

Evaluation the effect of middle column removal on the occurrence potential of progressive collapse in reinforced concrete moment frames using sensitivity analysis

Seyed Ali Ekrami Kakhki ¹, Ali Kheyroddin ^{2*}, Alireza Mortezaei ³

1- Ph.D. Candidate of Structural Engineering, Civil Engineering Department, Semnan Branch, Islamic Azad University, Semnan, Iran

2- Distinguished Professor, Department of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

3- Associate Professor, Seismic Geotechnical and High Performance Concrete Research Centre, Civil Engineering Department, Semnan Branch, Islamic Azad University, Semnan, Iran

ABSTRACT

In this research, the progressive collapse of the reinforced concrete frames following the middle column removal has been investigated based on the sensitivity and robustness indexes. At first, the numerical model of the reinforced concrete frame was simulated and verified with Li et al. model in SeismoStruct software. After developing the numerical model, the performance levels and the number of plastic hinges in the frames were obtained. The frames were subjected to the column removal in the first story and their vulnerability to progressive collapse was investigated under nonlinear static push down analysis. In the present research, parametric study including change in the number of stories, span length, story height, concrete compressive strength, rebar yield strength, poisson's ratio and damping ratio of the structure in the progressive collapse of the frames was performed based on the sensitivity and robustness indexes. The results showed that increasing the number of stories from 5 to 20 story, reducing the span length from 5.5 to 3 m, reducing the story height from 4.45 to 3.20 m, increasing the concrete compressive strength from 21.3 to 51.3 MPa, increasing the rebar yield strength from 234 to 350 MPa, increasing the Poisson's ratio from 0.12% to 0.25% and increasing the damping ratio from 5% to 15% decreases and increases the sensitivity and robustness indexes, respectively. Thus, the condition of the frames in progressive collapse improves. Finally, the effect of simultaneous removal of several columns in the progressive collapse of the frames showed that the case 5 of the column removal has the lowest sensitivity index and the highest robustness index, thus having better conditions in progressive collapse.

ARTICLE INFO

Receive Date: 19 February 2022

Revise Date: 17 August 2022

Accept Date: 22 August 2022

Keywords:

Progressive collapse Column removal

Sensitivity index

Robustness index

Reinforced concrete frame

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2022.330263.2734>

*Corresponding author: Ali Kheyroddin.

Email address: kheyroddin@semnan.ac.ir

بررسی تأثیر حذف ستون میانی بر امکان رخداد خرابی پیشرونده در قاب‌های خمشی

بتن آرمه با استفاده از تحلیل حساسیت

سید علی اکرامی کاخکی^۱، علی خیرالدین^{۲*}، علیرضا مرتضایی^۳

۱- دانشجوی دکتری سازه، گروه مهندسی عمران، واحد سمنان، دانشگاه آزاد اسلامی، سمنان، ایران

۲- استاد ممتاز، گروه مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

۳- دانشیار، مرکز تحقیقات ژئوتکنیک لرزه‌ای و بتن توانمند، گروه مهندسی عمران، واحد سمنان، دانشگاه آزاد اسلامی، سمنان، ایران

چکیده

در این پژوهش، خرابی پیشرونده قاب‌های بتن آرمه به دنبال حذف ستون میانی بر مبنای شاخص‌های حساسیت و تنومندی مورد بررسی قرار گرفته است. در ابتدا، مدل عددی قاب بتن آرمه با مدل لی و همکاران در نرم افزار *SeismoStruct* شبیه‌سازی و صحت‌سنجی شد. پس از توسعه مدل عددی، سطوح عملکرد و تعداد مفاصل پلاستیک در قاب‌ها به دست آمد. قاب‌ها در معرض حذف ستون در طبقه اول قرار گرفتند و آسیب‌پذیری آنها در خرابی پیشرونده تحت تحلیل استاتیکی غیرخطی افزایش یافته بررسی شد. در تحقیق حاضر، بررسی پارامتری شامل تغییر در تعداد طبقات، طول دهانه، ارتفاع طبقه، مقاومت فشاری بتن، مقاومت تسلیم میلگرد، ضریب پواسون و نسبت میرایی سازه در خرابی پیشرونده قاب‌ها بر مبنای شاخص‌های حساسیت و تنومندی انجام شد. نتایج نشان داد که افزایش تعداد طبقات از ۵ به ۲۰ طبقه، کاهش طول دهانه از ۵/۵ تا ۳ m، کاهش ارتفاع طبقه از ۴/۴۵ تا ۳/۲۰ m، افزایش مقاومت فشاری بتن از ۲۱/۳ تا ۵۱/۳ MPa، افزایش مقاومت تسلیم میلگرد از ۲۳۴ تا ۳۵۰ MPa، افزایش ضریب پواسون از ۰/۱۲ تا ۰/۲۵ و افزایش نسبت میرایی سازه از ۵٪ به ۱۵٪ به ترتیب شاخص‌های حساسیت و تنومندی را کاهش و افزایش می‌دهد. در نتیجه، وضعیت قاب‌ها در برابر خرابی پیشرونده بهبود می‌یابد. در نهایت تأثیر حذف همزمان چند ستون در خرابی پیشرونده قاب‌ها نشان داد که حالت ۵ حذف ستون‌ها، دارای کمترین شاخص حساسیت و بیشترین شاخص تنومندی می‌باشد، در نتیجه شرایط بهتری در خرابی پیشرونده دارد.

کلمات کلیدی: خرابی پیشرونده، حذف ستون، شاخص حساسیت، شاخص تنومندی، قاب بتن آرمه.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	https://doi.org/10.22065/jsce.2022.330263.2734	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2022.330263.2734	۱۴۰۲/۰۳/۳۱	۱۴۰۱/۰۵/۳۱	۱۴۰۱/۰۵/۳۱	۱۴۰۱/۰۵/۲۶	۱۴۰۰/۱۱/۳۰
			علی خیرالدین		*نویسنده مسئول:	
			kheyroddin@semnan.ac.ir		پست الکترونیکی:	

۱- مقدمه

سازه‌ها معمولاً برای بارگذاری‌های عادی مانند بار زنده، بار مرده، زلزله، باد و برف طراحی می‌شوند و اغلب تحت تاثیر این بارها قرار دارند و برای بارهای غیرعادی و بزرگ طراحی نمی‌شوند. سازه‌ها دارای درجه محدودی از مقاومت و شکل‌پذیری هستند که تا حدودی در برابر بارهای بیش از حد و خرابی مقاومت می‌کنند ولی بارهای غیرعادی چندین برابر بارهای عادی هستند و اغلب به صورت موضعی و در مدت زمان کوتاهی بر سازه اعمال می‌شوند. سازه‌ها می‌توانند در معرض حوادث شدید ناشی از مثلاً زلزله‌های شدید، سونامی، انفجار، طوفان، حملات تروریستی یا خطای انسانی قرار گیرند. بررسی‌ها نشان می‌دهد در محلی که بارهای غیرعادی به صورت موضعی اعمال می‌شود، عضو سازه‌ای معمولاً توانایی مقابله با این بارهای بزرگ را نداشته و از بین می‌رود [۱]. با بازتوزیع این بارها به عضوهای سازه‌ای مجاور، آنها نیز توانایی خود را از دست داده و این خرابی به صورت پیشرونده از عضوی به عضو دیگر گسترش می‌یابد و سرانجام منجر به گسیختگی کل سازه یا بخش بزرگی از آن می‌شود [۲ و ۳]. این پدیده خرابی پیشرونده^۱ نامیده می‌شود. فروریختن برج کلیسای سنت مارک^۲ در ونیز ایتالیا در سال ۱۹۰۲ پس از جدا شدن دیوار باربر شمالی، فروریختن ساختمان رونان پوینت^۳ در سال ۱۹۶۸، فروپاشی برج اسکای لاین^۴ در ویرجینیا در سال ۱۹۷۳، فروریختن ساختمان ۹ طبقه آلفرد پی مورا^۵ در سال ۱۹۹۵ و مرکز تجارت جهانی^۶ در سال ۲۰۰۱، مثال‌هایی از خرابی نامتناسب یا پیشرونده سازه‌ها هستند که توجه بسیاری از محققان را به خود جلب نموده‌اند [۴-۶].

وقوع خرابی پیشرونده و خسارات مالی و جانی ناشی از آن، توجه محققان را به تنظیم مقررات جدید برای کاهش پتانسیل خرابی پیشرونده در سازه‌ها جلب نمود. برای این منظور، دستورالعمل‌های گوناگونی مانند دستورالعمل‌های وزارت دفاع ایالات متحده^۷ (DoD) و اداره خدمات عمومی^۸ (GSA) در سال‌های ۲۰۱۳ و ۲۰۱۶ منتشر شده است که بر اساس آنها می‌توان خطر خرابی پیشرونده را با استفاده از سه رویکرد تحلیل استاتیکی خطی^۹ (LSA)، تحلیل استاتیکی غیرخطی^{۱۰} (NSA) و تحلیل دینامیکی غیرخطی^{۱۱} (NDA) ارزیابی نمود [۷-۱۰].

قاب‌های بتن آرمه^{۱۲} (RC)، به عنوان یکی از پرکاربردترین سیستم‌های سازه‌ای، ممکن است در طول عمر خود در معرض خطرات مختلفی قرار گیرند و خرابی پیشرونده آنها توسط بسیاری از محققان بررسی شده است [۱۱-۱۵]. استفاده از مدل‌های دو بعدی قاب‌های بتن آرمه، مقایسه کاربردی‌تر نتایج تجربی با نتایج تحلیلی را امکان‌پذیر می‌سازد، زیرا برای مدل‌های سه بعدی آزمایشگاهی نیاز به تجهیزات پیشرفته و آزمایشگاه‌های مجهز و ویژه می‌باشد. این در حالی است که مدل‌های تجربی دو بعدی در بیشتر آزمایشگاه‌ها با تجهیزات معمول مورد آزمایش قرار می‌گیرند. از این رو، در بیشتر مقالات، نتایج آزمایشگاهی و تحلیلی مدل‌های دو بعدی بررسی می‌گردد. محققان متعددی خرابی پیشرونده قاب‌های بتن آرمه دو بعدی را در حالت‌های مختلف حذف ستون مطالعه نموده‌اند [۱۶-۲۲]. خرابی پیشرونده سازه‌های بتن آرمه در حالت حذف چند ستونی نیز بررسی شده است [۲۳ و ۲۴]. یو^{۱۳} و همکاران به مطالعه اثر دیوارهای پرکننده در خرابی پیشرونده قاب‌های بتن آرمه پرداختند [۲۵]. زنگ^{۱۴} و همکاران یک مدل ساده را برای ارزیابی مقاومت خرابی پیشرونده قاب‌های بتن آرمه تحت حذف ستون داخلی طراحی کردند [۲۶]. کین^{۱۵} و همکاران به صورت تجربی و تئوری مقاومت خرابی پیشرونده قاب‌های بتن آرمه تقویت شده را پس از حذف ستون کناری بررسی نمودند. برای جلوگیری از خرابی پیشرونده قاب‌ها، تقویت دال با میله‌های پلیمری تقویت شده با الیاف شیشه نزدیک به سطح صورت گرفت و تاثیر روش مقاوم‌سازی بر رفتار خرابی پیشرونده تیر-دال مطالعه شد [۲۷]. کین^{۱۶} و

