستون میانی از مفصل شماره ۱ که دقیقاً در بالای ستون حذف شده و بر روی تیر متصل به آن در سقف اول قرار دارد آغاز و به مفصل‌های شماره ۲ و ۳ در همان تیر و در تیر در موقعیت مشابه در سقف دوم گسترش یافته و سپس در تیر با همان موقعیت اما در سقف سوم توزیع گردیده است. در ادامه تیرهای نزدیک ستون میانی حذف شده دچار گسیختگی شده‌اند.

در مورد مشابه با حالت قبل می‌توان به روند توزیع شکست ناشی از حذف ستون میانی تحت شتابنگاشت ۱۱۱۱ اشاره نمود. همانطوریکه در شکل ۷ نیز مشاهده می‌شود، شکست از مفصل شماره ۱ بر روی تیری که دقیقاً در بالای ستون میانی حذف شده قرار داشته و به آن متصل و در سقف اول قرار دارد آغاز شده است. سپس به مفاصل شماره‌های ۲، ۳ و ۴ واقع بر روی تیرها با موقعیت مشابه در سقف‌های دوم و سوم توزیع شده و در ادامه بر روی تیرهای نزدیک ستون میانی حذف شده گسترش یافته است. در نهایت توزیع شکست در ستون‌های نزدیک ستون میانی حذف شده در طبقه سوم ادامه یافته است.

نتایج حاصل از تحلیل‌ها نشان می‌دهد که توزیع گسیختگی و یا به عبارت دیگر مکانیسم فروریزش پیش‌رونده مستقل از شتابنگاشت‌ها است. همچنین توزیع گسیختگی در سازه متقارن با حذف ستون میانی مسیر خاص و ویژه‌ای را دنبال می‌کند.

بر اساس نتایج مشاهده شده ناشی از دیگر شتابنگاشت‌های پیشنهاد شده در FEMA P695، ارائه شده در جدول ۱، الگوهای رفتاری توزیع شکست در سازه کوتاه‌مرتبه متقارن ناشی از حذف ستون میانی بدین صورت است که در حدود ۷۰ درصد شتابنگاشت‌ها، در سازه با حذف ستون میانی، نقطه شروع شکست در بالای ستون حذف شده در سقف اول بوده و سپس در تیرهای متصل به ستون حذف شده در همان سقف یا تیرهای متناظر در سقف‌های فوقانی گسترش یافته و در ادامه در سایر المان‌های سازه، ابتدا در طبقه سوم و سپس طبقات تحتانی توزیع گردیده‌است.

در ادامه الگوی پیشنهادی توزیع شکست در سازه با حذف ستون میانی می‌توان گفت که احتمال وقوع شکست در مراحل اولیه، در تیرهای اطراف محل حذف ستون است. بنابراین به عنوان یک راهکار آیین‌نامه‌ای جهت طراحی ساختمان در برابر فروریزش پیش‌رونده، می‌توان از روش نیروی کلافی به منظور تقویت تیرهای متصل به ستون استفاده کرد.

با توجه به نتایج حاصل از تحلیل‌ها، توزیع گسیختگی در هر سازه ابتدا در اطراف ستون حذف شده، به صورت عمودی در ارتفاع سازه و در اکثر حالات از پائین سازه به سمت بالا رخ داده و سپس به صورت افقی در طبقات توزیع شده‌است. علت این امر ناشی از مکان ستون حذف شده است که در طبقه همکف انتخاب و سبب شده‌است که شکست در ارتفاع سازه و در اطراف ستون حذف شده رخ دهد. به همین منظور به عنوان یک راهکار آیین‌نامه‌ای جهت طراحی سازه در برابر فروریزش پیش‌رونده، روش مسیر جایگزین پیشنهاد می‌گردد. بدین صورت که این روش جهت مقاومت در برابر فروریزش پیش‌رونده به صورت عمودی در مباحث طراحی در نظر گرفته شود.

