Journal of Structural and Construction Engineering, 8(Special Issue 1), 2021, pp. 431-447

Journal of Structural and Construction Engineering

www.jsce.ir

The effect of increasing span length and storey height on the progressive failure of reinforced concrete frames with different percentages of openings in the masonry infilled wall

Ebrahim Khalilzadeh Vahidi[1*], Pouria Chavoshani[2]

1- Assistant Professor, Faculty of Civil Engineering, Razi University of Kermanshah, Kermanshah, Iran
2- MSc of Structural Engineering, Department of Civil Engineering, Razi University of Kermanshah, Kermanshah, Iran

ABSTRACT

Buildings may be subject to various external threats throughout their lives. These threats can cause progressive Collapse to the structure by damaging the critical structural elements. Studies on structural systems failure in recent years highlight the importance of the progressive collapse phenomenon caused by abnormal loading like crashes, terrorist attacks, explosions, earthquakes, and so on. In this study, the performance of 6-story masonry infilled reinforced concrete frames with varying percentages of openings in progressive failure due to varying span length and floor height is investigated. The frames examined have RC moment-resisting frames that are designed by the Iranian Building code. Progressive collapse simulation by alternative path method by removing the middle column of frames in OpenSees software with nonlinear static analysis. According to the results, In the case frames with 10%, 20%, and 30% openings in the infilled masonry wall, their maximum strength reduced by about 23%, 31%, and 39%. Also, the frame with openings reduces about 62% of the maximum force against the without openings frame. The results show that increasing every 0.5 m of span length from 4 to 6 m, on average, increases the force by about 9%. Also, increasing the height of the floor from 3 to 4 meters, on average, increase the strength of the frames by 13%. The results of this study showed the positive effect of infill, increased span length from 4 to 6 meters and height from 3 to 4 meters, the class is in the process of progressive collapse of RC frames.

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

ARTICLE INFO

Receive Date: 04 December 2019
Revise Date: 18 March 2020
Accept Date: 19 April 2020

Keywords:
Progressive Collapse
RC Frame
Masonry
Increase in Crater Length
Increase in Floor Height
Opening

doi: https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2020.210392.2010

*Corresponding author: Ebrahim Khalilzadehvahidi
Email address: e_vahidi2000@yahoo.com

نشریه مهندسی سازه و ساخت
(علمی - پژوهشی)
www.jsce.ir
Journal of Structural and Construction Engineering
JSCE
نشریه علمی-پژوهشی مهندسی سازه و ساخت

بررسی تاثیر افزایش طول دهانه و ارتفاع طبقه بر خرابی پیشرونده قاب‌های بتن مسلح دارای درصدهای مختلف بازشو در میانقاب بنایی

ابراهیم خلیل زاده وحیدی[1*]، پوریا چاوشانی[2]

۱- استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه رازی کرمانشاه، کرمانشاه، ایران

۲-کارشناس ارشد مهندسی سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه رازی کرمانشاه، کرمانشاه، ایران

چکیده

ساختمان‌ها در طول عمر مفید خود ممکن است تحت تاثیر تهدیدات خارجی مختلفی قرار گیرند. این تهدیدات می‌توانند با آسیب رساندن به المان‌های اصلی ساختمان باعث پیدایش پدیده‌ای بنام خرابی پیشرونده در سازه گردند. مطالعات صورت گرفته در رابطه با خرابی سیستم‌های سازه‌ای در سال‌های اخیر، اهمیت پدیده‌ی خرابی پیشرونده ناشی از بارگذاری غیرعادی همچون ضربات تصادف، حملات تروریستی، انفجار، زلزله و... را مشخص می‌سازد. در این تحقیق به بررسی عملکرد قاب‌های ۶ طبقه بتن مسلح با درصدهای مختلف بازشو در میانقاب تحت تغییر طول دهانه و ارتفاع طبقه بر روند خرابی پیشرونده پرداخته می‌شود. قاب‌های مورد بررسی دارای سیستم قاب خمشی متوسط می‌باشند که بر اساس آئین‌نامه‌های داخلی طراحی و ضوابط هر کدام کنترل شده‌اند. شبیه سازی خرابی پیشرونده به روش مسیر بار جایگزین با حذف ستون میانی طبقه همکف قاب‌ها در نرم افزار OpenSees با تحلیل استاتیکی غیرخطی اعمال گردیده است. با توجه به نتایج مشاهده می‌شود، در قاب‌های مورد بررسی وجود بازشو به میزان ۱۰ ٪، ۲۰ ٪ و ۳۰ ٪ در میانقاب، حداکثر نیروی مقاوم آنها را به ترتیب حدود ۲۳ ٪، ۳۱ ٪ و ۳۹ ٪ نسبت به قاب دارای میانقاب بدون بازشو، کاهش می‌دهد. همچنین قاب فاقد میانقاب باعث کاهش حدود ۶۲ ٪ نیروی مقاوم نسبت به قاب دارای میانقاب بدون بازشو می‌گردد. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد، افزایش هر ۰/۵ متر طول دهانه از ۴ به ۶ متر، به طور متوسط باعث افزایش حدود ۹ درصدی نیروی مقاوم قاب‌ها می‌گردد. همچنین، افزایش ارتفاع طبقه از ۳ به ۴ متر، باعث افزایش ۱۳ درصدی نیروی مقاوم قاب‌ها می‌گردد. نتایج این بررسی بیانگر تاثیر مثبت وجود میانقاب، افزایش طول دهانه از ۴ به ۶ متر و افزایش ارتفاع طبقه از ۳ به ۴ متر، بر روند خرابی پیشرونده قاب‌های بتن مسلح می‌باشد.

کلمات کلیدی: خرابی پیشرونده، قاب بتن مسلح، میانقاب بنایی، افزایش طول دهانه، افزایش ارتفاع طبقه، بازشو

سابقه مقاله:					
دریافت	بازنگری	پذیرش	انتشار آنلاین	چاپ	شناسه دیجیتال:
۱۳۹۸/۰۹/۱۳	۱۳۹۸/۱۲/۲۸	۱۳۹۹/۰۱/۳۱	۱۳۹۹/۰۱/۳۱	۱۴۰۰/۰۳/۳۰	doi: 10.22065/jsce.2020.210392.2010
					https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2020.210392.2010

*نویسنده مسئول: ابراهیم خلیل زاده وحیدی

پست الکترونیکی: e_vahidi2000@yahoo.com

۱- مقدمه

ساختمان‌ها ممکن است تحت تاثیر تهدیدات گوناگونی قرار گیرند. این تهدیدات می‌توانند وابسته به عوامل طبیعی و یا غیر طبیعی باشند. علم مهندسی در مورد نحوه‌ی تحلیل و بررسی تهدیدات طبیعی مانند: باد، زلزله و... در سال‌های اخیر گسترش یافته است. تحقیق در رابطه با تهدیدات ناشی از عوامل غیرطبیعی مانند اقدامات تروریستی، انفجار، آتش سوزی، برخورد وسایل نقلیه زمینی و هواپیما به ساختمان و سایر موارد از مهم‌ترین عواملی هستند، که اخیرا مورد توجه مهندسین سازه قرار گرفته‌اند. یکی از مواردی که در دهه‌های اخیر توجه مهندسان سازه به آن افزایش پیدا کرده است، خرابی پیشرونده[1] نام دارد. بررسی خرابی پیشرونده در طراحی ساختمان‌ها به دلایل مختلفی اهمیت زیادی پیدا کرده است. عواملی مانند تحولات سیاسی و اجتماعی نیز باعث افزایش حوادث منجر به بروز خرابی پیشرونده شده است. برای مثال احتمال رخ دادن حملات تروریستی در تمام نقاط جهان وجود دارد. نمونه‌هایی از حوادثی که به صورت کلی یا جزئی باعث بروز خرابی پیشرونده در سازه‌ها شده‌اند، شامل: ۱- رونان پوینت[2]، ۲- ساختمان فدرال آلفرد مورا[3]، ۳-برج الکوبار[4]، ۴- برج‌های دو قلو مرکز تجارت جهانی آمریکا می‌باشند. توجه مهندسین به موضوع خرابی پیشرونده برای اولین بار پس از تخریب ساختمان رونان پوینت در لندن در سال ۱۹۶۸ آغاز گردید، پس از آن موسسات تهیه و تدوین آیین‌نامه‌های ساختمانی برای ارائه راه حل جهت جلوگیری و کاهش پدیده خرابی پیشرونده تلاش‌های زیادی صورت گرفت. حادثه ۱۱ سپتامبر سال ۲۰۰۱ و تخریب برج‌های دو قلو مرکز تجارت جهانی و ساختمان‌های همجوار آن یک شوک شدید را به پژوهشگران جهت بررسی دقیق پدیده خرابی پیشرونده وارد نمود که موجب شد پژوهشگران زیادی در سراسر جهان به بررسی نحوه ایجاد و شکل‌گیری خرابی پیشرونده در برج‌های مرکز تجارت جهانی بپردازند، پس از حادثه ۱۱ سپتامبر بررسی خرابی پیشرونده در ساختمان‌های دارای اهمیت بالا مورد توجه قرار گرفت. اولین آیین‌نامه در رابطه با خرابی پیشرونده GSA[5] [۱] در سال ۲۰۰۳ انتشار یافت، که توانست گامی مهم در جهت کمک به محققین در این زمینه را بردارد. پس از آیین‌نامه GSA در سال ۲۰۰۳ وزارت دفاع آمریکا اقدام به انتشار آیین‌نامه UFC4-023-03[6] [۲] نمود. موج جدید تحقیقات در رابطه با خرابی پیشرونده پس از انتشار این آیین‌نامه ایجاد شد، که به صورت فراگیر مورد استفاده پژوهشگران قرار گرفت. با انتشار آیین‌نامه NIST[7] [۳] در سال ۲۰۰۷ و اصلاح آیین‌نامه UFC در سال ۲۰۰۹ اقدامات قابل توجهی در رابطه با جلوگیری از خرابی پیشرونده در سازه‌ها برداشته شد. آیین‌نامه UFC 2009 بر اساس آیین‌نامه ASCE7-05 [8] [۴] خرابی پیشرونده را به عنوان" گسترش یک خرابی موضعی اولیه از یک المان به المان دیگر سازه که نهایتا منجر به فروریزش کل سازه یا بخش بزرگی از آن به صورت نامتناسب می‌گردد" تعریف می‌نماید. همچنین استاندارد ASCE7-05 بیان می‌کند ساختمان باید به نحوی طراحی گردد که در برابر خرابی موضعی کل سیستم سازه‌ای به صورت پایدار باقی مانده و اجازه بروز خرابی از محل خود به سایر اجزا به‌صورت نامناسب را ندهد. بر اساس استاندارد ASCE7-05 دو رویکرد اصلی برای جلوگیری از خرابی پیشرونده عبارتند از: طراحی مستقیم و طراحی غیر مستقیم. طراحی مستقیم، الزاماتی صریح در مورد مقاومت سازه در برابر خرابی پیشرونده را ارائه می‌دهد، که شامل روش‌های مسیر بار جایگزین[9] (AP) و روش مقاومت موضعی ویژه[10] (SLR) است. در طراحی غیر مستقیم مقاومت در برابر خرابی پیشرونده از طریق حداقل سطوح مقاومت، پیوستگی و شکل پذیری حاصل می‌گردد. آیین‌نامه UFC4-023-03 روش نیروهای مقاوم کششی [11] (TF) را در طراحی غیر مستقیم ارائه می‌دهد.