¹ Progressive collapse

² Campanile di San Marco

³ Ronan Point

⁴ Skyline Tower

⁵ Alfred P. Murrah

⁶ World Trade Center

⁷ United States Department of Defense

⁸ General Services Administration

⁹ Linear Static Analysis

¹⁰ Nonlinear Static Analysis

¹¹ Nonlinear Dynamic Analysis

¹² Reinforced concrete

¹³ Yu

¹⁴ Zhang

¹⁵ Qin

¹⁶ Qian

همکاران تأثیر روش‌های بارگذاری را بر رفتار خرابی پیشرونده زیرسازه‌های تیر-دال بتن آرمه در حالت حذف ستون کناری بررسی کردند [۲۸]. پراکاش^{۱۷} و ساتیانارایانان^{۱۸} به صورت تجربی خرابی پیشرونده قاب‌های بتن آرمه را در حالت حذف ستون کناری مطالعه نمودند [۲۹]. کریمیان خرابی پیشرونده ساختمان‌های کوتاه مرتبه ۳ طبقه بتن آرمه را تحت حذف ستون میانی ارزیابی نمود [۳۰]. یعقوبی و همکاران خرابی پیشرونده ساختمان‌های بتن آرمه با سیستم سازه‌ای دال-دیوار را بررسی کردند [۳۱]. هوایی^{۱۹} و بیات خرابی پیشرونده ناشی از بار انفجار در سازه‌های بتن آرمه و روش‌های مقاوم‌سازی ستون‌ها را مطالعه نمودند [۳۲]. برخی محققان به مطالعه عوامل موثر بر خرابی پیشرونده پرداختند. برای مثال، کیان و همکاران به مطالعه اثرات دیوارهای پرکننده در خرابی پیشرونده قاب‌های بتن آرمه در نرم افزار OpenSees پرداختند و اثرات ضخامت و مقاومت فشاری دیوارهای پرکننده را مطالعه نمودند [۳۳]. فنگ^{۲۰} و همکاران مقاومت خرابی پیشرونده قاب‌های خمشی پس از حذف ستون را بررسی کردند و اثرات مقاومت بتن و دهانه تیر را بر خرابی پیشرونده مطالعه نمودند [۳۴]. کیان و همکاران به مطالعه خرابی پیشرونده قاب‌های بتن آرمه در نرم افزار LS-DYNA و مطالعه پارامتری اثرات دهانه‌های مختلف و تعداد طبقات پرداختند [۳۵]. موسیدو^{۲۱} و همکاران به مطالعه خرابی پیشرونده قاب‌های بتن آرمه و بررسی پارامتری مقاومت مصالح و طول دهانه پرداختند [۳۶]. اسکالونزی^{۲۲} و همکاران تأثیر مقاوم‌سازی لرزه‌ای بر مقاومت در برابر خرابی پیشرونده قاب‌های بتن آرمه را بررسی کردند و به مطالعه تاثیر طول دهانه تیر و مقاومت برشی سیستم مقاوم‌سازی پرداختند [۳۷]. تان^{۲۳} و همکاران عملکرد مقاومت در برابر خرابی پیشرونده قاب‌های کامپوزیتی در حالت حذف ستون را به صورت عددی مطالعه نمودند و به بررسی تاثیر پارامترهایی مانند تعداد طبقات و نسبت دهانه به عمق بر عملکرد خرابی پیشرونده پرداختند [۳۸]. السانادی^{۲۴} و آبادل خرابی پیشرونده ساختمان‌های قاب خمشی معمولی بتن آرمه را بررسی کردند و به مطالعه اثر متغیرهایی مانند بار محوری بر روی ستون‌ها، درصد میلگردهای پیوسته پایین تیر در سرتاسر اتصال تیر-ستون و تعداد دهانه‌های تیر پرداختند [۳۸]. عظیم و همکاران عوامل موثر بر مقاومت در برابر خرابی پیشرونده قاب‌های بتن آرمه را بررسی نمودند و به مطالعه اثر ابعاد تیرها و نسبت آرماتورهای بالا و پایین پرداختند [۳۹]. در تحقیق حاضر، ارزیابی خرابی پیشرونده قاب‌های بتن آرمه با استفاده از تحلیل استاتیکی غیرخطی با حذف ستون میانی از طبقه اول انجام شد. در ابتدا مدل عددی با مدل لی^{۲۵} و همکاران [۴۰] در نرم افزار SeismoStruct شبیه‌سازی و صحت‌سنجی شد. پس از توسعه مدل عددی، قاب‌های ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ طبقه بتن آرمه مدلسازی شدند و تحت حذف ستون میانی قرار گرفتند. میزان آسیب‌پذیری قاب‌ها در برابر خرابی پیشرونده بر مبنای شاخص حساسیت^{۲۶} و شاخص تنومندی^{۲۷} تعیین گردید. همچنین، تعداد مفاصل پلاستیک در قاب‌های مذکور در سطوح عملکردی مختلف تعیین شد. در این پژوهش، برای به دست آوردن تاثیر نسبت تنش‌ها در قاب‌های ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ طبقه بتن آرمه، مدل‌های دوبعدی قاب‌ها در نرم افزار ETABS مدلسازی گردید و مقایسه تغییرات ضریب رفتار بر حسب تغییرات نسبت تنش‌ها در قاب‌ها صورت پذیرفت. در تحقیق حاضر، بررسی پارامتری جامعی شامل تعداد طبقات، طول دهانه، ارتفاع طبقه، مقاومت فشاری بتن، مقاومت تسلیم میلگرد، ضریب پواسون و نسبت میرایی سازه در خرابی پیشرونده قاب‌های بتن آرمه بر مبنای شاخص‌های حساسیت و تنومندی انجام شد. همچنین حذف همزمان دو ستون در قاب‌های ۵ طبقه بتن آرمه بررسی شد و میزان آسیب‌پذیری قاب‌های بتن آرمه در حالت‌های مختلف حذف ستون بر مبنای شاخص‌های حساسیت و تنومندی تعیین گردید. در نهایت مقایسه نتایج و ارائه پیشنهادات صورت پذیرفت. روند نما پژوهش صورت گرفته در شکل ۱ نشان داده شده است.

¹⁷ Prakash

¹⁸ Satyanarayanan

¹⁹ Havaei

²⁰ Feng

²¹ Mucedero

²² Scalvenzi

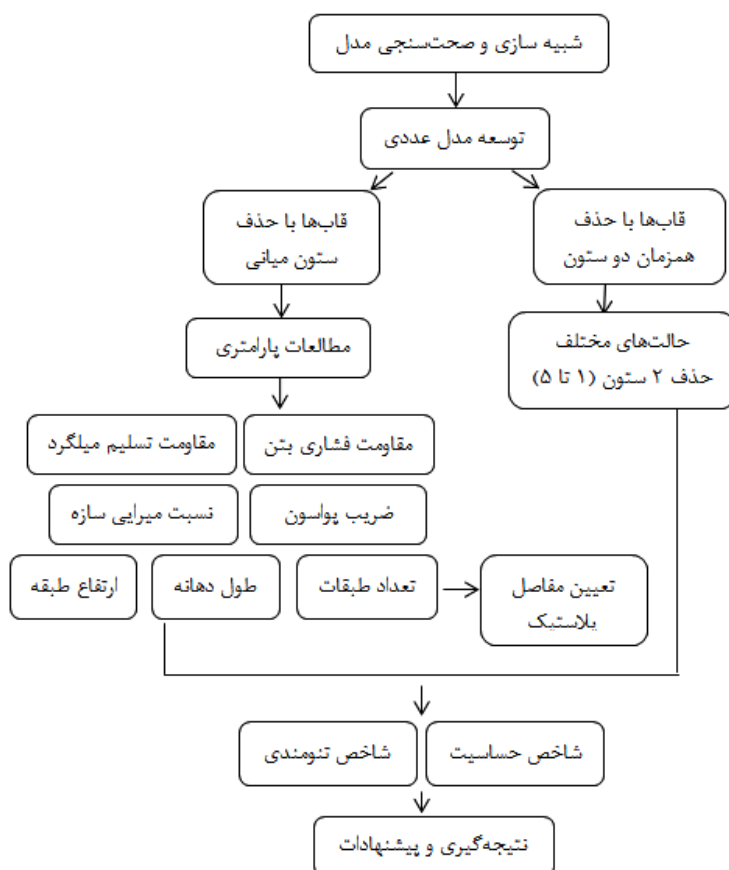
²³ Tan

²⁴ Elsanadedy

²⁵ Li

²⁶ Sensitivity Index

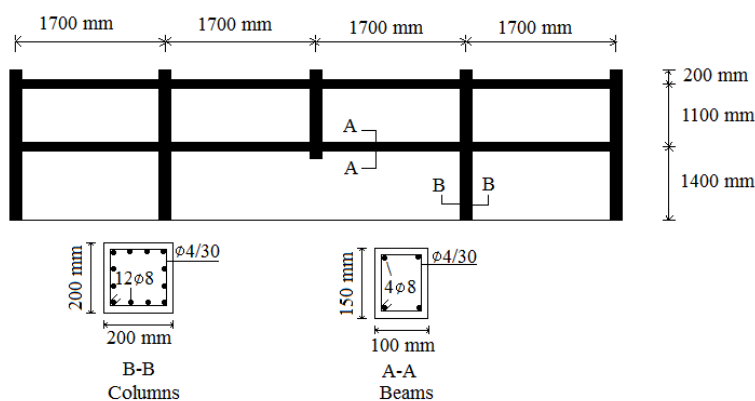
²⁷ Robustness index



شکل ۱: روند نما پژوهش صورت گرفته.

۲- شرح نمونه مرجع

نمونه تجربی بررسی شده توسط لی و همکاران به عنوان مرجعی برای صحت‌سنجی مدل عددی غیرالاستیک مورد مطالعه در تحلیل خرابی پیشرونده استاتیکی غیرخطی قاب‌های بتن آرمه استفاده شد [۴۰]. جزئیات مشخصات مقاطع و مدل لی با مقیاس ۱/۳ در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲: مشخصات مقاطع و مدل لی و همکاران [۴۰].

۳- مدل‌سازی، صحت‌سنجی و مطالعه عددی

در ابتدا، مدل عددی با مقیاس یک سوم مطابق مراحل ذکر شده در شکل ۳ مدل‌سازی شد. سپس مدل عددی مذکور با مدل لی و همکاران شبیه‌سازی گردید. با توجه به اینکه قاب مورد مطالعه دو بعدی می‌باشد، بنابراین، کلیه گره‌های مورد استفاده در قاب مذکور تحت شرایط مرزی در ΔX ، ΔY ، ΔZ محدود شدند. همچنین، کلیه تکیه‌گاه‌های قاب به صورت گیردار تعریف شده و تحت شرایط مرزی در ΔX ، ΔY ، ΔZ محدود شدند.

قاب خمشی بتن آرمه تحت حذف ستون قرار گرفت و بار افزایشی قائم بر گره بالای ستون حذف شده اعمال شد. با افزایش مقدار نیروی اعمالی به سازه و به تبع آن افزایش تنش‌ها، مفاصل پلاستیک خمشی در تیرها و ستون‌ها ایجاد شدند. رفتار فرا ارتجاعی سازه یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های ذاتی اعضای آن است که با قرار دادن مفاصل پلاستیک در اعضای سازه می‌توان رفتار فرا غیرخطی آن را بررسی کرد. در این پژوهش، از infrmFBPH^{28} جهت تعریف مفاصل پلاستیک استفاده شده است که در آن، مفاصل پلاستیک در دو انتهای عضو (تیرها و ستون‌ها) می‌باشد، یعنی فقط ۲ انتهای آن قابل غیرخطی شدن است.

مدلسازی رفتار چرخه‌ای اعضای سازه‌ای، یک موضوع مهم در تحلیل‌های غیرخطی است. در این پژوهش از مدل مندر استفاده شده است. این مدل چرخه‌ای اثرات کاهیدگی سختی، زوال مقاومت، پاسخ غیرممتقارن و لغزش را در نظر گرفته است. برای شبیه‌سازی رفتار غیرالاستیک بتن، مدل محصور شده یکنواخت پیشنهاد شده توسط مندر^{۲۹} و همکاران [۴۱] مورد استفاده قرار گرفت و روابط تنش- کرنش زیر بر مبنای کار مارتینز-رودا^{۳۰} و النشایی^{۳۱} استفاده شد [۴۲] (روابط ۷-۱):

$$f_c = \frac{f'_{cc} x^r}{r - 1 + x^r} \quad (1)$$

f_c مقاومت فشاری بتن و f'_{cc} مقاومت فشاری بتن محصور شده (مقاومت حداکثر) است.

$$f'_{cc} = k f'_{co} \quad (2)$$

f'_{co} مقاومت بتن محصور نشده و k ضریب محصور شدن است.

$$x = \varepsilon_c / \varepsilon_{cc} \quad (3)$$

ε_c کرنش فشاری بتن و ε_{cc} کرنش در حداکثر مقاومت بتن f'_{cc} است.

$$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_{co} \left[1 + 5 \left(\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} - 1 \right) \right] \quad (4)$$

ε_{co} کرنش در مقاومت محصور نشده بتن f'_{co} است.

$$r = \frac{E_c}{E_c - E_{sec}} \quad (5)$$

E_c ، مدول الاستیسیته اولیه بتن و E_{sec} مدول الاستیسیته ثانویه بتن در مقاومت حداکثر است.

$$E_c = 5000 \sqrt{f'_{co}} \quad (6)$$

$$E_{sec} = \frac{f'_{cc}}{\varepsilon_{cc}} \quad (7)$$

²⁸ Inelastic force-based plastic-hinge frame elements

²⁹ Mander

³⁰ Martinez-Rueda

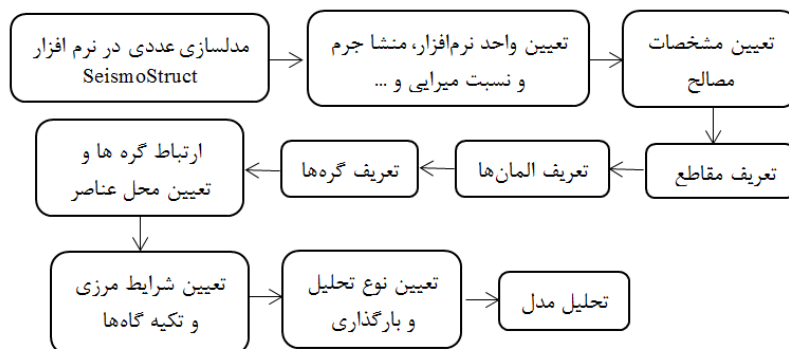
³¹ Elnashai

مدل غیرخطی استفاده شده برای فولاد از نوع مدل فولادی دوخطی (stl_bl) می‌باشد. تحلیل اجزای محدود^{۳۲} با روش استاتیکی و با استفاده از روش حل ترکیبی بین نیوتن-رافسون کلاسیک و رویکردهای نیوتن-رافسون اصلاح شده در نرم افزار انجام شد. آستانه معیار همگرایی بر اساس جابه‌جایی/چرخش مفروض برابر با 10^{-3} تعیین شد. میزان جابه‌جایی اعمال شده حداقل $0/1$ mm در هر مرحله بود. تمام گره‌های مدل در برابر جابه‌جایی‌های خارج از صفحه‌ای و همچنین چرخش‌های حول محور افقی درون صفحه‌ای و محور عمودی قاب مهار شدند. غیرخطی‌های هندسی ایجاد شده به دلیل جابه‌جایی‌ها/چرخش‌های بزرگ و اثرات پی دلتا^{۳۳} در یک فرمول چرخشی کلی در نظر گرفته شدند.