۷- نتیجه گیری

۱. با توجه به بخش بررسی توزیع شکست می‌توان نتیجه گرفت که توزیع گسیختگی و یا به عبارت دیگر مکانیسم فروریزش پیش‌رونده مستقل از شتابنگاشت‌هاست و تغییر در شتابنگاشت زلزله، تاثیری در روند مکانیسم فروریزش پیش‌رونده و توزیع شکست ندارد. به عبارت دیگر توزیع خرابی پیش‌رونده متاثر از نوع زلزله نیست.
۲. بررسی بخش الگوی توزیع شکست حاکی از آن است که توزیع گسیختگی در سازه متقارن با حذف ستون میانی الگوی خاص و ویژه‌ای را دنبال می‌کند. بنابراین در سازه‌های مشابه می‌توان توزیع و مسیر شکست را پیش‌بینی نموده و المانهای سازه‌ای بحرانی موجود در مسیر شکست را تقویت نمود.
۳. بر اساس مشاهدات بخش بررسی توزیع شکست در سازه سه طبقه متقارن ناشی از حذف ستون میانی در طبقه همکف، در حدود ۷۰ درصد نتایج حاصل از تحلیل‌های تاریخچه زمانی غیرخطی، شکست ابتدا در تیرهای فوقانی محل ستون حذف شده در سقف اول و سپس در سایر المان‌ها در طبقات فوقانی توزیع شده‌است. به عبارت دیگر شکست از تیرهای بالای ستون حذف شده به صورت عمودی به طبقات فوقانی منتقل می‌گردد.
۴. الگوهای توزیع شکست در سازه کوتاه مرتبه ۳ طبقه متقارن با حذف ستون میانی نشان می‌دهند که احتمال وقوع گسیختگی در مراحل اولیه توزیع، در تیرهای اطراف و فوقانی محل حذف ستون است. بنابراین به عنوان یک راهکار و پیشنهاد آیین‌نامه‌ای، روشهای نیروی کلافی و مقاومت موضعی بهبود یافته به منظور تقویت تیرهای متصل به ستون، جهت طراحی ساختمان در برابر فروریزش پیش‌رونده معرفی می‌گردند.
۵. بر اساس مشاهدات بخش الگوی توزیع شکست، توزیع گسیختگی در هر سازه کوتاه مرتبه ۳ طبقه متقارن، ابتدا در اطراف ستون حذف شده، به صورت عمودی در ارتفاع سازه و در اکثر حالات از سقف همکف سازه به سمت بالا رخ داده و سپس به صورت افقی

در طبقات توزیع شده است. به عبارت دیگر شکست ابتدا به صورت عمودی در ارتفاع سازه و سپس به صورت افقی در سقف طبقات توزیع می شود. لذا به عنوان یک راهکار و پیشنهاد آیین نامه ای جهت طراحی سازه در برابر فروریزش پیش رونده، روش مسیر جایگزین نیز معرفی می گردد. بدین صورت که این روش جهت مقاومت در برابر فروریزش پیش رونده به صورت عمودی در مباحث طراحی در نظر گرفته شود.

مراجع :

- [1] Griffith, H. Pugsley, A. and Saunders, O. (1968). *Report of the inquiry into collapse of flats of Ronan point*, Canning Town, London, England.
- [2] Ferahian, Ramzi. H. (1972). *Buildings design for progressive collapse*. Civil Engineering. American Society of Civil Engineer. New York. 66-69.
- [3] Scott, David. Lane, Barbara. and Gibbons, Craig. (2002). *Fire Induced Progressive Collapse*. Buildingsmartalliance.org.
- [4] Unified Facilities Criteria (UFC). (2008). *Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions*.
- [5] Lu, Xinzhen. Lin, Xuchuan. Ma, Yuhu. Li, Yi. and Ye, Lieping. (2008). Numerical Simulation for the Progressive Collapse of Concrete Building due to Earthquake, Proceedings. In: *the 14th World Conference on Earthquake Engineering*. Beijing, China.
- [6] Lu, X.Z. Li, Y. Ye, L.P. Ma, Y.F. and Liang, Y. (2008). Study on the Design Methods to Resist Progressive Collapse for Building Structures, Proceedings. In: *Tenth Int. Symp. On Structural Engineering for Young Experts*.
- [7] Ettouney, Mohammed. Smilowitz, Robert. Tang, Margaret. And Hapij, Adam. (2012). Global System Considerations for Progressive Collapse with Extensions to Other Natural and Man-Made Hazards. *J. Perform. Constr. Facil.*, SPECIAL ISSUE: Mitigating the Potential for Progressive Disproportionate Structural Collapse, 20, 403-417.
- [8] Gurley, C. (2012). Progressive Collapse and Earthquake Resistance. *Pract. Period. Struct. Des. Constr. ASCE*. 13(1), 19-23.
- [9] Yi, LI. Xin-zheng, LU. and Lie-ping, YE. (2011). Study on the Progressive Collapse Mechanism of RC Frame Structures. *Building Science*, 27(5), 12-18.
- [10] Hou, Jian. and Song, Li. (2016). Progressive Collapse Resistance of RC Frame under a Side Column Removal Scenario: The Mechnism Explained. *J of concrete structuers and materials*. 10(2), 237-247.
- [11] Kaiqi, Lin. Xinzhen, Lu. Hong, Guan. (2016). Effects of Seismic and Progressive Collapse Designs on the Vulnerability of RC Frame Structures. *J of Performance of Consteructed Facilities*. 31(1).
- [12] Usefi, N. Nav, F. M. and Abbasnia, R. (2016). Finite element analysis of RC elements in progressive collapse scenario. *Gradevinar*, 68(12), 1009-1022. doi:10.14256/JCE.1550.2016.
- [13] Yasser, E. Ibrahim. Mostafa, A. Ismail. and Marwa, Nabil. (2017). Response of Reinforced Concrete Frame Structures Under Blast Loaing. *Procedia Engineering*. 171, 1550.