روش AP نشان می‌دهد، سازه پس از حذف ستون یا دیوار قادر به باز توزیع بار می‌باشد و طبق آن تغییر شکل‌ها و نیروهای داخلی ایجاد شده در اعضا از مقادیر مجاز تجاوز نمی‌نماید. در روش AP سازه به واسطه‌ی پاسخ خمشی غشایی در برابر تخریب مقاومت می‌کند. انواع روش‌های تحلیل در روش AP عبارتند از: تحلیل استاتیکی خطی، تحلیل استاتیکی غیرخطی و تحلیل دینامیکی غیرخطی

[1] Progressive Collapse
[2] Ronan Point
[3] Alfred Murrah
[4] Khobar Towers
[5] General Service Administration
[6] Unified Facilities Criteria
[7] National Institute of Standards And Technology
[8] American Society of Civil Engineers
[9] Alternate Path Method
[10] Specific Local Resistance
[11] Tie Forces

به‌طور کلی نتایج حاصل از تحلیل AP نتایج مطلوب‌تری نسبت به سایر روش‌ها را ارائه می‌دهد و استفاده از این روش نزد محققان و طراحان دارای اعتبار می‌باشد.

روش مقاومت موضعی ویژه SLR سطح مشخصی از مقاومت برشی و خمشی برای ستون‌های پیرامونی ساختمان را ایجاد می‌کند. مقاومت خمشی برابر بیشترین بار واحد اعمالی به سرتاسر ارتفاع ستون است که منجر به شکست خمشی آن می‌شود، یعنی یا سه مفصل در عضو تشکیل شده و یا شکست مشابه در آن رخ می‌دهد. به عبارتی با بکار بردن بار واحد برای مقاومت خمشی مبنا، نباید ستون و اتصال آن در برش شکسته شود. هنگامی که ظرفیت برشی قبل از ظرفیت خمشی شکل گیرد، شکست ناگهانی در عضو رخ می‌دهد که این امر سازه را به سمت تخریب هدایت می‌کند.

روش TF ساختمان باید به صورت یکپارچه به هم متصل باشد، یعنی دارای پیوستگی، شکل‌پذیری و مسیرهای جایگزین انتقال بار باشد. نیروهای مقاوم کششی که سیستم سازه‌ای از طریق آنها در برابر خرابی پیشرونده مقاومت می‌کند، می‌توانند از طریق المان‌های سازه‌ای موجود که با استفاده از روش‌های مرسوم طراحی تامین شوند.

از جمله مطالعاتی که در این زمینه صورت گرفته: جینکو کیم[12] در سال ۲۰۱۳، به بررسی نرم‌افزاری ظرفیت قاب‌های بتن مسلح دارای پانل فولادی در برابر خرابی پیشرونده پرداخته است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد، پانل‌های فولادی باعث افزایش ظرفیت قاب‌های بتن مسلح و کاهش پتانسیل خرابی پیشرونده می‌گردد [۵]. لی و همکاران [13] در سال ۲۰۱۶، به بررسی عددی و آزمایشگاهی خرابی پیش رونده‌ی قاب بتنی دارای میانقاب بنایی بدون بازشو پرداختند. برای این منظور در گام نخست، قاب چهار دهانه-دو طبقه با مقیاس یک سوم، که فقط در طبقه دوم دارای میانقاب بنایی بود، را مورد ارزیابی آزمایشگاهی قرار دادند. در گام بعدی پس از صحت سنجی، برای بررسی عوامل مهم و تاثیرگذار در رفتار قاب مورد آزمایش، اقدام به مدلسازی عددی کردند. نتایج این تحقیق نشان داده است که میانقاب بنایی تاثیر بسزایی در مقاومت قاب بتنی در مقابل خرابی پیش رونده و رفتار قاب بتنی دارد. شان و همکاران در سال ۲۰۱۶، در یک تحقیق آزمایشگاهی تاثیر میانقاب‌های دارای بازشو بر روند خرابی پیشرونده قاب‌های بتن مسلح مورد بررسی قرار دادند. برای این منظور قاب بتنی بدون میانقاب و قاب بتنی دارای میانقاب بازشو دار در آزمایشگاه مورد ارزیابی و مقایسه قرار دادند. نتایج این آزمایش نشان می‌دهد، وجود میانقاب دارای بازشو باعث افزایش سختی، کاهش شکل‌پذیری و افزایش حداکثر نیروی مقاوم قاب‌های بتن مسلح در برابر خرابی پیشرونده می‌شود [۷]. امانوئل برانسی[14] در سال ۲۰۱۷، اقدام به تهیه منحنی‌های شکنندگی براساس خرابی پیشرونده در قاب‌های بتن مسلح نموده است. در این تحقیق یک چارچوب احتمالاتی برای تجزیه و تحلیل ساختارها و تهیه منحنی‌های شکنندگی تحت خرابی پیشرونده بر روی قاب‌های کم ارتفاع بررسی شده است [۸]. ارن[15] در سال ۲۰۱۹ به بررسی تاثیر وجود میانقاب بر رفتار قاب‌های بتن مسلح تحت خرابی پیشرونده پرداخته است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد، وجود میانقاب باعث افزایش سختی و باعث افزایش حداکثر نیروی مقاوم قاب‌های بتن مسلح در برابر خرابی پیشرونده می‌شود [۹]. غلامپور در سال ۱۳۹۷ به بررسی تاثیر اثر حذف ستون در خرابی پیشرونده بر عملکرد لرزه‌ای سازه‌های فولادی دوگانه پرداخته است، نتایج این پژوهش بیان می‌کند بحرانی‌ترین حالت حذف ستون، حذف ستون کناری است، در هر سه سازه، حذف ستون در تراز طبقه همکف بحرانی ترین حالت را نسبت به ترازهای بالاتر برای سازه به وجود می‌آورد، حذف ستون گوشه و مهاربندهای متصل به آن سطح عملکرد ایمنی جانی را رد نموده و سازه معیارهای پذیرش را ارضا ننموده است، با افزایش ارتفاع سازه شاخص تنومندی با افزایش روبرو می‌گردد [۱۰]. مهدی زاده و کرم الدین در سال ۱۳۹۷ به بررسی ارزیابی امکان رخداد گسیختگی پیشرونده در قاب‌های خمشی فولادی (معمولی، متوسط و ویژه) بر اثرحذف ستون پرداخته‌اند. نتایج نشان می‌دهد که امکان آسیب در قاب‌های خمشی فولادی ویژه بیش از قاب‌های خمشی متوسط و معمولی می‌باشد. همچنین نتایج مشخص می‌کند که بر خلاف مقاوم سازی‌های لرزه‌ای که فراهم کردن شکل پذیری روشی مهم برای کاهش آسیب ساختمان‌ها می‌باشد، در خرابی ناشی از بارهای ثقلی، افزایش مقاومت و سختی اعضا می‌تواند گسترش خرابی را محدود نماید [۱۱].