قاب خمشی با شکل‌پذیری متوسط بدون نامنظمی در ارتفاع، براساس آیین نامه یوروکد ۸ بخش ۳ مدل‌سازی شد [۴۳]. مقاطع تیر و ستون نیز با استفاده از آیین نامه یوروکد ۸ بخش ۳ تعیین شدند. بارهای مرده و زنده مورد استفاده برای اجرای طراحی مقاوم در برابر زلزله سازه مطابق با مقررات لرزه‌ای اروپا برای هر کدام 4 kN/m^2 بود [۴۳ و ۴۴]. نوع زمین از نوع B در نظر گرفته شد.

بر مبنای آیین نامه یوروکد ۸ بخش ۳ در تحلیل‌های غیرخطی بیان شده است که حداکثر شتاب سازه تحت زلزله باید بیشتر از $0/2 \text{ g}$ باشد [۴۳]. در این پژوهش، با توجه به اینکه در مدل‌های عددی بسط داده شده مورد مطالعه، تحلیل غیرخطی است، از حداکثر شتاب بالای $0/2 \text{ g}$ استفاده شد. بر این مبنی، کشور پرتغال که در آن حداکثر شتاب $0/24 \text{ g}$ استفاده شده، انتخاب گردید و در این پژوهش حداکثر شتاب $0/24 \text{ g}$ استفاده شد. سازه به گونه‌ای طراحی شد که معیارهای مربوط به شکل‌پذیری متوسط را داشته باشند و ضریب رفتار، $5/85$ در نظر گرفته شد.

برای حذف یک ستون در نرم افزار از روش زیر استفاده شد: ابتدا در منوی پیش‌پردازش^{۳۴}، ستون مورد نظر انتخاب و حذف شد. سپس در منوی بارهای اعمال شده^{۳۵}، بار افزایشی در بالای گره ستون حذف شده اعمال گردید. سپس در منوی فازهای بارگذاری^{۳۶}، جابه‌جایی هدف مشخص شد و در نهایت تحلیل صورت گرفت. مشخصات مقاطع و آرماتورهای تیرها و ستون‌ها در جدول ۱ نشان داده شده است. مشخصات اعضا و مصالح مورد استفاده مدل عددی در جدول ۲ ارائه شده است.



شکل ۳: روند نما مراحل مدل‌سازی قاب‌ها در نرم افزار SeismoStruct.

³² Finite element

³³ P-Delta

³⁴ Pre-Processor

³⁵ Applied Loads

³⁶ Loading Phases

جدول ۱: مشخصات مقاطع و آرماتورهای تیرها و ستونها

۱۵۰ × ۱۰۰ mm ²	مقطع تیرها	
۴Φ۸	میلگردهای طولی	تیرها
۲Φ۴	میلگردهای عرضی	
۳۰ mm	فاصله میلگردهای عرضی تیر	
۲۰۰ × ۲۰۰ mm ²	مقطع ستونها	
۱۲Φ۸	میلگردهای طولی	ستونها
۴Φ۴	میلگردهای عرضی	
۳۰ mm	فاصله میلگردهای عرضی ستون	

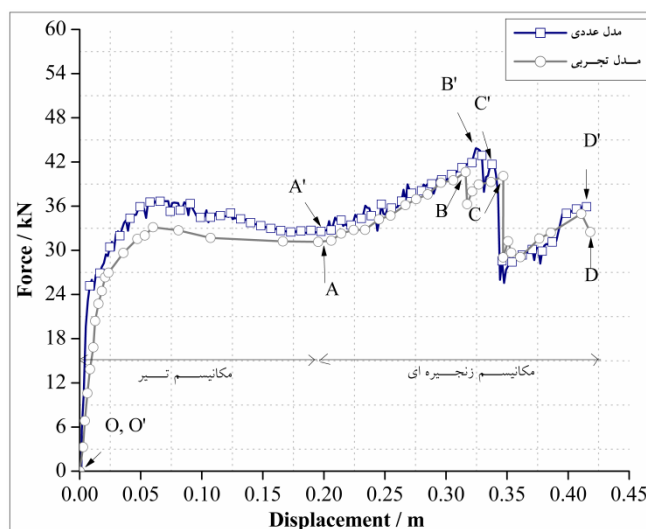
جدول ۲: مشخصات عضوها و مصالح مورد استفاده مدل عددی [۴۰]

۴۰۰ عدد	فیبرهای به کار رفته در تیر و ستون
٪۱۶/۶۷	طول مفصل پلاستیک در تیرها و ستونها
۲۳۴ MPa	مقاومت تسلیم میلگردهای طولی و عرضی
۴۱/۳ MPa	مقاومت فشاری بتن برای طبقه اول
۳۱/۸ MPa	مقاومت فشاری بتن برای طبقه دوم

در برنامه اجزاء محدود SeismoStruct برای ارزیابی صحیح توزیع آسیب در عضو می‌بایست نحوه توزیع خاصیت غیرالاستیک در طول عضو و در مقاطع عرضی عضو به گونه‌ای صحیح تخمین زده شود. برای این منظور، سطح مقطع عضو به تعداد مشخصی فیبر (۲۰۰) عدد برای یک تحلیل معمول و ۴۰۰ عدد برای تحلیل مقاطع پیچیده) تقسیم می‌گردد. این تقسیم‌بندی فیبر در تمام طول عضو رعایت شده است. طول مفصل پلاستیک در تیرها و ستونها برابر با ٪۱۶/۶۷ طول عضو در نظر گرفته شده است. لازم به توضیح است با توجه به انحنای مضاعف تیرها و ستونها، نصف طول عضو منظور می‌گردد. بنابراین، در جدول ۲، طول مفصل پلاستیک در تیرها و ستونها به ترتیب برابر با ۱۴۱/۶۹۵ mm و ۱۱۶/۶۹ mm می‌باشد. قابل توجه است که مقادیر مشابهی از طول مفصل پلاستیک را می‌توان با استفاده از عبارات تجربی شناخته شده مانند آنچه توسط پائولی^{۳۷} و پریستلی^{۳۸} ارائه شده است، به دست آورد [۴۵].

نمودارهای نیرو-جابجایی مدل عددی مورد مطالعه و مدل لی و همکاران در شکل ۴ نشان داده شده است. همانطور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود توافق خوبی بین نتایج مدل لی و همکاران و مدل عددی وجود دارد. بخش‌های OA و O'A' به ترتیب مربوط به مکانیسم تیر (ظرفیت خمشی^{۳۹} و عملکرد قوس فشاری^{۴۰}) و بخش‌های AD و A'D' به ترتیب مربوط به مکانیسم عملکرد زنجیره‌ای^{۴۱} در مدل‌های تجربی و عددی می‌باشد. نقاط B و B' مربوط به اولین شکست میلگرد و نقاط C و C' مربوط به دومین شکست میلگرد در مدل‌های تجربی و عددی می‌باشند که مشخصات آنها در جدول ۳ نشان داده شده است.

³⁷ Paulay³⁸ Priestley³⁹ Flexural capacity⁴⁰ Compressive arch action⁴¹ Catenary action



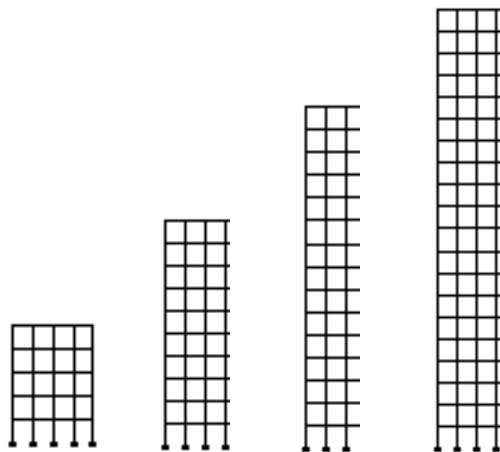
شکل ۴: نمودارهای نیرو-جابجایی مدل عددی مورد مطالعه و مدل لی و همکاران [۴۰].

جدول ۳: مشخصات نقاط مهم در مدل عددی مورد مطالعه و مدل لی و همکاران [۴۰]

	نقاط	نیرو (kN)	اختلاف مدل لی و مدل عددی (%)	
			جابجایی عمودی (m)	اختلاف مدل لی و مدل عددی (%)
مدل لی و همکاران	O	۰	۰	۰
	A	۳۱/۱۴	۱۹۵	۴/۶
	B	۴۰/۶۳	۳۱۶	۲/۴۷
	C	۴۰/۰۸	۳۴۷	۲/۳
	D	۳۲/۴۹	۴۱۸	۰/۷
مدل عددی	O'	۰	۰	
	A'	۳۲/۳۸	۱۸۶	
	B'	۴۳/۸۶	۳۲۴	
	C'	۴۱/۷۶	۳۳۹	
	D'	۳۴/۹۳	۴۱۵	

پس از شبیه‌سازی مدل عددی در نرم افزار، این مدل عددی توسعه یافت و قاب‌های بتن آرمه ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ طبقه مدلسازی گردید (شکل ۵). به طور کلی، دیدگاه‌های مختلفی برای سازه‌های کوتاه مرتبه، میان مرتبه و بلند مرتبه وجود دارد. برای مثال، از دیدگاه مهندسی تاسیسات برنی، ساختمان کوتاه مرتبه عمدتاً ۳ تا ۵ طبقه، ساختمان میان مرتبه عمدتاً ۸ تا ۱۰ طبقه، ساختمان بلند مرتبه عمدتاً ۱۵ تا ۱۶ طبقه و ساختمان‌های بسیار بلند مرتبه عمدتاً ۳۰ تا ۴۰ طبقه است [۴۶]. از دیدگاه معماری برخی محققان نسبت ارتفاع به بعد سازه را ملاک این طبقه‌بندی می‌دانند و بیان می‌کنند نسبت ارتفاع به بعد $\pi/5$ مربوط به سازه بسیار بلند مرتبه، π برای سازه‌های بلند مرتبه، $\pi/2$ برای سازه‌های میان مرتبه و $\pi/3$ برای سازه‌های کوتاه مرتبه می‌باشد [۴۷]. در این پژوهش، مطابق دیدگاه ذکر شده، سازه ۲

طبقه لی و سازه ۵ طبقه بسط داده شده جزء سازه‌های کوتاه مرتبه، سازه ۱۰ طبقه جزء سازه‌های میان مرتبه و سازه ۱۵ طبقه جزء سازه‌های بلند مرتبه و سازه ۲۰ طبقه در زمره سازه‌های بسیار بلند مرتبه قرار می‌گیرند.



شکل ۵: مدل‌های قاب‌های بتن آرمه با تعداد طبقات مختلف.