- [14] Talaat, M. and Mosalam, K-M. (2009). Modeling progressive collapse in reinforced concrete buildings using direct element removal. *Earthquake Engng. Struct. Dyn.* 38. 609–634.
- [15] Khandelwala, Kapil. El-Tawila, Sherif. and Sadekb, Fahim. (2009). Progressive collapse analysis of seismically designed steel braced frames. *Constructional Steel Research*, 65(3), 699-708.
- [16] Bazant, Zdenfk and P.Verdure, Mathieu. (2007). Mechanics of Progressive Collapse. Learning from World Trade Center and Building Demolitions. *Engineering Mechanics*, 3, 133.
- [17] El-Tawil, Sherif. Khandelwal, Kapil. Kunnath, Sashi. and Lew, H.S. (2007). Macro models for progressive collapse analysis of steel moment frame buildings. Proceedings. In: *Structures Congress 2007*. Long Beach, California, United States.
- [18] Ibarra, L-F. Medina, R-A. and Krawinkler, H. (2005). Hysteretic Models that Incorporate Strength and Stiffness Deterioration. *J. Earthquake Eng. and Struct. Dyn.* 34: 1489–1511.
- [19] Havaei, GholamReza. and Bayat, Elyas. (2018). The structural response and manner of progressive collapse in RC buildings under the blast and Provide approaches to retrofitting columns against blast. *Journal of Structural and Construction Engineering (JSCE)*. DOI :(10.22065/JSCE.2017.77550.1076).
- [20] Karimiyan, Somayyeh. Sarvghad Moghadam, Abdolreza. and Vetr, Mohammad Ghsem. (2013). Seismic Progressive Collapse Assessment of 3-Story RC Moment Resisting Buildings with Different Levels of Eccentricity in Plan, *Earthquakes and Structures*, 5(3), 277-296.
- [21] Karimiyan, Somayyeh. Sarvghad Moghadam, Abdolreza. Karimiyan, Morteza. and Husseinzadeh Kashan, Ali. (2013). Seismic Collapse Propagation in 6-Story RC Regular and Irregular Buildings, *Earthquakes and Structures*, 5(6), 753-779.
- [22] Karimiyan, Somayyeh. Sarvghad Moghadam, Abdolreza. Husseinzadeh Kashan, Ali. and Karimiyan, Morteza. (2014). Progressive Collapse Evaluation of RC Symmetric and Asymmetric Mid rise and Tall Buildings under Earthquake Loads, *International Journal of Civil Engineering*, 13(1A), 30-44.
- [23] Karimiyan, Somayyeh. Husseinzadeh Kashan, Ali. and Karimiyan, Morteza. (2014). Progressive Collapse Vulnerability in 6-Story RC Symmetric and Asymmetric Buildings under Earthquake Loads, *Earthquakes and Structures*, 6(5), 473-494.
- [24] Karimiyan, Somayyeh. Sarvghad Moghadam, Abdolreza. Husseinzadeh Kashan, Ali. and Karimiyan, Morteza. (2014). Evaluation of Collapse Distribution in 3-Story RC Moment Resisting Asymmetric Buildings due to Earthquake Loads, *International Journal of Civil Engineering*, 15 (5), 809–825.
- [25] Karimiyan, Somayyeh. Sarvghad Moghadam, Abdolreza. and Vetr, Mohammad Ghasem. (2013). Comparison of progressive collapse in 3 story reinforced concrete asymmetric buildings under earthquake loads, *Sharif Journal of Technology*, 31(202), 87-97.
- [26] Karimiyan, Somayyeh. and Sarvghad Moghadam, Abdolreza. (2013). Modeling of Seismic Progressive Collapse Distribution in 3 Story Symmetric and Asymmetric Reinforced Concrete Buildings, *Modeling in Engineering*, 37(5), 51-75.