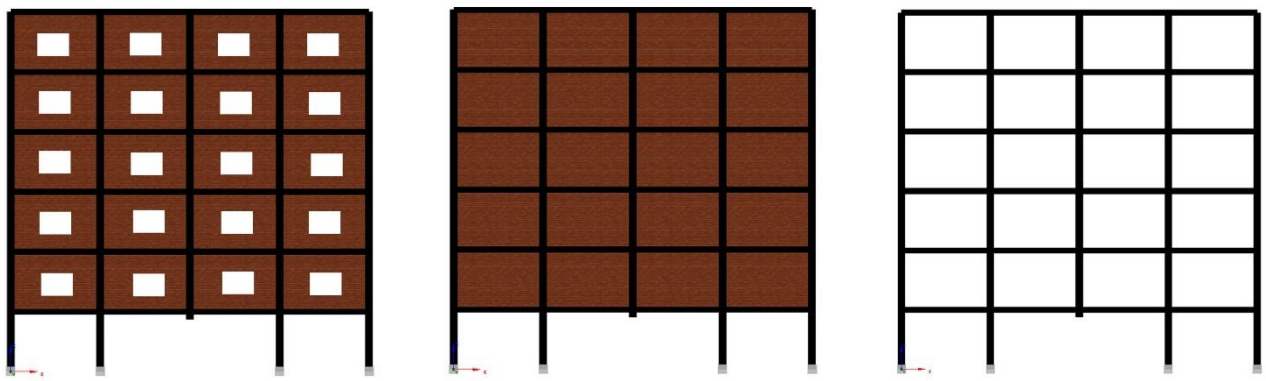
[12] Jinkoo Kim
[13] Shuang Lia
[14] Emanuele Brunesi
[15] Eren

در این مطالعه با استفاده از نرم‌افزار OpenSees[16] قاب‌های بتن مسلح ۶ طبقه با درصدهای مختلف بازشو در میانقاب با تغییر طول دهانه و ارتفاع طبقه تحت اثر سناریوی حذف ستون میانی طبقه همکف مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. تحلیل خرابی پیشرونده قاب‌ها در نرم‌افزار OpenSees با تحلیل استاتیکی غیرخطی به روش پوش‌داون با استفاده از مسیر بار جایگزین (AP) انجام می‌گردد. از آنجایی که احتمال وقوع خرابی پیشرونده به دلیل حملات تروریستی در اکثر نقاط جهان محتمل است لذا بررسی رفتار سازه‌ها با درصدهای مختلف بازشو در میانقاب با تغییر طول دهانه و ارتفاع طبقه تحت اثر پدیده خرابی پیشرونده ضروری به نظر می‌رسد [۱۲].

۲- مدل سازی قاب‌ها

۲-۱- معرفی مدل‌ها

در این مطالعه قاب‌های بتن مسلح ۶ طبقه که جز قاب‌های متداول موجود هستند، دارای ۴ دهانه با سیستم باربر جانبی قاب خمشی متوسط می‌باشند. قاب‌ها در ۲ حالت افزایش طول دهانه و افزایش ارتفاع طبقه با درصدهای ۰، ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۱۰۰ درصد بازشو در میانقاب مورد بررسی قرار می‌گیرند. در حالت اول طول دهانه از ۴ به ۶ متر با گام‌های ۰/۵ متری افزایش یافته که ارتفاع طبقات برابر ۳ متر می‌باشد. در حالت دوم ارتفاع طبقات از ۳ به ۴ متر افزایش یافته و طول دهانه‌ها برابر ۶ متر می‌باشد. قاب‌های مورد نظر با استفاده از نرم افزار ایتبس [۱۳] و طبق مبحث ششم [۱۴] و مبحث نهم [۱۵]مقررات ملی ساختمان ایران و همچنین استاندارد ۲۸۰۰ [۱۶] تحلیل و طراحی شده است. در طراحی آنها، محل ساختگاه، منطقه‌ای با خطر لرزه خیزی متوسط، خاک ساختگاه نوع II و ساختمان یا اهمیت متوسط از نوع تجاری فرض شده است. همچنین بار مرده و زنده در طبقات به ترتیب ۵۲۰ و ۲۰۰ کیلوگرم بر متر مربع و در بام هم به ترتیب ۵۷۰ و ۱۵۰ کیلوگرم بر متر مربع می‌باشد. در این مطالعه ابتدا تمامی قاب‌ها به صورت مجزا و با استفاده از نرم‌افزار ETABS طراحی و سپس با نرم‌افزار OpenSees مدل شده‌اند. طرح قاب‌ها با مقاطع یکسان، موجب مقایسه مناسب درصدهای مختلف بازشو تحت تغییر طول دهانه و ارتفاع طبقه در خرابی پیشرونده می‌گردد. شکل ۱ قاب‌های مورد بررسی در این مطالعه را نشان می‌دهد، جداول ۱ و ۲ ابعاد مقاطع مورد استفاده در قاب‌ها را ارائه می‌دهند.



شکل ۱: قاب‌های مورد بررسی با درصدهای مختلف بازشو در میانقاب

[16]Open system for earthquake engineering

جدول ۱: مشخصات مقاطع ارتفاع طبقه ۳ متر و طول دهانه‌ی ۴ به ۶ متر

تیر			ستون	
طول تیر (cm)	سطح مقطع (mm^2)	تعداد میلگرد	سطح مقطع (mm^2)	تعداد میلگرد
۴۰۰	۴۰۰*۳۰۰	۱۸Φ۸	۵۰۰*۵۰۰	۲۰Φ۱۲
۴۵۰	۴۰۰*۳۰۰	۲۲Φ۶	۵۰۰*۵۰۰	۲۰Φ۱۲
۵۰۰	۴۰۰*۳۰۰	۲۰Φ۸	۵۰۰*۵۰۰	۲۰Φ۱۲
۵۵۰	۴۰۰*۳۰۰	۲۴Φ۶	۵۰۰*۵۰۰	۲۰Φ۱۲
۶۰۰	۴۰۰*۳۰۰	۲۵Φ۶	۵۰۰*۵۰۰	۲۰Φ۱۲

جدول ۲: مشخصات مقاطع طول دهانه‌ی ۶ متر و ارتفاع طبقه ۳ به ۴ متر

ستون			تیر	
ارتفاع طبقه (cm)	سطح مقطع (mm^2)	تعداد میلگرد	سطح مقطع (mm^2)	تعداد میلگرد
۳۰۰	۵۰۰*۵۰۰	۱۶Φ۱۶	۴۰۰*۳۰۰	۲۵Φ۶
۴۰۰	۵۰۰*۵۰۰	۲۰Φ۱۶	۴۰۰*۳۰۰	۲۵Φ۶

۲-۲- معرفی میانقاب

میانقاب‌ها، اعضایی هستند که توسط تیر و ستون محاط شده است و برای تحمل بار قائم یا بارجانبی یا هر دوی آن‌ها به کار می‌روند. برای مدل سازی میانقاب از روش ارائه شده در دستورالعمل بهسازی لرزه‌ای سازه‌های موجود (نشریه ۳۶۰) استفاده گردیده است[۱۷]. در این روش میانقاب بنایی را با دستک فشاری معادل به عرض a که طبق رابطه ۱ محاسبه می‌شود، و ضخامت مساوی میانقاب بنایی، جایگزین می‌کنند[۱۸]. برای به‌دست آوردن سختی ارتجاعی میانقاب دارای بازشو می‌توان از روش شبیه سازی سختی ارتجاعی میانقاب به‌وسیله دستک فشاری معادل در اطراف بازشو مطابق شکل ۲ استفاده نمود .

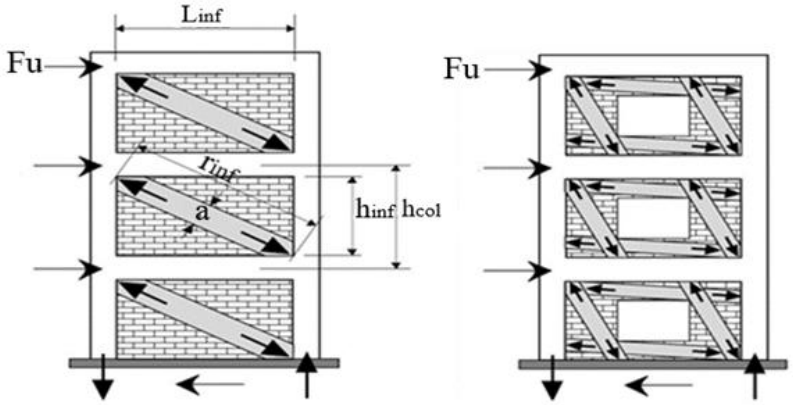
$$a = 0.175[\lambda_1 h_{col}]^{-0.4} r_{inf} \quad (1)$$

$$\lambda_1 = [\frac{E_{me} t_{inf} \sin(2\theta)}{4 E_{fe} I_{col} h_{inf}}] \quad (2)$$

در رابطه (۱) a عرض دستک فشاری جایگزین میانقاب و بر حسب میلیمتر، λ_1 ضریبی برای محاسبه‌ی عرض معادل، h_{col} ارتفاع مرکز به مرکز تیر بالا و پایین میانقاب بر حسب میلیمتر و همچنین r_{inf} : طول قطری میانقاب بر حسب میلیمتر می‌باشد. در رابطه (۲) h_{inf} ارتفاع میانقاب بر حسب میلیمتر، E_{fe} و E_{me} به ترتیب ضریب ارتجاعی مصالح قاب و ضریب ارتجاعی میانقاب بر حسب(N/mm^2)، I_{col} ممان اینرسی ستون بر حسب (mm^4)، t_{inf} ضخامت میانقاب و دستک فشاری معادل بر حسب میلیمتر، θ زاویه‌ای برحسب رادیان است، که تانژانت آن از تقسیم ارتفاع ستون بر طول تیر به دست می‌آید. روابط ۱ و ۲ ارائه شده در بالا جهت بدست آوردن عرض دستک فشاری معادل، هنگام وارد شدن بارهای افقی می‌باشند. از آنجا که تحلیل مورد نظر جهت بررسی خرابی پیشرونده در این مطالعه تحلیل پوش داون

می‌باشد، روابط ۱ و ۲ باید اصلاح گردند. h_{col} (ارتفاع ستون مابین خط مرکز به مرکز تیرهای بالایی و پایینی طبقه) به L_b (طول تیر مابین خط مرکز به مرکز ستون‌های دو طرف میانقاب) و h_{inf} (ارتفاع میانقاب) به L_{inf} (طول میانقاب) و I_{col} (ممان اینرسی ستون) به I_b (ممان اینرسی تیر) تغییر می‌یابند. ضریب ارتجاعی میانقاب (E_{me}) براساس شیب منحنی تنش_کرنش بین ۵ تا ۳۳ درصد مقاومت فشاری نهایی محاسبه می‌شود. معمولا مقدار ضریب ارتجاعی از رابطه ۳ به‌دست می‌آید. در رابطه ۳ ضریب ارتجاعی میانقاب، ۵۵۰ برابر مقاومت فشاری مورد انتظار در نظر گرفته می‌شود.