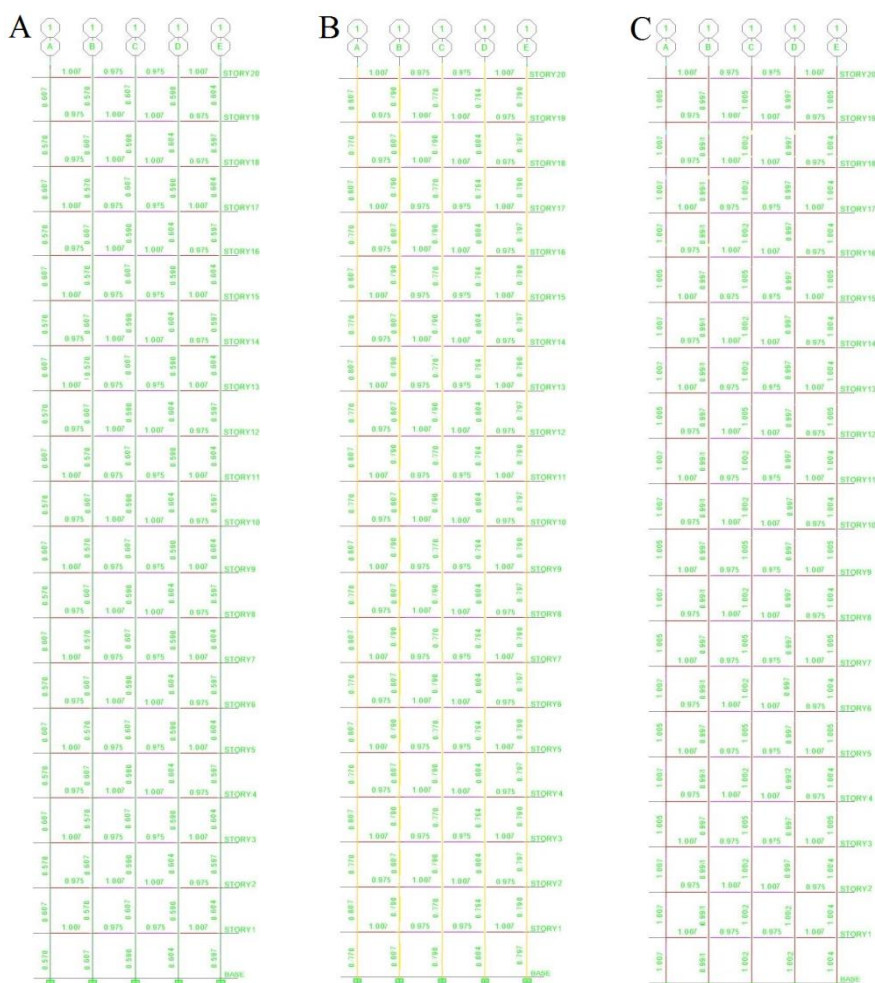
همچنین، در این پژوهش، برای به دست آوردن تاثیر نسبت تنش‌ها در قاب‌های ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ طبقه بتن آرمه، مدل‌های دوبعدی قاب‌های ۴ دهانه با طول دهانه ۳ m و ارتفاع طبقه ۳/۲ m در نرم افزار ETABS مدلسازی گردید. برای هر مدل چند نوع نسبت تنش در نظر گرفته شد. نسبت تنش برای تیرها برابر با ۱ و برای ستون‌ها برابر با ۰/۶، ۰/۸ و ۱ در نظر گرفته شد. نسبت تنش‌ها برای قاب ۲۰ طبقه بتن آرمه در شکل ۶ نشان داده شده است.

برای هر مدل، تحلیل غیرخطی انجام شده است. تحلیل‌های صورت گرفته از نوع بار افزون انجام شد و سپس با توجه به فرمول‌های کراوینکلر و نسار، ضریب رفتار محاسبه شد (روابط ۸ و ۹) [۴۸]. مقایسه تغییرات ضریب رفتار بر حسب تغییرات نسبت تنش‌ها (۰/۶، ۰/۸، ۱) در ستون برای حالت نسبت تنش ۱ در تیر در شکل ۷ نشان داده شده است.

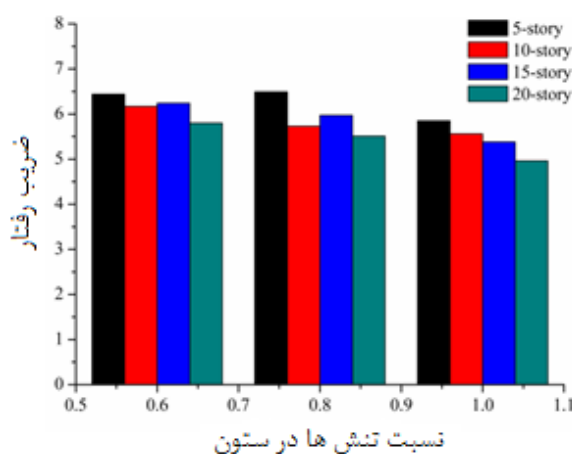
$$R_{\mu} = (c(\mu - 1) + 1)^{\frac{1}{c}} \quad (8)$$

$$c(T, \alpha) = \frac{T^a}{1 - T^a} + \frac{b}{T} \quad (9)$$

R_{μ} : ضریب کاهش مقاومت در اثر شکل پذیری، T : پرپود سازه، α : سختی بعد از تسلیم، a و b پارامترهای رگرسیون هستند.



شکل ۶: نسبت تنش ۱ برای تیرها و نسبت‌های (A) ۰/۶، (B) ۰/۸ و (C) ۱ برای ستون‌ها در قاب ۲۰ طبقه بتن آرمه.



شکل ۷: مقایسه تغییرات ضریب رفتار بر حسب تغییرات نسبت تنش در ستون برای حالت نسبت تنش ۱ در تیر.

تحلیل حساسیت تکنیکی برای تعیین تأثیر خواص مختلف مانند شرایط مرزی، خواص میرایی، ثابت‌های مواد و پارامترهای هندسی بر پاسخ‌های سازه‌ای است. استفاده از روش‌های حساسیت برای ارزیابی ساختارهای مختلف پیشنهاد شده است [۴۹ و ۵۰]. در این

پژوهش، مقاومت در برابر خرابی پیشرونده قاب‌های بتن آرمه در حالت‌های حذف ستون مستقل از تهدید با استفاده از شاخص‌های حساسیت و تنومندی بررسی شده است. یکی از روش‌های بسیار متداول مطالعه میزان آسیب‌پذیری سازه‌ها در برابر خرابی پیشرونده، استفاده از شاخص حساسیت می‌باشد [۱۳، ۱۴، ۵۱، ۵۲]. شاخص حساسیت (SI) برابر است با نسبت ظرفیت باربری سازه پس از حذف یک عضو و یا مجموعه‌ای از اعضا به ظرفیت باربری کل سازه که مطابق رابطه (۱۰) تعریف می‌گردد.

$$SI = (\lambda_0 - \lambda_{damage}) / \lambda_0 \quad 0 \ll SI \ll 1 \quad (10)$$

در این رابطه، λ_0 ظرفیت باربری نهایی در حالت اولیه و λ_{damage} ظرفیت باربری نهایی سازه پس از حذف ستون می‌باشد.

نزدیک بودن شاخص حساسیت به صفر نشان می‌دهد که عضو حذف شده از اهمیت کمتری در خرابی پیشرونده برخوردار است و چنانچه شاخص حساسیت به یک نزدیک باشد، این امر نشان می‌دهد که عضو حذف شده اهمیت بالایی در خرابی پیشرونده دارد و به عنوان عضو کلیدی در نظر گرفته می‌شود [۵۲]. در صورتی که شاخص حساسیت برابر ۱ باشد، نشان می‌دهد پس از حذف عضو، سازه در بحرانی‌ترین وضعیت قرار دارد و انهدام قطعی است زیرا در $SI = 1$ ، $\lambda_{damage} = 0$ است. بدین معنی که پس از حذف عضو، ظرفیت باربری سازه به صفر می‌رسد. در مقابل، اگر $SI = 0$ باشد نشان می‌دهد ظرفیت باربری سازه قبل و پس از حذف عضو هیچگونه تغییری نمی‌کند و عضو حذف شده هیچ تأثیری در باربری سازه ندارد.

تنومندی به صورت عدم حساسیت سازه نسبت به یک خرابی موضعی بیان می‌شود. به عبارت دیگر، تنومندی، پایداری سازه را در هنگام وقوع یک خرابی موضعی نشان می‌دهد. یک سازه تنومند می‌تواند بدون هیچ خرابی نامتجانسی در مقابل بارگذاری بایستد. برای طبقه‌بندی بهتر نتایج، شاخص تنومندی (R) بیان می‌شود. در صورتی که بار طراحی در سازه سالم و آسیب دیده یکسان باشد، R با استفاده از رابطه ۱۱ تعریف می‌شود [۴۹]:

$$R = \frac{V_{damaged}}{V_{intact}} \quad (11)$$

که V_{intact} برش پایه سازه بدون خرابی موضعی و $V_{damaged}$ برش پایه سازه با خرابی موضعی است.

اگر سازه سالم و آسیب دیده ظرفیت یکسانی داشته باشند، مقدار R برابر با ۱ است و اگر سازه خسارت دیده هیچ ظرفیتی نداشته باشد، مقدار R برابر با صفر است. برای یک بار جانبی ظرفیت برش پایه می‌تواند با اجرای یک تحلیل استاتیکی غیرخطی افزایش یافته بدست آید.

۴- معیار خرابی و سطوح عملکرد قاب‌های بتن آرمه در خرابی پیشرونده

در این پژوهش، معیار خرابی در نرم افزار به ترتیب شامل خرابی اولیه عضوهای باربر عمودی یا از بین رفتن خاصیت باربری عمودی اعضا، جدایی جزئی و کلی عضو و سقوط آن بصورت حرکت جسم صلب در راستای قائم، تبدیل انرژی پتانسیل به انرژی جنبشی، اصابت اعضای جدا شده و خراب شده بر روی باقی سازه، از بین رفتن خاصیت باربری عضوهای دیگر بر اثر اصابت و در نهایت پیشروی خرابی در جهت قائم می‌باشد. مدهای خرابی به کار رفته در جدول ۴ نشان داده شده است.

جدول ۴: مدهای خرابی

درجه آسیب	مد خرابی	وضعیت سازه
فروریزش	فروریختن موضعی یا کلی سازه	تخریب
شدید	خرد شدن گسترده بتن، نمایان شدن ترک‌های بسیار عمیق و قطری	غیرقابل تعمیر
متوسط	ترک‌های بزرگ و گسترده، آسیب بسیار جدی در اعضای ضعیف‌تر	قابل تعمیر
کم	ترک‌های کوچک، خرد شدن موضعی بتن در ستون‌ها، آسیب متوسط	قابل تعمیر
ناچیز	بروز ترک‌های پراکنده و آسیب مختصر	قابل تعمیر

در این پژوهش، قاب‌های خمشی ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ طبقه بتن آرمه تحت حذف ستون قرار می‌گیرند و بار افزایشنده قائم بر گره بالای ستون حذف شده اعمال می‌شود. با افزایش مقدار نیروی اعمالی به سازه و به تبع آن افزایش تنش‌ها، مفاصل پلاستیک خمشی در تیرها و ستون‌ها ایجاد می‌شود. رفتار فرا ارتجاعی سازه‌ها یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های ذاتی اعضای سازه است که با قرار دادن مفاصل پلاستیک در اعضای سازه می‌توان رفتار فرا غیرخطی سازه را بررسی کرد. در این پژوهش، از infrmFBPH جهت تعریف مفاصل پلاستیک استفاده شده است که در آن، مفاصل پلاستیک در دو انتهای عضو می‌باشد، یعنی فقط ۲ انتهای آن قابل غیرخطی شدن است. سطوح عملکرد طبق تعاریف مندرج در FEMA-356^{۴۲} به صورت زیر توصیف می‌شوند [۵۳]:

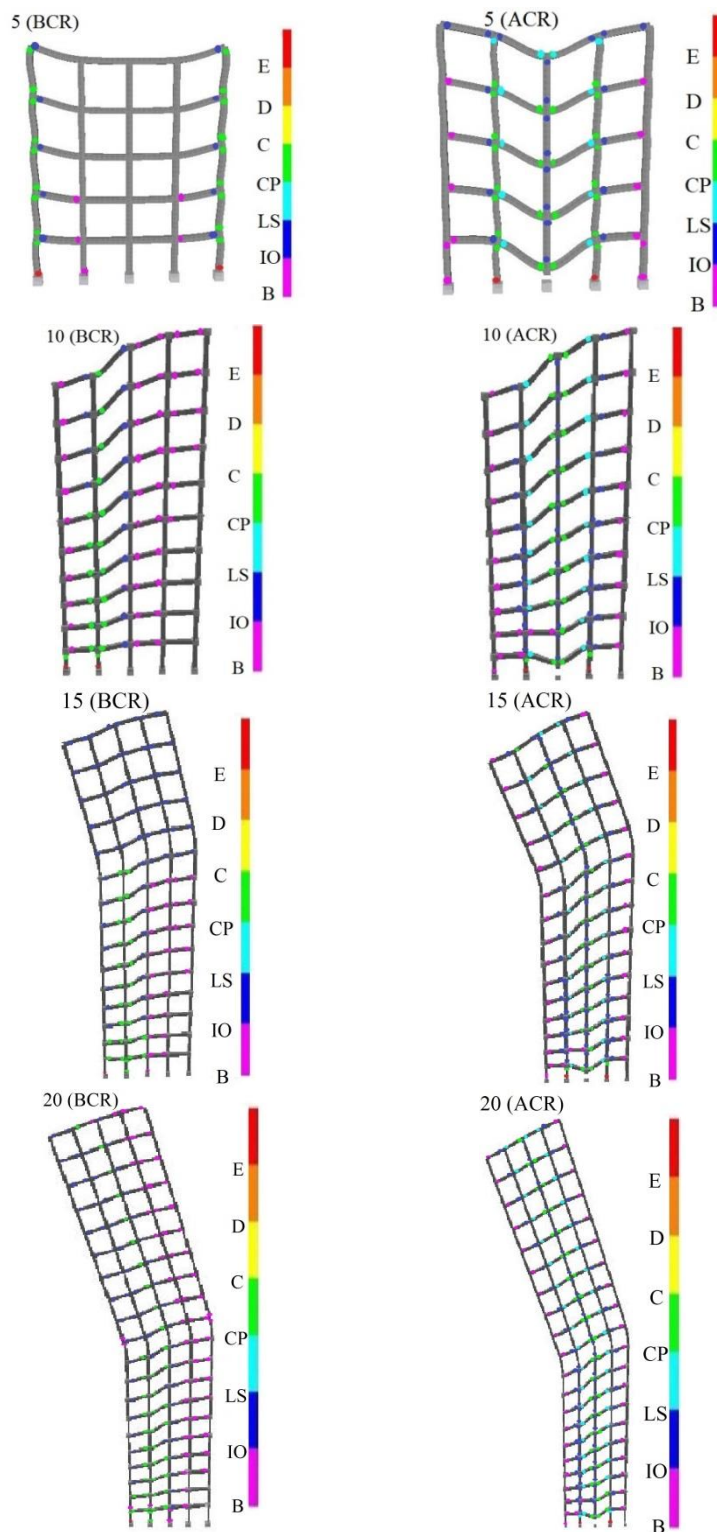
- ۱- سطح B، در این سطح، رفتار سازه کاملاً خطی می‌باشد و خسارات ایجاد شده بسیار ناچیز است.
- ۲- سطح قابلیت استفاده بی‌وقفه (IO)^{۴۳}، در این سطح، خرابی ایجاد شده در اجزای سازه‌ای ناچیز است و سختی سازه زیاد تغییر نمی‌کند.
- ۳- ایمنی جانی (LS)^{۴۴}، در این سطح، اجزای سازه‌ای و غیر سازه‌ای دچار خرابی زیادی شده و سختی سازه به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد، ولی حاشیه ایمنی قابل ملاحظه‌ای برای جلوگیری از خرابی موضعی و کلی وجود دارد.
- ۴- آستانه فروریزش (CP)^{۴۵}، در این حالت، سازه دچار خرابی گسترده شده و تحمل بار جانبی زلزله را ندارد ولی هنوز بار ثقلی خود را تحمل می‌کند.
- ۵- فروریزش (E)، در این حالت، سازه توان تحمل بارهای ثقلی را ندارد و دچار خرابی کامل می‌شود.

تعداد مفاصل پلاستیک در قاب‌های ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ طبقه بتن آرمه با و بدون حذف ستون میانی در جدول ۵ و مفاصل پلاستیک قاب‌های مذکور در شکل ۸ نشان داده شده است. مهم‌ترین سطوح عملکردی شامل عملکرد بی‌وقفه (IO)، ایمنی جانی (LS)، آستانه فروریزش (CP) و فروریزش کلی سازه می‌باشد.

جدول ۵: تعداد مفاصل پلاستیک در قاب‌های بتن آرمه با و بدون حذف ستون میانی

نوع سازه	تعداد مفاصل پلاستیک	نوع سازه	تعداد مفاصل پلاستیک
۵ طبقه	۳۵	۵ طبقه با حذف ستون	۷۲
۱۰ طبقه	۷۴	۱۰ طبقه با حذف ستون	۱۲۲
۱۵ طبقه	۱۲۴	۱۵ طبقه با حذف ستون	۱۷۲
۲۰ طبقه	۱۲۶	۲۰ طبقه با حذف ستون	۲۲۳

⁴² Federal Emergency Management Agency⁴³ Immidiate Occupancy⁴⁴ Life Safety⁴⁵ Collapse Prevention



شکل ۸: مفاصل پلاستیک در قاب‌های ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ طبقه بتن آرمه (BCR) قبل از حذف ستون و (ACR) بعد از حذف ستون میانی.

۵- مطالعه پارامتری خرابی پیشرونده قاب‌های بتن آرمه

در این پژوهش، مطالعات پارامتری شامل تغییر در تعداد طبقه، طول دهانه، ارتفاع طبقه، مقاومت فشاری بتن، مقاومت تسلیم میلگرد، ضریب پواسون و نسبت میرایی سازه در خرابی پیشرونده قاب‌های بتن آرمه انجام شدند. بدین منظور، قاب‌های بتن آرمه در حالت

با و بدون حذف ستون میانی مدل سازی شدند و شاخص های حساسیت و تنومندی آنها در خرابی پیشرونده بررسی و با یکدیگر مقایسه شد.

۵-۱ اثر تعداد طبقات در خرابی پیشرونده

برای بررسی تأثیر تعداد طبقات بر خرابی پیشرونده قابها به دنبال حذف ستون میانی، قابهای ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ طبقه بتن آرمه در حالت های بدون حذف ستون (شکل ۵) و با حذف ستون مدل سازی شدند. در تمام قاب های مورد بررسی، ارتفاع طبقه ۳/۲ m و طول دهانه ۳ m می باشد. مقاومت تسلیم مشخصه آرماتورهای طولی و عرضی ۲۳۴ MPa و مقاومت فشاری متوسط بتن ۴۱/۳ MPa می باشد. ویژگی های عناصر ستون ها و تیرها در جدول ۶ نشان داده شده است. مشخصات ابعادی تیرها و ستون ها در جدول ۷ و طرح آرماتورهای مدل عددی قاب های ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ طبقه در شکل ۹ ارائه شده است. قابل ذکر است که در قاب های ۱۰، ۱۵ و ۲۰ طبقه، نوع مقطع تیرها و ستون ها در هر ۵ طبقه تغییر می کند.

بر اساس آیین نامه وزارت دفاع (DoD)، بارگذاری در سازه ها انجام شد. از آنجایی که شرایط بارگذاری پس از حذف ناگهانی یک ستون کاملاً دینامیکی است، با استفاده از ضریب تقویت در روش تحلیل استاتیکی غیرخطی، ماهیت دینامیکی آن با بار ترکیبی که در DoD پیشنهاد شده است، تقریب می شود. در اینجا از ضریب تقویت دینامیکی ۲ در ترکیب بار که توسط دستورالعمل DoD پیشنهاد شده است، استفاده می شود. در روش تحلیل استاتیکی غیرخطی، بارها بر روی تیرهای مجاور ستون های حذف شده مطابق رابطه ۱۲ اعمال می شود [۹]:

$$load = 2[1.2D + 0.5L] \quad (12)$$

برای تجزیه و تحلیل دینامیکی، دستورالعمل های DoD استفاده از ضریب تقویت پویا را توصیه نمی کند. بر اساس دستورالعمل DoD، در روش های تحلیل دینامیکی خطی و غیرخطی، بار وارد شده به تیرهای متصل به ستون حذف شده در رابطه ۱۳ نشان داده شده است [۹]:

$$load = [1.2D + 0.5L] \quad (13)$$

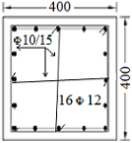
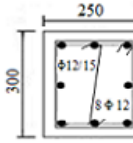
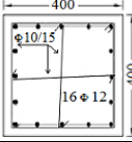
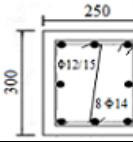
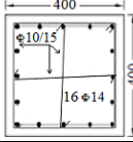
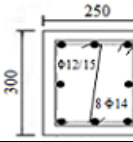
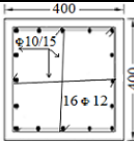
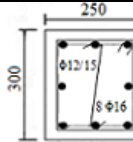
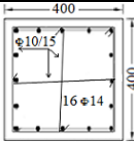
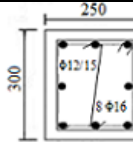
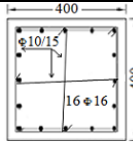
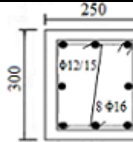
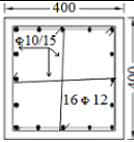
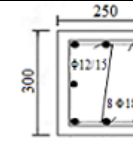
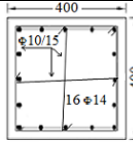
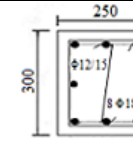
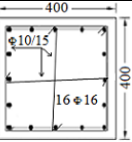
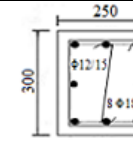
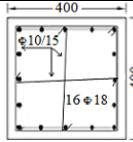
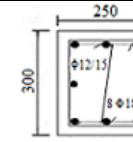
D و L به ترتیب بارهای مرده و زنده هستند.

جدول ۶: ویژگی های عناصر تیرها و ستون ها

	ستون	تیر
نوع عضو	infrmFBPH	infrmFBPH
مقطع فیبرها	۴۰۰	۴۰۰
طول مفصل پلاستیک (%)	۱۶/۶۷	۱۶/۶۷

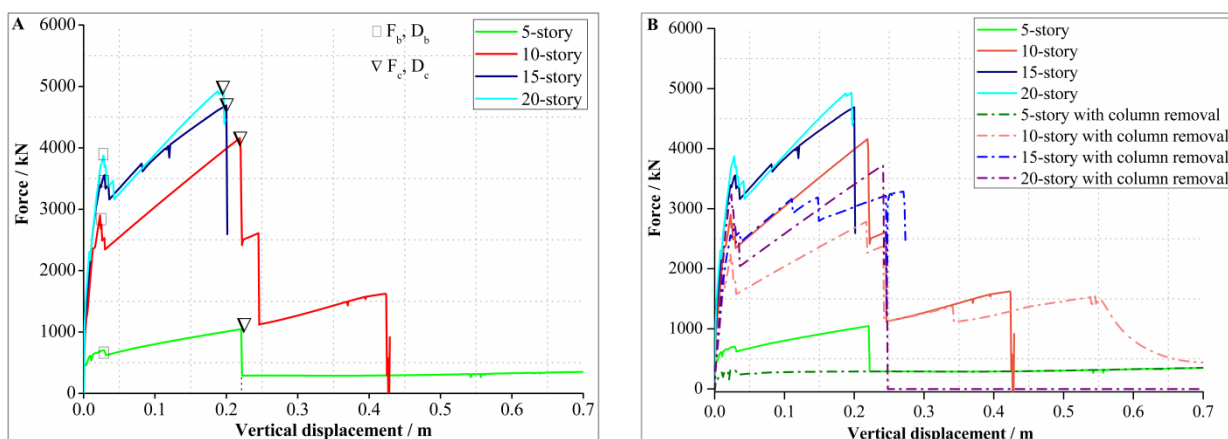
جدول ۷: مشخصات ابعادی قاب‌های بتن آرمه

تعداد طبقه	تیپ بندی	تیر			ستون		
		ابعاد مقطع (mm ²)	میلگرد طولی	میلگرد عرضی	ابعاد مقطع (mm ²)	میلگرد طولی	میلگرد عرضی
۵	۱-۵	۳۰۰ × ۲۵۰	8 Φ 12	Φ12/150mm	۴۰۰ × ۴۰۰	16 Φ 12	Φ10/150mm
	۱-۵	۳۰۰ × ۲۵۰	8 Φ 14	Φ12/150mm	۴۰۰ × ۴۰۰	16 Φ 12	Φ10/150mm
۱۰	۵-۱۰	۳۰۰ × ۲۵۰	8 Φ 14	Φ12/150mm	۴۰۰ × ۴۰۰	16 Φ 14	Φ10/150mm
	۱-۵					16 Φ 12	
۱۵	۵-۱۰	۳۰۰ × ۲۵۰	8 Φ 16	Φ12/150mm	۴۰۰ × ۴۰۰	16 Φ 14	Φ10/150mm
	۱۰-۱۵					16 Φ 16	
۲۰	۱-۵					16 Φ 12	
	۵-۱۰	۳۰۰ × ۲۵۰	8 Φ 18	Φ12/150mm	۴۰۰ × ۴۰۰	16 Φ 14	Φ10/150mm
	۱۰-۱۵					16 Φ 16	
	۱۵-۲۰					16 Φ 18	

تعداد طبقه	ستون	تیر
۵		
۱۰		
		
۱۵		
		
		
۲۰		
		
		
		

شکل ۹: مقاطع تیرها و ستون‌های قاب‌های ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ طبقه بتن آرمه.