- [27] Sarvghad Moghadam, Abdolreza. and Karimiyan, Somayyeh. (2014). Seismic progressive collapse of multistorey asymmetric buildings, *7th European Workshop on the Seismic Behaviour of Irregular and Complex Structures (7th EWICS)*, 17-18 October, Faculty of Civil Engineering, Opole University of Technology, Poland.
- [28] Sarvghad Moghadam, Abdolreza. and Karimiyan, Somayyeh. (2014). Modelling and Computational issues in Seismic Progressive Collapse Assessment of RC Moment Resisting Buildings with Eccentricity in Plan, *11th World Congress on Computational Mechanics (WCCM XI)*, Barcelona, Spain.
- [29] Sarvghad Moghadam, Abdolreza. and Karimiyan, Somayyeh. (2014). Seismic progressive collapse Assessment of RC Moment Resisting Buildings with Eccentricity in Plan. *Second European Conference on Earthquake Engineering and Seismology*, Istanbul, Turkey.
- [30] Balasaraswathi, K. and M. Ramakrishna, G. (2017). Progressive Collapse Analysis of Asymmetric Reinforced Concrete Building. *International Journal for Trends in Engineering and Technology*, 23(1), ISSN: 2349 – 9303.
- [31] Yenidogan, C. Yokoyama, R. Nagae, T. Tahara, K. Tosauchi, Y. Kajiwara, K. and Ghannoum, W. (2018). Shake table test of a full-scale four-story reinforced concrete structure and numerical representation of overall response with modified IMK model. *Bulletin of Earthquake Engineerin*, 16 (5), 2087–2118.
- [32] Thombare, Rucha. and Magarpatil, H. R. (2017). Non-Linear Static Progressive Collapse Analysis of High Rise R.C.C. Structure. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*. 4(6), 1620-1630.
- [33] Soleymani, Atefeh. and Esfahani, mohammad Reza. (2018). Effect of concrete strength and thickness of flat slab on preventing of progressive collapse caused by elimination of an internal column. *Journal of Structural and Construction Engineering (JSCE)*. DOI :(10.22065/JSCE.2017.98444.1335
- [34] FEMA P695, (2009). *Quantification of Building Seismic Performance Factors*, Prepared by APPLIED TECHNOLOGY COUNCIL, www.ATCCouncil.org.
- [35] Ibarra, Luis F. Medina, R. A. and Krawinkler, H. (2005). Hysteretic Models that Incorporate Strength and Stiffness Deterioration, *J. Earthquake Eng. and Struct. Dyn.*, 34, 1489–1511.
- [36] Haselton, C.B. and Deierlein, G.G. (2007). *Assessment Seismic Collapse Safety of Modern Reinforced Concrete Moment Frame Building*. Ph.D. thesis, The John A. Blume Earthquake Engineering Center, Stanford University.
- [37] Ibarra, Luis F. and Krawinkler, H. (2004). Global Collapse of Deteriorating MDOF Systems, *Proc.13thWorld Conference on Earthquake Engineering*, Vancouver, B.C., Canada, August 1-6, Paper No. 116.
- [38] Ibarra, Luis F. (2005). *Global Collapse of Frame Structures under Seismic Excitations*. Ph.D. thesis, Stanford Univ.
- [39] Lignos, D. G. (2008). *Sidesway Collapse of Deteriorating Structural Systems under Seismic Excitations*. Ph.D. thesis, Stanford Univ.
- [40] Lignos, D. G. Zareian, F. and Krawinkler, H. (2008). Reliability of a 4-Story Steel Moment-Resisting Frame Against Collapse Due to Seismic Excitations, *Structures Congress 2008*. Vancouver: ASCE.

[41] Krawinkler, H. Zareian, F. Lignos, D. G. and Ibarra, L. F. (2009). Prediction of Collapse of Structures under Earthquake Excitations, *COMPADYN 2009, ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering*. Island of Rhodes: National Technical University of Athens.

[42] Haselton, C.B. Liel, A. B. and Deierlein, G. G. (2009). Simulating Structural Collapse due to Earthquakes: Model Idealization, Model Calibration, and Numerical Solution Algorithms, *COMPADYN2009, ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering*. Island of Rhodes: National Technical University of Athens.

[43] Haselton, C.B. Liel, A. B. Lange, S. T. and Deierlein, G. G. (2008). *Beam-Column Element Model Calibrated for Predicting Flexural Response Leading to Global Collapse of RC Frame Buildings*. PEER Report 2007/03, Pacific Earthquake Engineering Research Center, College of Engineering University of California, Berkeley.

[44] Zareian, Farzin. Lignos, Dimitrios G. and Krawinkler, Helmut. (2009). Quantification of Modeling Uncertainties for Collapse Assessment of Structural Systems under Seismic Excitations. *COMPADYN 2009, ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering*. Island of Rhodes: National Technical University of Athens.

[45] Zareian, F. and Medina, R. A. (2010). A Practical Method for Proper Modeling of Structural Damping in Inelastic Plane Structural Systems. *J. Computers and Structures*, 88, 45–53.

[46] Ashrafi, Hamid Reza. and Hassanzadeh, Seyed Ali. (2018). Introducing an optimal method for macro modeling of nonlinear dynamic analysis in progressive collapse. *Journal of Structural and Construction Engineering (JSCE)*. DOI :(10.22065/JSCE.2018.113761.1425).