$$E_{me} = 550 f_{me} \qquad (3)$$



شکل۲: جایگزینی میانقاب دارای بازشو و فاقد بازشو با دستک فشاری معادل [۱۷]

۲-۳- جزئیات مدل سازی

به منظور بررسی دقیق خرابی پیشرونده قاب‌های بتن مسلح ۶ طبقه از نرم‌افزار اجزا محدود OpenSees استفاده شده است. نرم‌افزار اجزا محدود OpenSees یک نرم‌افزار قدرتمند کد باز است، که با استفاده از روش اجزا محدود به تحلیل انواع سازه‌ها می‌پردازد. مدل سازی قاب‌ها به صورت ماکرو در نرم‌افزار OpenSees انجام شده است. برای مصالح بتنی از Concrete01 استفاده گردیده که در آن تنش کششی بتن صفر می‌باشد و به دلیل نداشتن مشکلات همگرایی در تحلیل بسیار مناسب‌اند. مقاومت و کرنش بتن محصور شده (بتن موجود در هسته[۱۷]) و بتن محصور نشده (بتن مورد استفاده در پوشش[۱۸]) با هم تفاوت دارند، برای هر قسمت، مشخصات جداگانه‌ای تعریف شده است. برای مصالح فولادی از Steel01 استفاده گردیده، که به صورت تک محوری دو خطی با سخت شوندگی سینماتیک و سخت شوندگی ایزوتروپیک می‌باشند. مقاومت فشاری بتن ۳۰ مگاپاسکال، مقاومت فشاری اجزای میانقاب ۶ مگاپاسکال و مقاومت تسلیم و نهایی برای میلگردهای فولادی به ترتیب ۴۰۰ و ۶۰۰ مگاپاسکال منظور شده است. در نرم‌افزار مقاطع بتنی به وسیله مقاطع مرکب[۱۹] تعریف شده‌اند، در این مقاطع برای هر قسمت از مصالح تک محوری[۲۰] استفاده می‌شود، که فرضیه‌های تیر برنولی منظور می‌گردد. هر مقطع مرکب خود به قسمت‌های تقسیم می‌شود که در هر لحظه از تحلیل با توجه به فاصله آن از تار خنثی، متحمل یک کرنش می‌شود. اگر این کرنش در ضریب ارتجاعی متناظر ضرب شود یک جزء تنش به وجود می‌آید. در صورتیکه این جزء تنش در سطح مقطع مربوط به خود ضرب شود یک جزء نیرو به وجود می‌آید که از انتگرال‌گیری این جزء نیروها در تمام سطح مقطع، نیروی محوری مقطع حاصل می‌شود. هر جزء نیرو در بازوی آن تا محل تار خنثی ضرب شود، مقدار جزیی لنگری به وجود می‌آید که با انتگرال‌گیری از این جز لنگرها میتوان لنگر خمشی موجود در مقطع را به دست آورد. بنابراین از خصوصیات مقاطع مرکب می‌توان به درنظرگرفتن نیروی محوری و لنگر خمشی در مقطع اشاره نمود. در نظر گرفتن توام نیروی محوری و لنگرخمشی سبب لحاظ شدن درجات آزادی انتقالی و دورانی در مقطع می‌گردد. برای

[17] Core concrete
[18] Cover concrete
[19] Fiber Section
[20] Uniaxial Material

المان‌های تیر و ستون قاب از المان‌های تیر ستون غیرخطی[21] استفاده گردیده؛ تا رفتار واقعی المان را در تحلیل ارزیابی شود. جهت برآورد رفتار غیرخطی هندسی از تبدیل همگرد[22] استفاده گردیده؛ در این نوع تبدیل، تبدیلات هندسیِ غیرخطی به صورت کاملاً دقیق از سیستم محلّی به سیستم کلّی محاسبه می‌گردد. برای المان میانقاب از المان‌های خرپایی[23] استفاده شده است. این المان به صورت خرپایی عمل می‌نماید که با تخصیص مقطع به این المان در نرم‌افزار تعریف شده‌اند.

۲-۴- تحلیل استاتیکی غیرخطی

در این مطالعه از تحلیل استاتیکی غیرخطی به روش پوش‌داون جهت بررسی خرابی پیشرونده استفاده شده است. تحلیل پوش‌داون به دو روش بارکنترل و تغییرمکان کنترل قابل انجام است. هدف از تحلیل استاتیکی غیر خطی در تحلیل خرابی پیشرونده، برآورد رفتار سازه به کمک تخمین مقاومت و تغییرشکل مورد نیاز اعضا و مقایسه آن‌ها می‌باشد. این برآورد بر اساس شناسایی پارامترهای مهم رفتاری شامل منحنی ظرفیت و ... خواهد بود. دلیل ارجحیت استفاده از این نوع تحلیل در بررسی خرابی پیشرونده، سرعت بالای انجام آن، سادگی تفسیر نتایج و دقت قابل قبول آن می‌باشد. جهت بررسی خرابی پیشرونده از روش مسیر بار جایگزین (AP) که توسط آیین‌نامه‌های DoD و GSA پیشنهاد گردیده، استفاده می‌گردد.

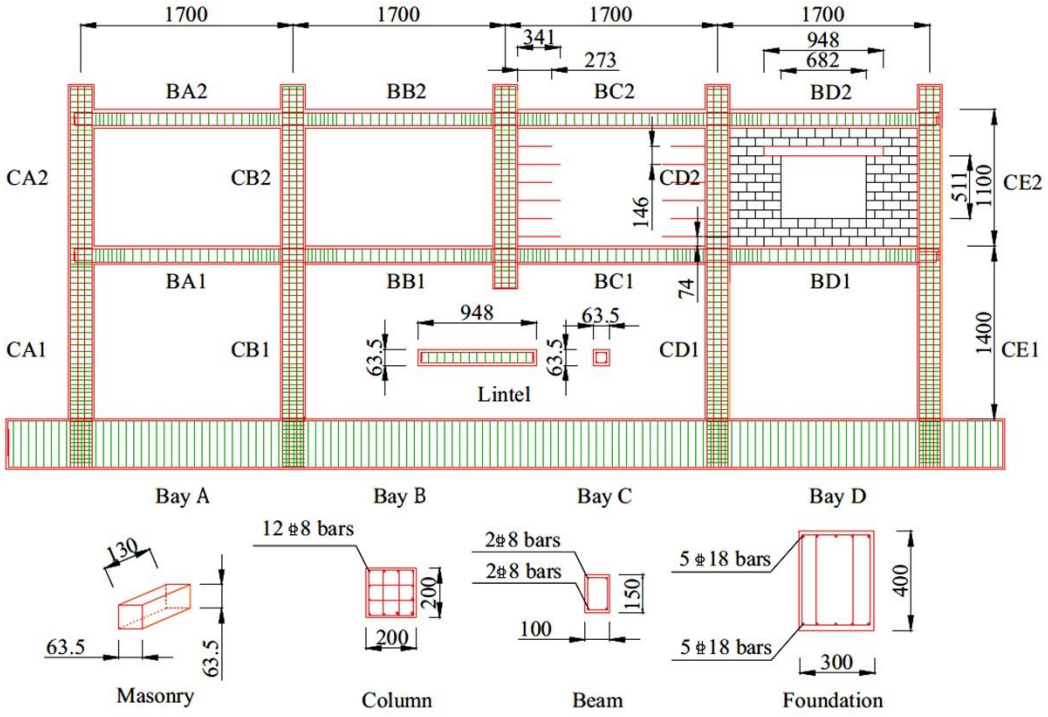
۳- صحت سنجی

بررسی خرابی پیشرونده با استفاده از مدل آزمایشگاهی با مقیاس واقعی امری بسیار مشکل است. روش اجزای محدود یک گزینه‌ی مناسب جهت بررسی پدیده خرابی پیشرونده می‌باشد، که با استفاده از آن می‌توان انواع مدل‌ها را تحت اثر خرابی پیشرونده بررسی نمود. در این مقاله جهت صحت سنجی، از مطالعات آزمایشگاهی شان و همکاران [۷] که هندسه و جزئیات مدل آزمایشگاهی آنها در شکل ۳ نشان داده شده، استفاده گردیده است. هدف اصلی شان و همکاران بررسی و مقایسه عملکرد قاب بتنی دو طبقه-چهار دهانه در مقیاس یک سوم، با و بدون میانقاب بنایی بوده است. برای این منظور شان و همکاران، در نمونه‌های آزمایشگاهی سناریوی خرابی پیش رونده توسط اعمال بار شبه استاتیکی بر روی ستون وسط، شبیه سازی نمودند و بار گذاری را بر اساس روش معروف پوش‌داون، به صورت جابجایی کنترل و توسط دو عدد جک اعمال کردند. همچنین جهت جلوگیری از جابجایی خارج از صفحه، نمونه‌های آزمایشگاهی را توسط غلطک‌هایی که در دو طرف قاب قرار دادند، به شکل مناسبی مهار کردند. در ساخت نمونه آزمایشگاهی برای طبقه اول و دوم به ترتیب از بتن با مقاومت فشاری ۴۱/۳ و ۳۱/۸ مگاپاسکال و از میلگردهایی با مقاومت تسلیم و نهایی به ترتیب ۴۱۵ و ۵۸۸ مگاپاسکال استفاده شده است. همچنین مقاومت فشاری و برشی دیوار بنایی به ترتیب ۱۲/۸ و ۱/۰۸ مگاپاسکال بوده است. در جدول ۳ ، مصالح و المان‌های مورد استفاده برای مدلسازی و صحت سنجی در نرم‌افزار OpenSees، نشان داده شده است. در شکل ۴ نمودار نیرو-جابجایی نمونه‌های آزمایشگاهی و عددی برای سه حالت قاب بدون میانقاب، قاب با میانقاب بدون بازشو و قاب دارای میاناب بازشو دار نشان داده شده است. با توجه به شکل ۴ ، مدلسازی نمونه آزمایشگاهی در نرم‌افزار OpenSees، با دقت قابل قبول و کافی صورت گرفته است.