منحنی‌های نیرو-جابجایی مدل‌های عددی قاب‌های بتن آرمه با تعداد طبقات مختلف بدون حذف ستون در شکل ۱۰A و برای قاب‌های با و بدون حذف ستون میانی در شکل ۱۰B نشان داده شده است. در شکل ۱۰B، منحنی‌های با خطوط توپر مربوط به قاب‌ها بدون حذف ستون و منحنی‌های با خط چین مربوط به قاب‌ها پس از حذف ستون میانی می‌باشد. مشاهده می‌شود که با افزایش تعداد طبقات، ظرفیت باربری قاب‌ها در هر دو ناحیه عملکرد قوس فشاری در مقطع تیر و ناحیه عملکرد زنجیره‌ای بهبود می‌یابد.



شکل ۱۰: منحنی‌های نیرو-جاب‌جایی قاب‌های بتن آرمه با تعداد طبقات مختلف (A بدون حذف ستون، B با و بدون حذف ستون میانی، F_b و D_b نیرو و جاب‌جایی اولین پیک در مکانیسم تیر، F_c و D_c نیرو و جاب‌جایی در اولین شکست میلگرد).

مقادیر نیرو و جاب‌جایی اولین پیک در مکانیسم تیر و اولین شکست میلگرد برای قاب‌های بتن آرمه ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ طبقه بدون حذف ستون در جدول ۸ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، افزایش تعداد طبقات به میزان قابل توجهی سختی اولیه و مقاومت سازه‌ای قاب‌ها را بهبود می‌بخشد و مقاومت قاب‌ها در برابر خرابی پیشرونده به دلیل عملکرد ویریندیل^{۴۶} افزایش می‌یابد.

جدول ۸: مقادیر نیرو و جاب‌جایی در اولین پیک در مکانیسم تیر و اولین شکست میلگرد در قاب‌های بتن آرمه با تعداد طبقات مختلف

تعداد	F_b (kN)	D_b (m)	F_c (kN)	D_c (m)
۵	۷۰۲/۸۰۵	۰/۰۲۹	۱۰۴۷/۳۵۶	۰/۲۲۱
۱۰	۲۹۰۰/۷۰۷	۰/۰۲۳	۴۱۶۰/۳۰۱	۰/۲۱۹
۱۵	۳۳۵۵/۹۹۹	۰/۰۲۴	۴۶۹۰/۸۷	۰/۲
۲۰	۳۸۷۵/۴۷۵	۰/۰۲۸	۴۹۳۲/۴۲۷	۰/۱۹۶

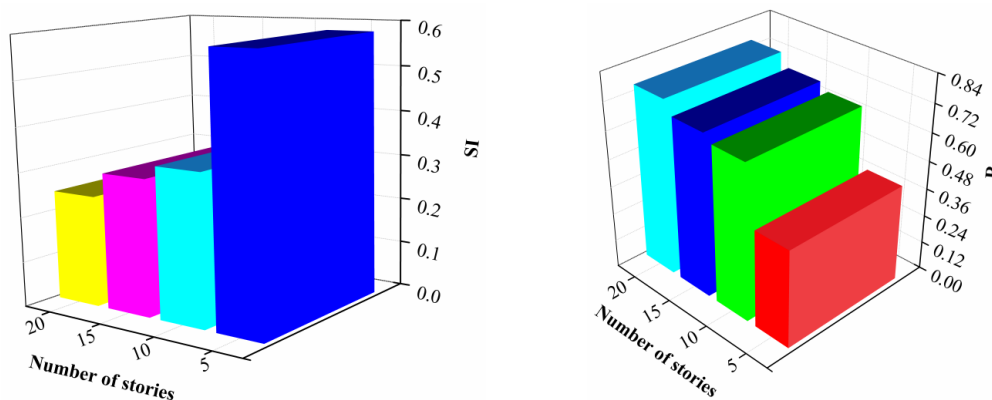
در قاب‌های بتن آرمه با حذف ستون، عملکرد ویریندیل به دلیل انحنای مضاعف ستون‌ها و تیرها در نزدیکی ستون حذف شده ایجاد می‌شود. در نتیجه تکرار دهانه‌ها در ساختار باقیمانده، برخی از لنگرهای خمشی افزایش می‌یابند و برخی دیگر به عناصر طرف مقابل منتقل می‌شوند. بنابراین، هر عنصر افقی باید با آرماتورهای پیوسته تقویت شود. علاوه بر آن، تمام عناصر عمودی نیز باید با آرماتورهای یکنواخت تقویت گردد. در شرایط عادی در یک سازه قبل از حذف ستون، تنش‌های اصلی ستون‌ها، تنش‌های فشاری هستند. حذف یک ستون باعث تشکیل گشتاورهای خمشی قابل توجهی می‌شود و همچنین تنش‌های کششی به دلیل عملکرد ویریندیل توسعه می‌یابند [۵۴]. ساسانی و همکاران دریافتند که توسعه عملکرد ویریندیل، مقاومت معمولی سازه را در برابر خرابی پیشرونده به طور قابل توجهی افزایش می‌دهد [۵۵]. لی و همکاران بیان کردند که شکل‌گیری عملکرد ویریندیل سبب اعمال کرنش‌های متفاوتی در طبقات مختلف می‌شود و در نتیجه استفاده از آرماتورهای تقویت لرزه‌ای در طبقات پایین موثرتر است [۵۴]. استفاده از آرماتورهای عرضی ویژه در محل اتصال تیر-ستون نیز برای به حداکثر رساندن مزایای این مکانیسم توصیه می‌شود [۵۶]. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش تعداد طبقات، شاخص حساسیت کاهش می‌یابد. همچنین در بررسی شاخص تنومندی مشخص گردید با افزایش تعداد طبقات، شاخص تنومندی افزایش

⁴⁶ Vierendeel action

می یابد (جدول ۹). در نتیجه، در بررسی شاخص‌های حساسیت و تنومندی مشخص می‌شود با افزایش تعداد طبقات، شرایط برای جلوگیری از خرابی پیشرونده ناشی از عملکرد ویریندیل بهتر خواهد بود (شکل ۱۱).

جدول ۹: توزیع مجدد بارهای وارده در قاب‌های بتن آرمه با تعداد طبقات مختلف

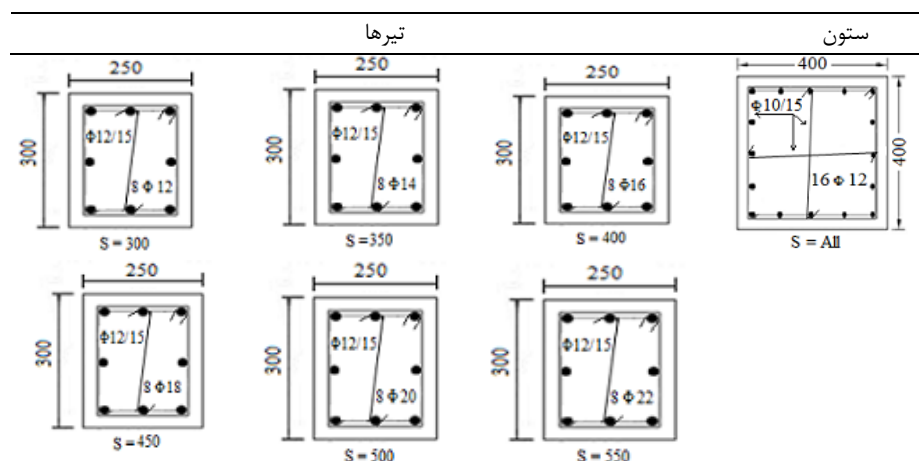
تعداد طبقات	λ_0	λ_{damage}	SI	R
۵	۱۰۴۷/۳۵۶	۴۳۷/۸۳۷	۰/۵۸۲	۰/۴۱۸
۱۰	۴۱۶۰/۳۰۱	۲۷۸۶/۴۱۶	۰/۳۳۰	۰/۶۷۰
۱۵	۴۶۹۰/۱۸۷	۳۲۸۵/۵۹۳	۰/۳	۰/۷۰۰
۲۰	۴۹۳۲/۴۲۷	۳۷۲۴/۴۳۴	۰/۲۴۵	۰/۷۵۵



شکل ۱۱: نمودار شاخص‌های حساسیت و تنومندی بر حسب تعداد طبقات.

۵-۲ اثر طول دهانه در خرابی پیشرونده

اثر طول دهانه بر خرابی پیشرونده قاب‌های بتن آرمه بررسی گردید. برای این منظور، قاب‌های ۵ طبقه با و بدون حذف ستون میانی با ویژگی‌های هندسی مشابه و طول دهانه‌های مختلف ۳، ۴، ۵/۴، ۵ و ۵/۵ مدلسازی شدند. برای تمام قاب‌ها، مقاومت تسلیم آرماتورهای طولی و عرضی، ۲۳۴ MPa، مقاومت فشاری متوسط بتن، ۴۱/۳ MPa، حداکثر شتاب بستر زمین برای حد ایمنی جانی، g ۰/۲۴، زمین نوع B و ضریب رفتار برای شکل‌پذیری متوسط ۵/۸۵ بود. آرایش آرماتورها در ستون‌ها و تیرها در شکل ۱۲ نشان داده شده است. مقادیر میلگردهای طولی و خاموت‌ها و همچنین ابعاد مقاطع قاب‌ها در جدول ۱۰ ارائه شده است.

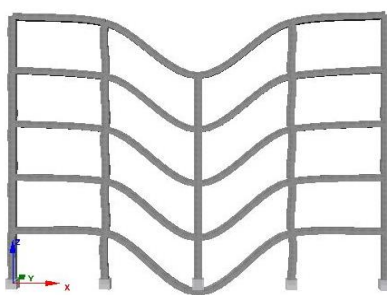


شکل ۱۲: طرح آرماتورهای تیرها و ستون‌ها در قاب ۵ طبقه بتنی با طول دهانه متفاوت.

جدول ۱۰: مشخصات مقاطع قاب با طول دهانه‌های مختلف

طول دهانه (cm)	ابعاد (depth × width) (mm ²)	آرماتور طولی	آرماتور عرضی	ابعاد (depth × width) (mm ²)	آرماتور طولی	آرماتور عرضی
300	300 × 250	8 Φ 12	Φ12/150mm	400 × 400	16 Φ 12	Φ10/150mm
350		8 Φ 14				
400		8 Φ 16				
450		8 Φ 18				
500		8 Φ 20				
550		8 Φ 22				

همانطور که از شکل ۱۳ مشخص می‌شود، تحلیل استاتیکی غیر خطی افزایش یافته قائم^{۴۷} در حالت تغییر مکان-کنترل با حذف ستون میانی قاب انجام شده است. گره ساختاری بالای ستون حذف شده برای رسیدن به جابه‌جایی عمودی ۱۲۰۰ mm در ۹۰۰ مرحله تحلیل اعمال گردید. تغییر سختی در مراحل تحلیل تغییر شکل‌های کوچک عمدتاً به دلیل عملکرد افقی بارهای رو به پایین است. به بیان دیگر، عملکرد قوس فشاری در تیرها موجب می‌شود دهانه‌های غیر از آنهایی که در بالای ستون حذف شده هستند، به سمت بیرون رانده شوند و پس از شروع نیروهای کششی در مکانیسم خرابی پیشرونده به سمت داخل کشیده شوند [۶۱-۵۷].



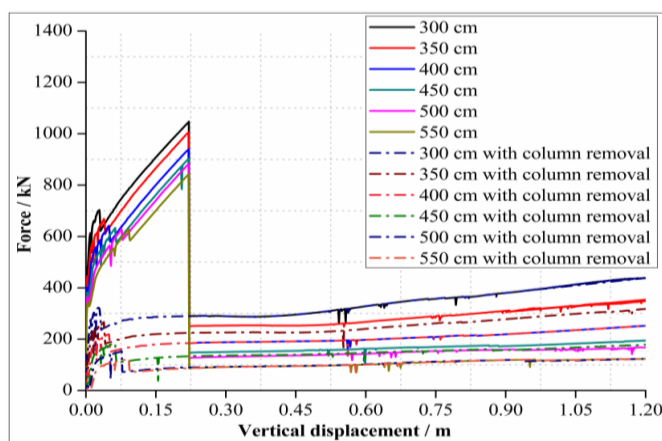
شکل ۱۳: بزرگنمایی ۷ برابری مدل تغییر شکل یافته با طول دهانه S = 5 m.

منحنی‌های نیرو-جابه‌جایی عمودی قاب‌های بتن آرمه با طول‌های دهانه مختلف در شکل ۱۴ نشان داده شده است. منحنی‌های مربوط به قاب‌ها پیش از حذف ستون با خطوط تیره و پس از حذف ستون با خط چین نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش طول دهانه، مقاومت در برابر خرابی پیشرونده کاهش می‌یابد. این امر به این دلیل است که ظرفیت باربری در عملکرد قوس

⁴⁷ Nonlinear static pushdown analysis

فشاری، اولین شکست میلگرد و در ناحیه عملکرد زنجیره‌ای کاهش می‌یابد. جابه‌جایی‌های مربوط به اولین پیک در مکانیسم تیر و اولین شکست میلگرد در طول‌های دهانه مختلف تقریباً یکسان هستند.

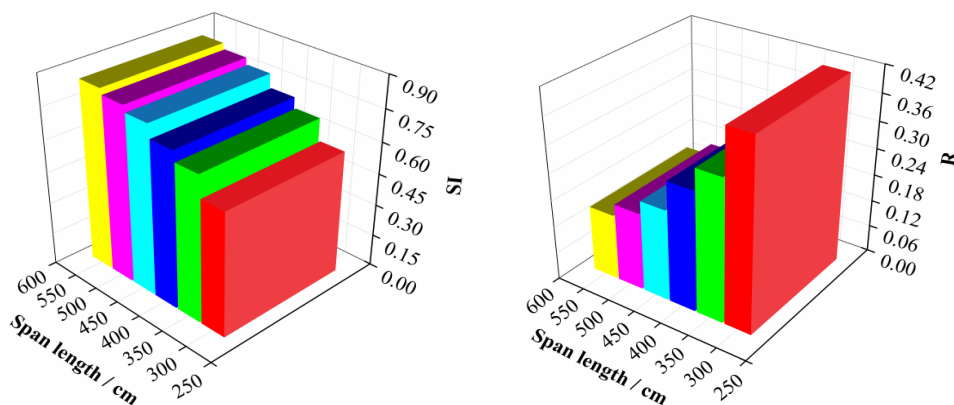
نتایج نشان داد که با افزایش طول دهانه، شاخص حساسیت افزایش و شاخص تنومندی کاهش می‌یابد (جدول ۱۱ و شکل ۱۵). از این رو با توجه به هر دو شاخص حساسیت و تنومندی، با افزایش طول دهانه، وضعیت سازه در خرابی پیشرونده بحرانی‌تر می‌شود. از آنجایی که با کاهش بیش از حد طول دهانه، احتمال شکست برشی در تیرها افزایش می‌یابد و همچنین توسعه مکانیسم‌های مقاومتی، مانند عملکرد قوس فشاری و عملکرد زنجیره‌ای خاتمه خواهد یافت، بنابراین محدوده طول دهانه مورد مطالعه کمتر از ۳ m انتخاب نگردید.



شکل ۱۴: منحنی‌های نیرو-جابه‌جایی قاب‌ها با طول دهانه متفاوت با و بدون حذف ستون میانی.

جدول ۱۱: توزیع مجدد بارهای وارده در قاب‌های بتن آرمه با طول‌های دهانه متفاوت

طول دهانه (cm)	λ_0	λ_{damage}	SI	R
۳۰۰	۱۰۴۷/۳۵۶	۴۳۷/۸۳۷	۰/۵۸۲	۰/۴۱۸
۳۵۰	۱۰۰۶/۴۰۶	۳۱۷/۷۵۶	۰/۶۸۴	۰/۳۱۶
۴۰۰	۹۴۰/۱۰۳	۲۵۲/۱۴۹	۰/۷۳۲	۰/۲۶۸
۴۵۰	۹۰۳/۴۲۷	۱۸۳/۹۳۱	۰/۷۹۶	۰/۲۰۴
۵۰۰	۸۸۲/۷۱۲	۱۵۳/۶۱۲	۰/۸۲۶	۰/۱۷۴
۵۵۰	۸۴۲/۸۴۶	۱۲۳/۵۷۸	۰/۸۵۳	۰/۱۴۷

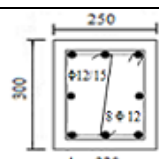
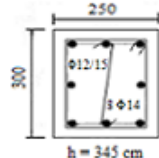
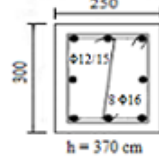
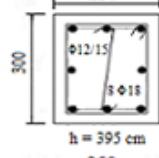
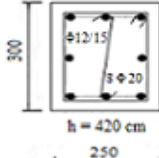
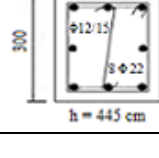
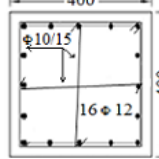


شکل ۱۵: نمودار شاخص‌های حساسیت و تنومندی بر حسب طول دهانه قاب‌ها.

۳-۵ اثر ارتفاع طبقه در خرابی پیشرونده

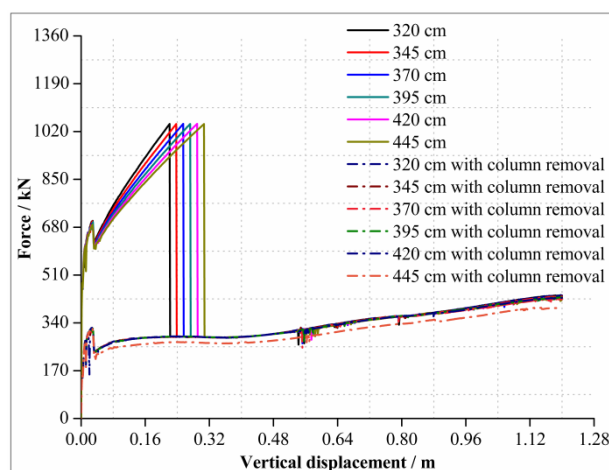
تأثیر ارتفاع طبقه بر خرابی پیشرونده قاب‌ها بررسی گردید. برای این منظور، قاب‌های ۵ طبقه با ویژگی‌های هندسی یکسان و ارتفاع‌های طبقه متفاوت ۳/۲۰، ۳/۴۵، ۳/۷۰، ۳/۹۵، ۴/۲۰ و ۴/۴۵ m مدلسازی شدند. مشخصات مقاطع و طرح آرماتور تیرها و ستون‌ها در جدول ۱۲ ارائه شده است.

جدول ۱۲: مشخصات مقاطع و طرح آرماتور تیرها و ستون‌ها در قاب‌ها با ارتفاع طبقه متفاوت

ارتفاع طبقه (cm)	ابعاد (عرض × ارتفاع) (mm ²)	آرماتور طولی تیرها	آرماتور عرضی	طرح آرماتورها
320	300 × 250	8 Φ 12	Φ12/150mm	
345	300 × 250	8 Φ 14	Φ12/150mm	
370	300 × 250	8 Φ 16	Φ12/150mm	
395	300 × 250	8 Φ 18	Φ12/150mm	
420	300 × 250	8 Φ 20	Φ12/150mm	
445	300 × 250	8 Φ 22	Φ12/150mm	
ستون‌ها				
در تمام ارتفاع‌های مختلف طبقات	400 × 400	16 Φ 12	Φ10/150mm	

منحنی‌های نیرو-جاب‌جایی قاب‌های ۵ طبقه بتن آرمه با ارتفاع طبقه متفاوت در شکل ۱۶ نشان داده شده است. منحنی با خطوط توپر مربوط به قاب‌ها پیش از حذف ستون و منحنی‌های خط چین مربوط به قاب‌ها پس از حذف ستون می‌باشد. مشاهده می‌شود

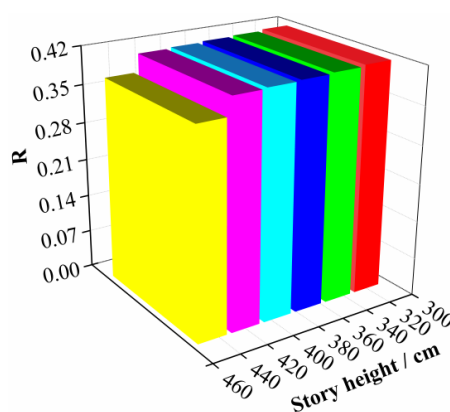
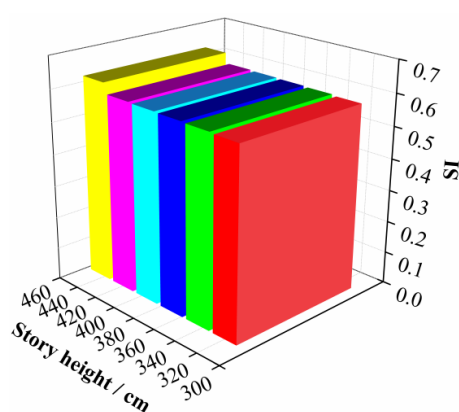
که با کاهش ارتفاع طبقه، ظرفیت باربری قاب‌ها در هر دو ناحیه عملکرد قوس فشاری در مقطع تیر و ناحیه عملکرد زنجیره‌ای اندکی بهبود می‌یابد. نتایج نشان داد که با افزایش ارتفاع طبقه، شاخص حساسیت افزایش می‌یابد و شاخص تنومندی کاهش می‌یابد (جدول ۱۳ و شکل ۱۷). در نتیجه، با افزایش ارتفاع طبقه، وضعیت سازه در خرابی پیشرونده بحرانی‌تر می‌شود.



شکل ۱۶: منحنی‌های نیرو-جاب‌جایی قاب‌های ۵ طبقه با ارتفاع طبقه مختلف.

جدول ۱۳: توزیع مجدد بارهای وارده در قاب‌های بتن آرمه با ارتفاع طبقه متفاوت

ارتفاع طبقه (cm)	λ_0	λ_{damage}	SI	R
۳۲۰	۱۰۴۷/۳۵۶	۴۳۷/۸۳۷	۰/۵۸۲	۰/۴۱۸
۳۴۵	۱۰۴۶/۶۹۳	۴۳۴/۸۸۰	۰/۵۸۵	۰/۴۱۵
۳۷۰	۱۰۴۷/۴۳۲	۴۳۲/۶۵۰	۰/۵۸۷	۰/۴۱۳
۳۹۵	۱۰۴۶/۷۷۶	۴۳۰/۶۵۹	۰/۵۸۹	۰/۴۱۱
۴۲۰	۱۰۴۷/۵۷۴	۴۲۸/۷۱۷	۰/۵۹۱	۰/۴۰۹
۴۴۵	۱۰۴۶/۸۴۹	۳۹۳/۹۰۱	۰/۶۲۴	۰/۳۷۶

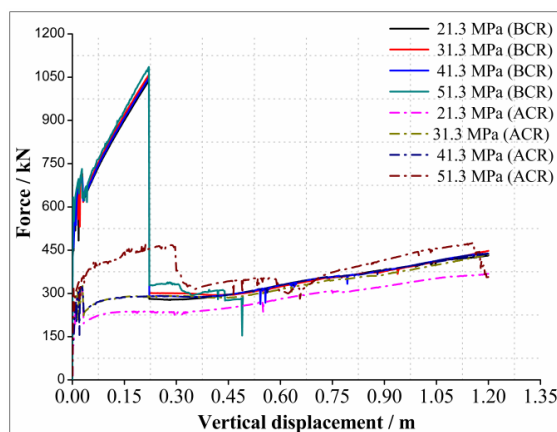


شکل ۱۷: نمودار شاخص‌های حساسیت و تنومندی قاب‌های ۵ طبقه با ارتفاع طبقه مختلف.