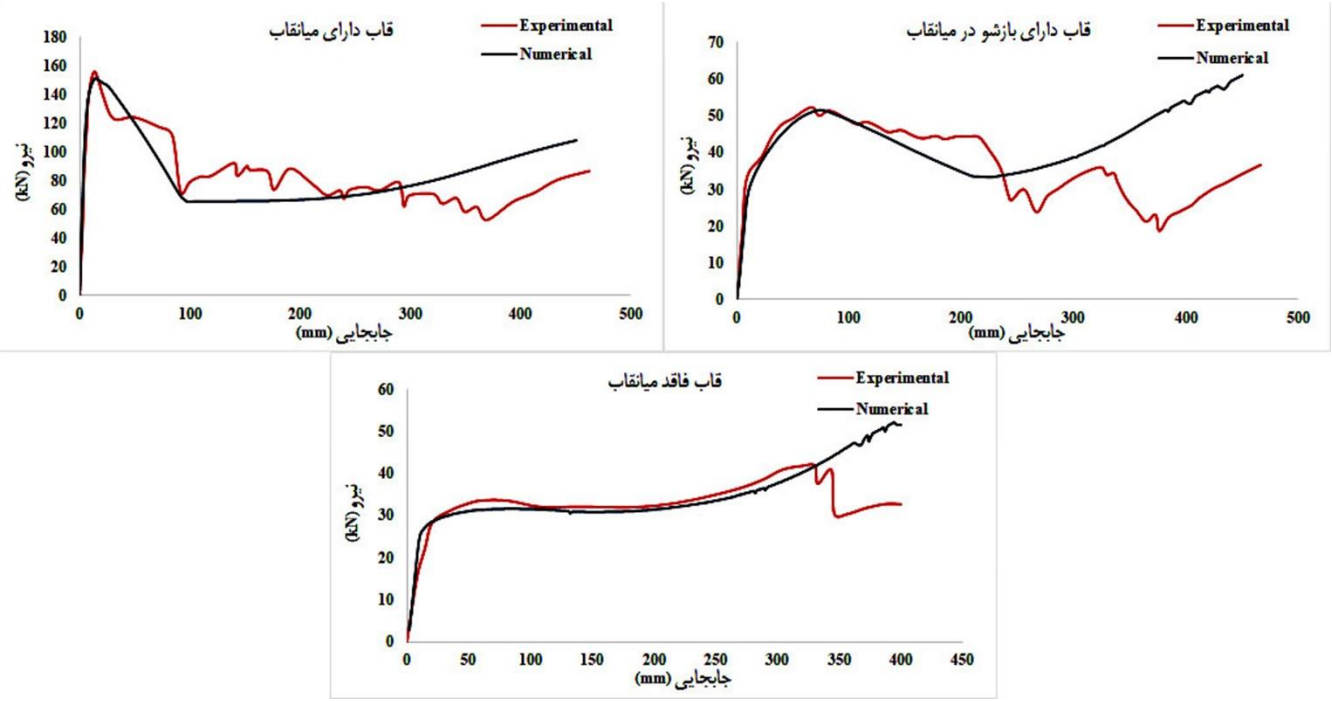
[21] nonlinearBeamColumn
[22] Geometric Transformation
[23] trussSection

جدول ۳: مصالح و المان‌های مورد استفاده در مدل نرم‌افزاری جهت صحت سنجی

مصالح و المان‌ها در مدل نرم‌افزاری	
Steel01	مصالح فولاد
Concrete01	مصالح بتن
forceBeamColumn	المان تیر و ستون
Concrete01	مصالح میانقاب
trussSection	المان میانقاب



شکل ۳: هندسه و جزئیات نمونه آزمایشگاهی شان و همکاران [۷]



شکل ۴: مقایسه منحنی ظرفیت مدل‌های نرم‌افزاری با مدل‌های آزمایشگاهی

۴- نتایج تحلیل خرابی پیشرونده

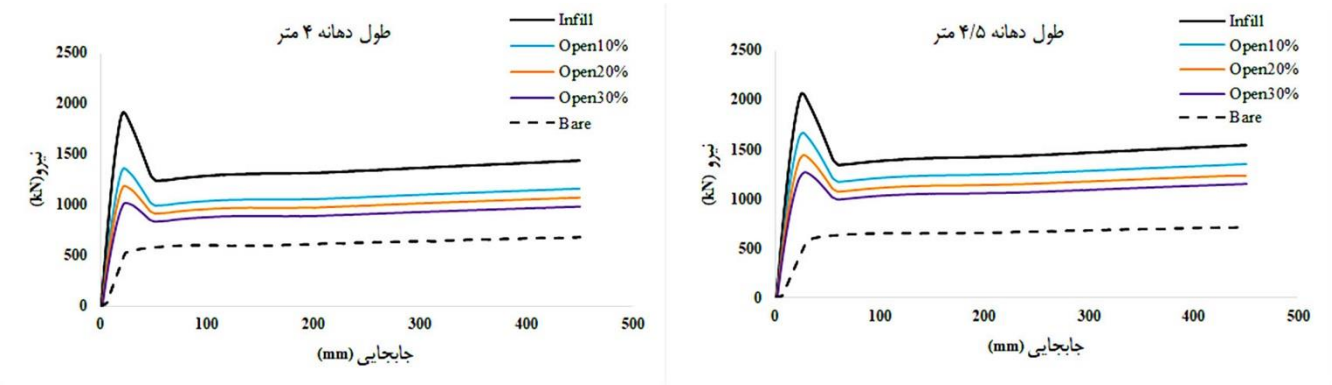
در این مطالعه با استفاده از روش مسیر بارجایگزین (AP) و تحلیل پوش‌داون به تحلیل قاب‌ها پرداخته شده است. در جدول ۴ مشخصات مدل‌های مورد بررسی ارائه گردیده است. در این جدول منظور از حالت اول بررسی تاثیر افزایش طول دهانه و حالت دوم بررسی تاثیر افزایش ارتفاع طبقه می‌باشد.

جدول ۴: مشخصات کلی مدل‌های مورد بررسی

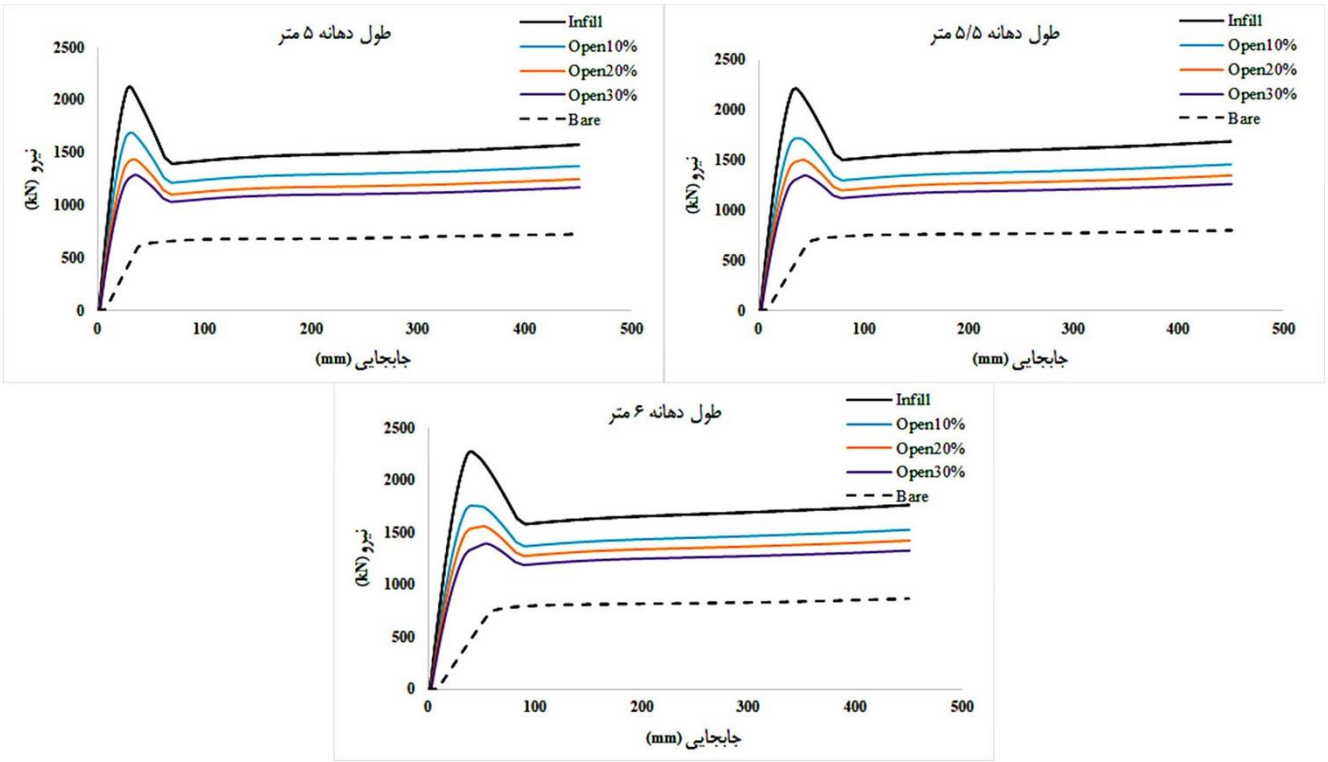
موقعیت ستون حذف شده	روش تحلیل	درصد بازشو	گام افزایش (m)	طول دهانه (m)	ارتفاع طبقات (m)	حالت
ستون میانی	پوش داون	۰-۱۰-۲۰-۳۰-۱۰۰	۰/۵	۶-۴	۳	حالت اول
ستون میانی	پوش داون	۰-۱۰-۲۰-۳۰-۱۰۰	۱	۶	۴-۳	حالت دوم

۴-۲- بررسی تاثیر افزایش طول دهانه

در این قسمت به بررسی تاثیر افزایش طول دهانه بر خرابی پیش‌رونده قاب بتنی دارای میانقاب بنایی پرداخته می‌شود. برای این منظور نمودار نیروی مقاوم در مقابل خرابی-جابجایی گره بالایی ستون حذف شده مدل‌های عددی با ارتفاع ۳ متر و طول ۴ تا ۶ متر مورد مقایسه قرار گرفته است. مطابق شکل ۵ و ۶ در همه نمونه‌ها بیشترین نیروی مقاوم در برابر خرابی مربوط به قاب دارای میانقاب بدون بازشو می‌باشد و با افزایش درصد بازشو مقدار آن کاهش می‌یابد، بگونه‌ای که نمونه‌ی بدون میانقاب بنایی دارای کمترین نیروی مقاوم در برابر خرابی می‌باشد. افزایش مقاومت در برابر خرابی در قابهای دارای میانقاب بنایی به دلیل اندرکنش بین قاب و میانقاب و انتقال بارها به پای ستون‌های کناری توسط میانقاب می‌باشد. به عبارت بهتر میانقاب‌ها مکانیزم انتقال بار را تغییر می‌دهند و در نتیجه نیروی محوری و برشی ستون‌های کناری را افزایش و مقدار لنگر خمشی وارد بر تیرها کاهش خواهد داد[۱۹].

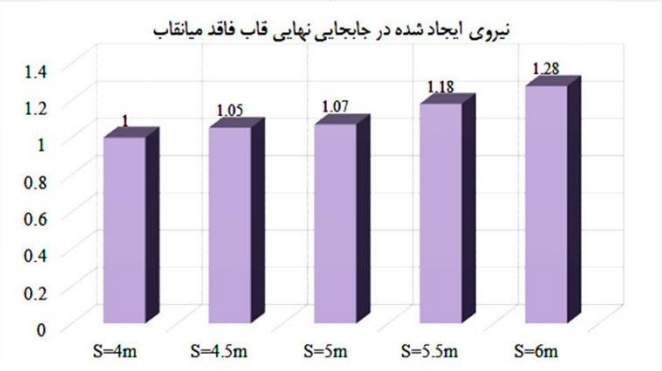


شکل ۵: منحنی نیرو-جابجایی برای قاب‌ها با طول دهانه ۴ و ۴/۵ متر

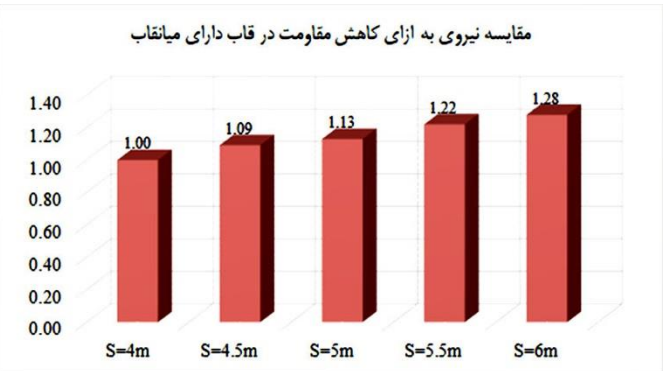


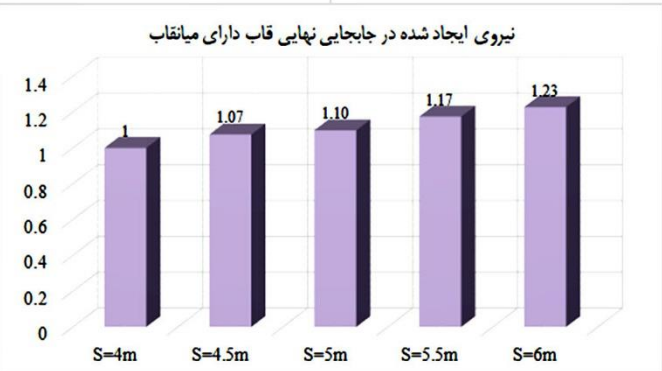
شکل ۶: منحنی نیرو-جابجایی برای قاب‌ها با طول دهانه ۵، ۵/۵ و ۶ متر

به منظور مقایسه بهتر نمودارهای ارائه شده در شکل‌های ۵ و ۶ به ازای هر مقدار بازشو در میانقاب سه نمودار متناظر با حداکثر نیروی ایجاد شده و متناظر با کاهش آنی نیروی مقاوم و متناظر با نیرو به ازای جابجایی نهایی قاب‌ها در شکل‌های ۷ ، ۸ ، ۹ ، ۱۰ و ۱۱ ارائه شده است. به وسیله این نمودارها می‌توان به راحتی تاثیر افزایش طول دهانه بر تغییرات نیرو در هر کدام از قاب‌های مورد بررسی را مشاهده نمود. لازم به ذکر است در این مقایسه هر کدام از قاب‌های مورد بررسی نسبت به قاب متناظر خود که دارای طول دهانه ۴ متر می‌باشد در نظر گرفته شده‌اند که با استفاده از آن‌ها می‌توان تاثیر افزایش طول دهانه بر درصدهای مختلف بازشو در میانقاب را مورد مقایسه قرار داد.

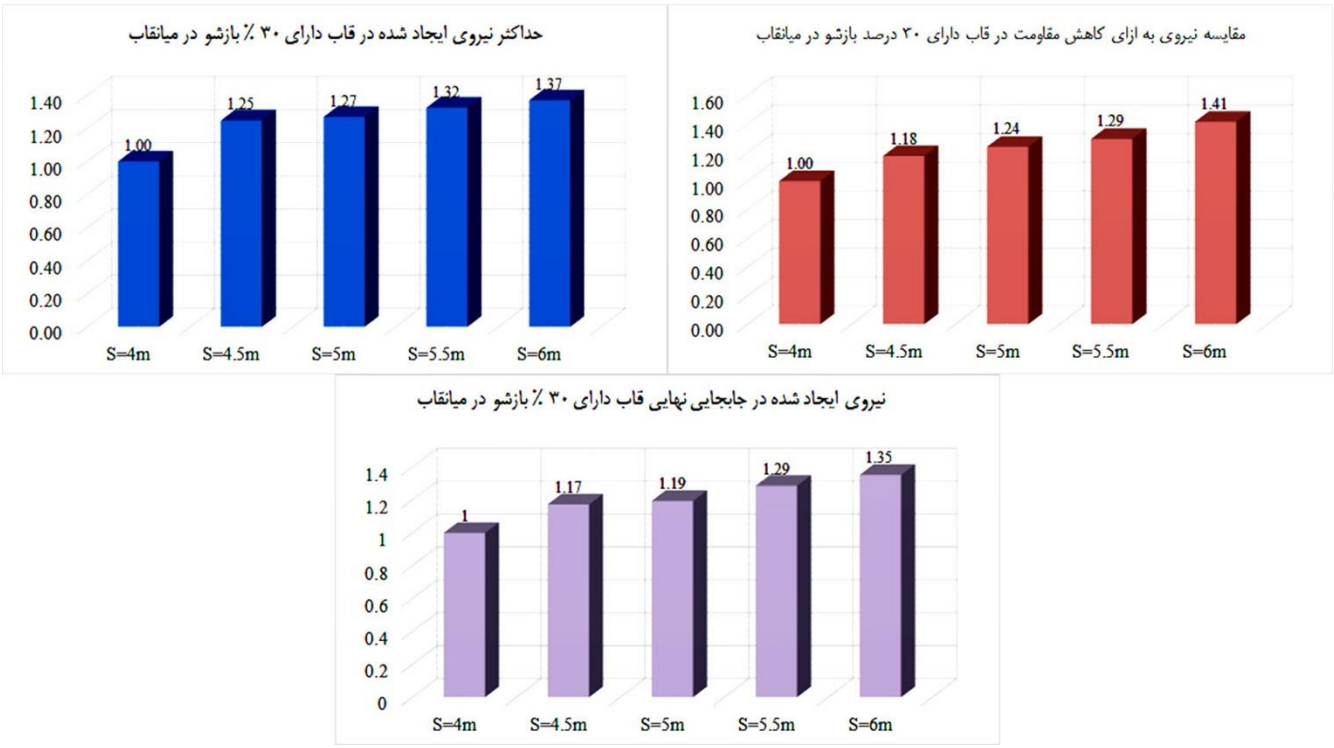


شکل ۷: بررسی تاثیر افزایش طول دهانه در قاب‌های فاقد میانقاب



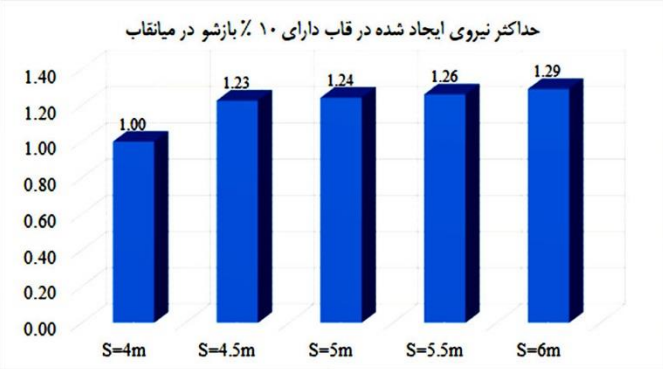


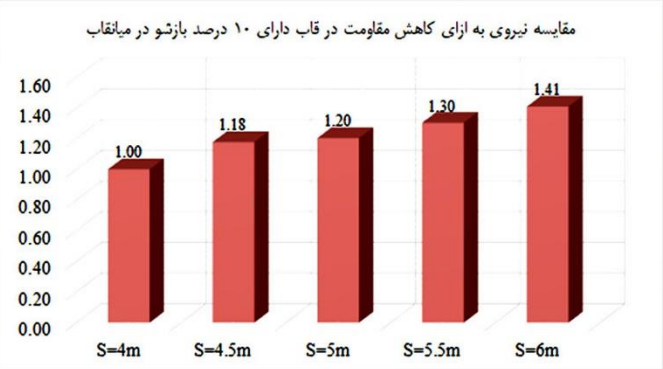
شکل ۸: بررسی تاثیر افزایش طول دهانه در قاب‌های دارای میانقاب فاقد بازشو

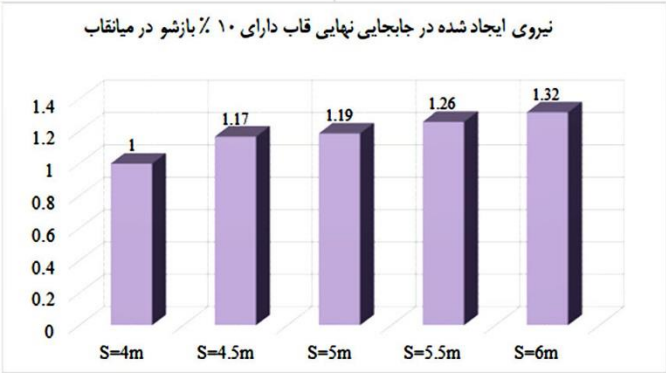


شکل ۹: بررسی تاثیر افزایش طول دهانه در قاب‌های دارای ۳۰ ٪ بازشو

شکل ۱۰: بررسی تاثیر افزایش طول دهانه در قاب‌های دارای ۲۰ ٪ بازشو





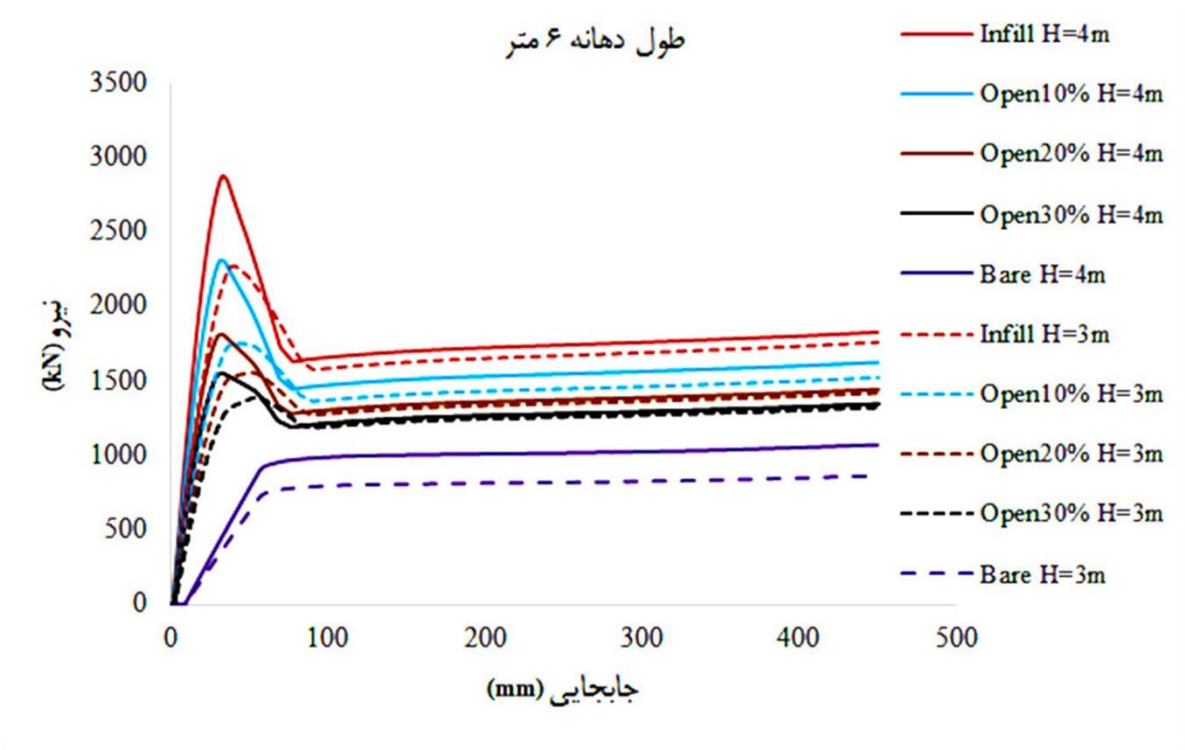


شکل ۱۱: بررسی تاثیر افزایش طول دهانه در قاب‌های دارای ۱۰ ٪ بازشو

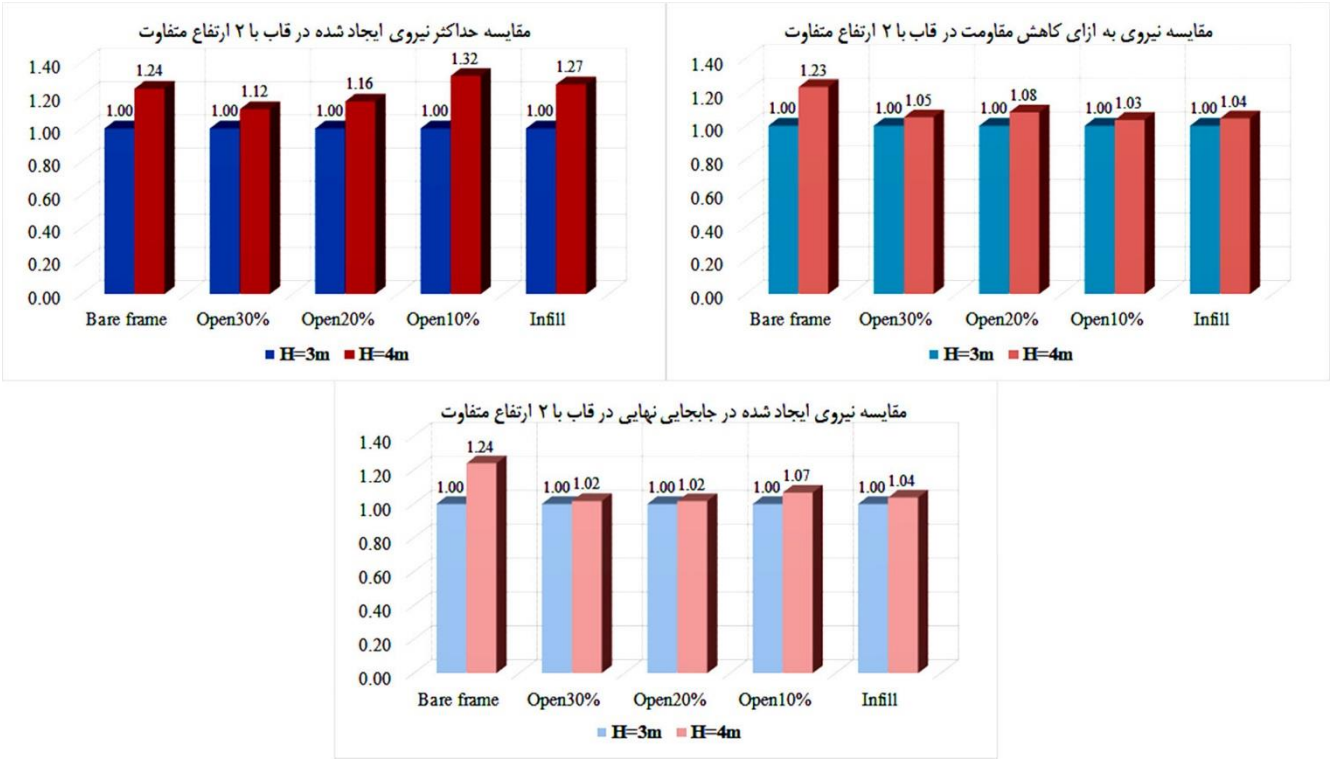
با توجه به شکل‌های ۷ تا ۱۱، در همه نمونه‌ها با افزایش طول دهانه مقدار نیروی مقاوم در مقابل خرابی افزایش یافته است. این افزایش مقاومت به این دلیل است که در طراحی سازه‌های با طول دهانه بیشتر، ظرفیت خمشی تیرها افزایش پیدا کرده است. به عبارت بهتر در سازه‌های با پتانسیل خرابی پیش رونده به دلیل اینکه ابتدا تیرها دچار شکست می‌شوند، با افزایش نسبت ظرفیت به تقاضای تیرها، مقدار مقاومت در مقابل خرابی سازه افزایش پیدا می‌کند.

۴-۲ بررسی تاثیر افزایش ارتفاع طبقه

در این قسمت به بررسی تاثیر افزایش ارتفاع طبقه قاب‌ها در مدل‌های مورد بررسی پرداخته می‌شود. برای این مظور در شکل ۱۲ نمودار نیروی مقاوم در مقابل خرابی-جابجایی گره بالایی ستون حذف شده مدل‌های عددی با طول دهانه ۶ متر و ارتفاع ۳ و ۴ متر و دارای میانقاب با درصد بازشوهای ۰ ، ۱۰ ، ۲۰ ، ۳۰ و ۱۰۰ مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. همچنین به منظور مقایسه بهتر نمودار ارائه شده در شکل ۱۲ برای تمام مدل‌های مورد بررسی سه نمودار متناظر با حداکثر نیروی ایجاد شده و متناظر با کاهش آنی نیروی مقاوم و متناظر با نیرو به ازای جابجایی نهایی قاب‌ها در شکل ۱۳ ارائه شده است. لازم به ذکر است در این مقایسه هر کدام از قاب‌های مورد بررسی نسبت به قاب متناظر خود که دارای ارتفاع طبقات ۳ متر می‌باشد در نظر گرفته شده است.



شکل ۱۲: منحنی نیرو-جابجایی برای قاب‌ها با طول دهانه ۶ متر با ۲ ارتفاع متفاوت



شکل ۱۳: بررسی تاثیر افزایش ارتفاع طبقه بر درصدهای مختلف بازشو در میانقاب

بر اساس شکل ۱۲ و ۱۳ در حالتی که قاب بتنی بدون میانقاب باشد، در اثر افزایش ارتفاع از ۳ متر به ۴ متر، حداکثر نیروی مقاوم در مقابل خرابی ۲۴ درصد افزایش یافته است. علت این افزایش نیروی مقاوم در برابر خرابی، افزایش ظرفیت ستون در اثر افزایش ارتفاع آن است. به عبارت بهتر در طراحی سازه بتنی با افزایش ارتفاع ستون، نیاز لرزه‌ای افزایش پیدا می‌کند و برای رسیدن به عملکرد مطلوب سازه، با افزایش نیاز لرزه‌ای باید ظرفیت لرزه‌ای سازه را نیز افزایش دهیم، که این افزایش ظرفیت ستون سبب افزایش نیروی مقاوم در برابر خرابی شده است. بنابراین در سازه‌های دارای پتانسیل خرابی پیش رونده علاوه بر میانقاب بنایی، مهمترین عامل در کنترل و جلوگیری از وقوع خرابی افزایش ظرفیت اعضای سازه‌ای می‌باشد. به همین دلیل، در حالتی که میانقاب بنایی بدون بازشو در قاب بتنی وجود دارد، افزایش ارتفاع از سه متر به چهار متر موجب افزایش نیروی مقاوم در برابر خرابی به اندازه ۲۷ درصد شده است.

۵- نتیجه گیری

این مطالعه به بررسی تاثیر افزایش طول دهانه و ارتفاع طبقه بر خرابی پیشرونده قاب‌های بتن مسلح دارای درصدهای مختلف بازشو در میانقاب بنایی پرداخته است. با توجه به عنوان مطالعه صورت گرفته بررسی تاثیر ۳ پارامتر؛ درصدهای مختلف بازشو در میانقاب، افزایش ارتفاع طبقه و افزایش طول دهانه بر روند خرابی پیشرونده ضروری است. اکثر طراحان سازه به هنگام مدلسازی، سختی میانقاب ها را در نظر نگرفته و به وارد کردن بار ناشی از آن‌ها روی تیرها بسنده می‌کنند. این در حالی است که در صورت عدم مدلسازی میانقاب‌ها و یا درصدهای مختلف بازشو در آن‌ها نتایج به دست آمده از تحلیل خرابی پیشرونده، دقت کافی را ندارند. از این رو در این پژوهش اثر درصدهای مختلف بازشو در میانقاب بر اعضای قاب خمشی بتن مسلح ضروری به نظر می‌رسد. با توجه به تنوع در ساخت یک سازه از سوی طراحان و گسترش عوامل منتهی به خرابی پیشرونده، بررسی تاثیر افزایش ارتفاع طبقه و افزایش طول دهانه بر روند خرابی پیشرونده ضروری می‌باشد، این در حالی است که در صورت شناخت رفتار سازه تحت افزایش ارتفاع طبقه و طول دهانه بر خرابی پیشرونده، می‌توان سازه‌ها را به نحوی بهینه در برابر این پدیده طراحی نمود. خرابی پیشرونده در قاب‌های مورد بررسی با حذف ستون میانی طبقه همکف شبیه سازی گردیده است. نتایج اصلی این مطالعه به شرح زیر می‌باشد:

- وجود بازشو در میانقاب باعث کاهش سختی جانبی آن‌ها می‌گردد؛ بر اساس نتایج به دست آمده وجود بازشو در میانقاب، نیروی مقاوم قاب‌ها در برابر خرابی پیشرونده را کاهش می‌دهد. درصدهای مختلف به میزان ۱۰ ٪، ۲۰ ٪، ۳۰ ٪ و ۱۰۰ ٪ بازشو در میانقاب، به ترتیب نیروی مقاوم آن‌ها را به میزان ۲۳ ٪، ۳۱ ٪، ۳۹ ٪ و ۶۲ ٪ نسبت به قاب دارای میانقاب فاقد بازشو، کاهش می‌دهد.

- با توجه به منحنی ظرفیت قاب‌ها مشاهده گردید، افزایش هر ۰/۵ متر طول دهانه بین ۴ تا ۶ متر، باعث افزایش حدود ۹ درصدی نیروی مقاوم قاب‌ها می‌گردد.

- با توجه به منحنی ظرفیت قاب‌ها مشاهده گردید، افزایش ارتفاع طبقه از ۳ به ۴ متر، باعث افزایش حدود ۱۳ درصدی نیروی مقاوم قاب‌ها می‌گردد.

- در سازه‌های دارای پتانسیل خرابی پیش رونده، وجود میانقاب بنایی و افزایش ظرفیت اجزای سازه‌ای مخصوصاً تیرها دو عامل مهم در کنترل و جلوگیری از خرابی می‌باشند.

مراجع

[1] U.S. General Service Administration (U.S. GSA). *Progressive collapse analysis and design guidelines for newfederal office buildings and major modernization projects*. Washington (DC). (2003)

[2] Unified Facilities Criteria (UFC). Design of Buildings to Resist Progressive Collapse, Department of Defense, 2005

[3] National Institute of Standards And Technology (NIST). *Best Practices For Reducing The Potential For Progressive Collapse In Buildings:* NISTIR 7396. U.S.Department Of Commerce. (2007)

[4] American Society of Civil Engineers, *Minimum design loads for buildings and other structures*: ASCE/SEI 7-05. Reston,Virginia (US) (2010)

[5] Kim, J., & Lee, H. (2013). Progressive collapse resisting capacity of framed structures with infill steel panels. *Journal of Constructional Steel Research*, (89), 145-152. https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2013.07.004

[6] Li, S., Shan, S., Zhai, C., & Xie, L. (2016). Experimental and Numerical Study on Progressive Collapse Process of RC Frames with Full-Height Infill Walls. *Engineering Failure Analysis*. (59), 57-68. https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2015.11.020

[7] Shan, S., Li, S., Xu, S., & Xie, L. (2016). Experimental Study on Progressive Collapse Performance of RC Frames with Infill Walls. *Engineering Structures*. (111), 80-92. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2015.12.010

[8] Brunesi, E., & Parisi, F. (2017). Progressive collapse fragility models of European reinforced concrete framed buildings based on pushdown analysis. *Engineering Structures*. (152), 597-596. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.09.043

[9] Eren, N., Brunesi, E., & Nascimbene, R. (2019). Influence of masonry infills on the progressive collapse resistance of reinforced concrete framed buildings. *Engineering Structures*. (178), 375-394 https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.10.056

[10] Gholampoor, S., & Vaseghi Amiri, J., & Naseri, A., & Rezayi, S. (2017). Effect of eliminating the column on progressive collapse on seismic performance in dual steel structures. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 5(3),5-27. http://dx.doi.org/10.22065/jsce.2017.73072.1055

[11] Mehdizadeh, K., & Karamodin, A. (2017). Evaluation the Possibility of the Occurrence of Progressive Collapse in Steel Moment Frames (Ordinary, Intermediate and Special) Due to Sudden Column Removal. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 5(3),85-105. http://dx.doi.org/10.22065/jsce.2017.89028.1231

[12] PEER, Open system for earthquake engineering (OpenSees). Univ. of California. (2005) http://opensees.berkeley.edu/.

[13] ETABS theory manual., (2008), Version 9.2.0. Copyright Computers and Structures, Inc.

[14] Iranian Building and housing Research Center (IBHRC) (2013), *Design Loads for Buildings*. No 6 , 3nd edition. (In Persian)

[15] Iranian Building and housing Research Center (IBHRC) (2013), *Design and Construction of Concrete Structures*. No 9 , 4nd edition. (In Persian)

[16] Iranian Building and housing Research Center (IBHRC) (2014). *Iranian code of practice for seismic resistant design of buildings.*4nd edition. (In Persian).

[17] Islamic Republic of Iran Management and Planning Organization Office of Deputy for Technical Affairs (2007). Instruction for Seismic Rehabilitation of Existing Buildings No. 360, Tehran (In Persian)

[18] Moradi, Reza & Khalilzadeh Vahidi, Ebrahim. (2018). Comparison of Numerical Techniques of Masonry Infilled RC Frames for Lateral Loads. *Journal of Concrete Structures and Materials*, 3(2), 102-118. https://dx.doi.org/10.30478/jcsm.2019.82172

[19] Khalilzadeh Vahidi, Ebrahim & Moradi, Reza. (2019). Numerical Study of the Force Transfer Mechanism and Seismic Behavior of Masonry Infilled RC Frames with Windows Opening. *Civil Engineering Journal*, 5(1), 61-73. DOI: 10.28991/cej-2019-03091225