۵-۴ اثر مقاومت فشاری بتن در خرابی پیشرونده

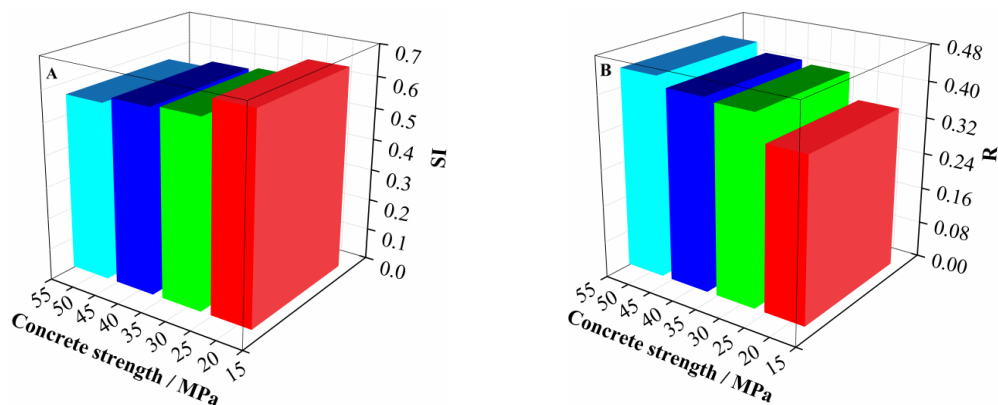
تاثیر مقاومت فشاری بتن بر خرابی پیشرونده قاب‌های بتن آرمه ۵ طبقه بررسی گردید. برای این منظور، مقاومت‌های فشاری مختلف بتن به ترتیب ۲۱/۳، ۳۱/۳، ۴۱/۳ و ۵۱/۳ MPa در نظر گرفته شد. قاب‌ها تحت حذف ستون میانی قرار گرفتند و در هر مورد

شاخص‌های حساسیت و تنومندی تعیین گردید. منحنی‌های نیرو-جاب‌جایی قاب‌های ۵ طبقه بتن آرمه با و بدون حذف ستون میانی با مقاومت‌های فشاری مختلف بتن در شکل ۱۸ نشان داده شده است. منحنی‌های با خطوط توپر مربوط به قاب‌ها قبل از حذف ستون و منحنی‌های خط چین مربوط به قاب‌ها پس از حذف ستون می‌باشد. مشاهده می‌شود، با افزایش مقاومت فشاری بتن، ظرفیت باربری در ناحیه مکانیسم تیر (ظرفیت خمشی و عملکرد قوس فشاری تیر) و عملکرد زنجیره‌ای تغییر چندانی نمی‌کند ولی در حالت با حذف ستون میانی، ظرفیت باربری در ناحیه مکانیسم تیر و در ناحیه عملکرد زنجیره‌ای افزایش می‌یابد.



شکل ۱۸: منحنی‌های نیرو-جاب‌جایی قاب‌های ۵ طبقه با مقاومت‌های فشاری مختلف بتن. (BCR) مربوط به پیش از حذف ستون و (ACR) مربوط به پس از حذف ستون می‌باشد.

همچنین مقادیر شاخص‌های حساسیت و تنومندی بر حسب مقاومت‌های فشاری مختلف بتن به دست آمدند. نتایج نشان داد که افزایش مقاومت فشاری بتن در محدوده مورد مطالعه، به ترتیب شاخص‌های حساسیت و تنومندی را کاهش و افزایش می‌دهد. در نتیجه وضعیت سازه در برابر خرابی پیشرونده بهبود می‌یابد (شکل ۱۹ و جدول ۱۴).



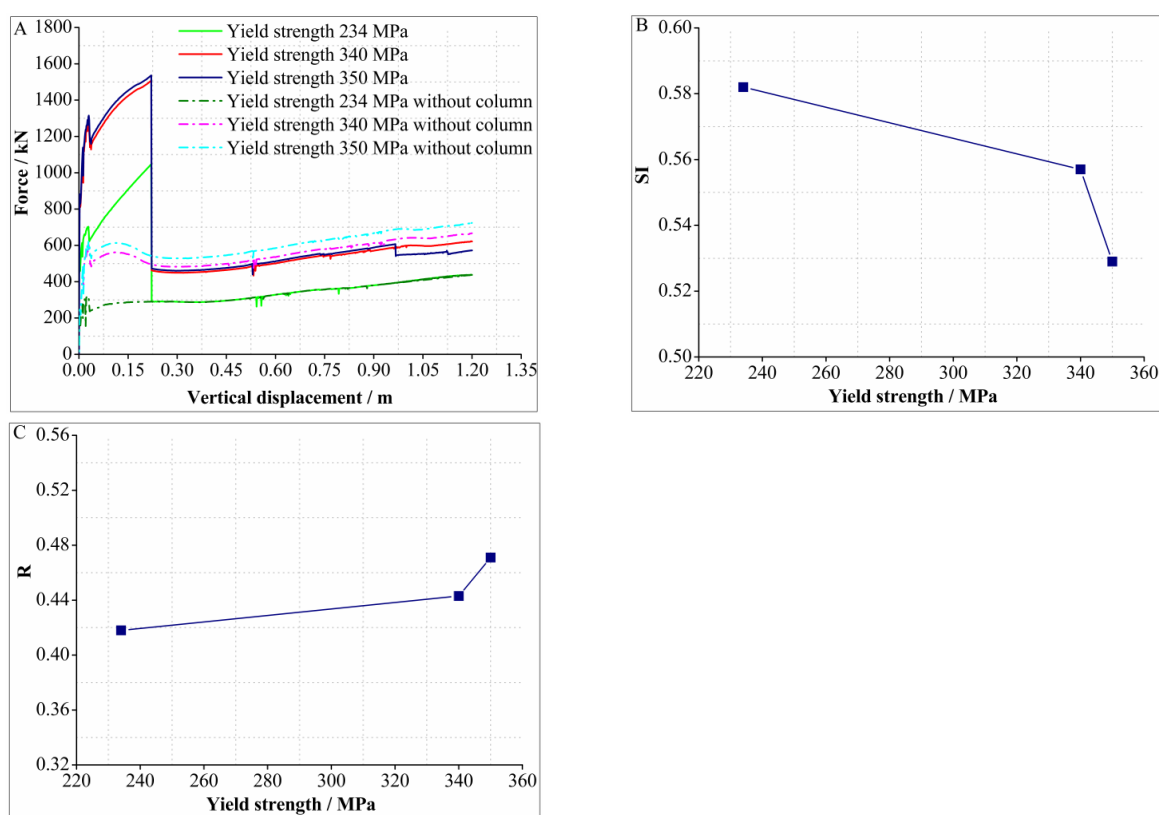
شکل ۱۹: نمودار شاخص حساسیت (B) نمودار شاخص تنومندی بر حسب مقاومت‌های فشاری مختلف بتن.

جدول ۱۴: توزیع مجدد بارهای وارده در قاب‌های بتن آرمه با مقاومت‌های فشاری مختلف بتن

مقاومت فشاری (MPa)	λ_0	λ_{damage}	SI	R
۲۱/۳	۱۰۳۸/۱۹۲	۳۶۷/۹۶۱	۰/۶۴۶	۰/۳۵۴
۳۱/۳	۱۰۵۸/۴۰۱	۴۳۵/۵۰۳	۰/۵۸۹	۰/۴۱۱
۴۱/۳	۱۰۴۷/۳۵۶	۴۳۷/۸۳۷	۰/۵۸۲	۰/۴۱۸
۵۱/۳	۱۰۸۵/۴۹۲	۴۷۶/۵۳۶	۰/۵۶۱	۰/۴۳۹

۵-۵ اثر مقاومت تسلیم میلگرد در خرابی پیشرونده

تأثیر مقاومت تسلیم میلگرد بر پتانسیل خرابی پیشرونده قاب‌های بتن آرمه ۵ طبقه بررسی گردید. قاب‌های ۵ طبقه با مقاومت‌های تسلیم مختلف میلگرد به ترتیب ۲۳۴، ۳۴۰ و ۳۵۰ MPa مدلسازی شدند و تحت حذف ستون میانی قرار گرفتند و در هر مورد شاخص‌های حساسیت و تنومندی تعیین گردید. منحنی‌های نیرو-جاب‌جایی قاب‌های ۵ طبقه با و بدون حذف ستون میانی و همچنین مقادیر شاخص‌های حساسیت و تنومندی بر حسب مقاومت‌های تسلیم مختلف میلگرد در شکل ۲۰ نمایش داده شده است. همانطور که در شکل ۲۰A مشاهده می‌شود، با افزایش مقاومت تسلیم میلگرد، ظرفیت باربری در ناحیه مکانیسم تیر (ظرفیت خمشی و عملکرد قوس فشاری تیر) و در ناحیه عملکرد زنجیره‌ای افزایش می‌یابد. شاخص حساسیت برای مقاومت‌های تسلیم میلگرد ۲۳۴، ۳۴۰ و ۳۵۰ MPa به ترتیب ۰/۵۸۲، ۰/۵۵۷ و ۰/۵۲۹ به دست آمد (شکل ۲۰B). همچنین مشخص شد با افزایش مقاومت تسلیم میلگرد، شاخص تنومندی افزایش می‌یابد (شکل ۲۰C). نتایج نشان داد که افزایش مقاومت تسلیم میلگرد در محدوده مورد مطالعه، به ترتیب شاخص‌های حساسیت و تنومندی را کاهش و افزایش می‌دهد. در نتیجه، وضعیت سازه در برابر خرابی پیشرونده بهبود می‌یابد (جدول ۱۵).



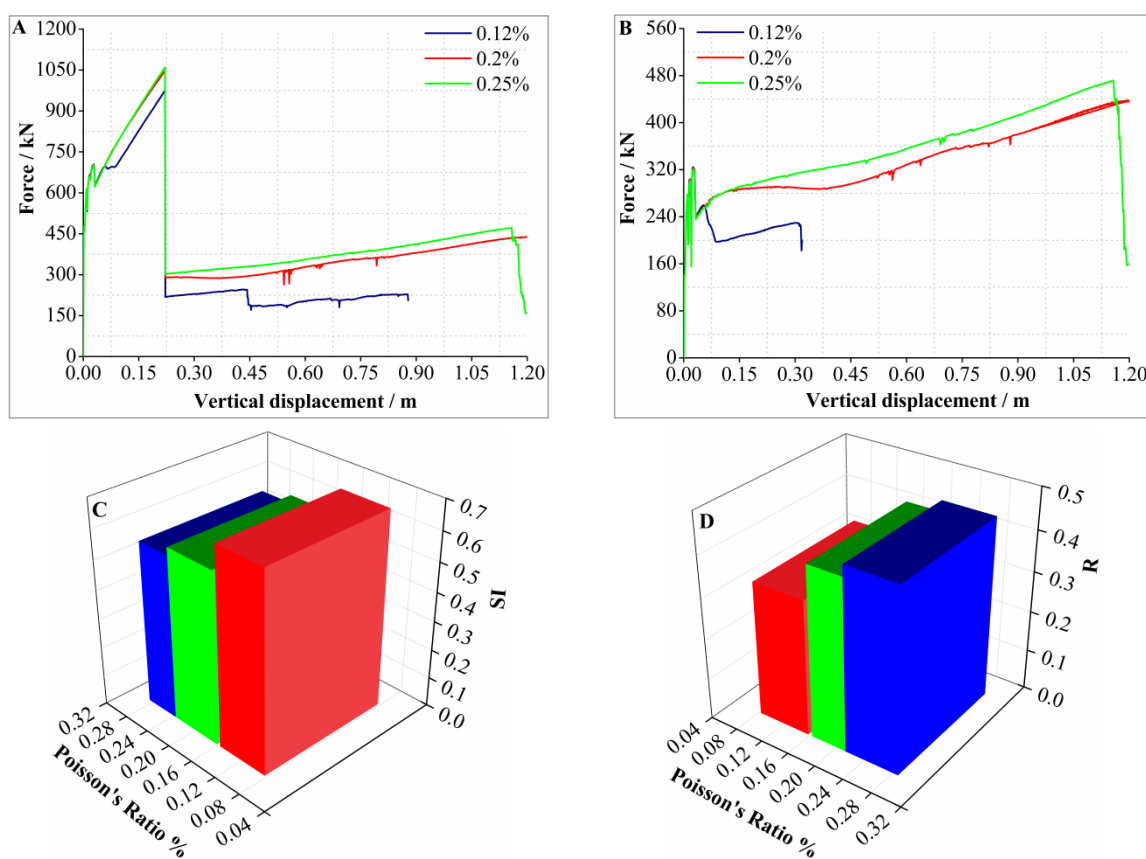
شکل ۲۰: (A) منحنی‌های نیرو-جاب‌جایی قاب‌های ۵ طبقه بتن آرمه با مقاومت‌های تسلیم مختلف میلگرد با و بدون حذف ستون میانی، (B) نمودار شاخص حساسیت و (C) نمودار شاخص تنومندی بر حسب مقاومت‌های تسلیم مختلف میلگرد.

جدول ۱۵: توزیع مجدد بارهای وارده در قاب‌های بتن آرمه با مقاومت‌های تسلیم مختلف میلگرد

مقاومت تسلیم میلگرد (MPa)	λ_0	λ_{damage}	SI	R
۲۳۴	۱۰۴۷/۳۵۶	۴۳۷/۸۳۷	۰/۵۸۲	۰/۴۱۸
۳۴۰	۱۵۰۷/۴۳۰	۶۶۷/۰۸۶	۰/۵۵۷	۰/۴۴۳
۳۵۰	۱۵۳۶/۱۹۸	۷۲۳/۹۶۱	۰/۵۲۹	۰/۴۷۱

۵-۶ اثر ضریب پواسون در خرابی پیشرونده

تأثیر ضرایب پواسون مختلف بتن بر خرابی پیشرونده قاب‌های بتن آرمه ۵ طبقه مورد بررسی قرار گرفت. قاب‌ها با ضرایب پواسون مختلف بتن (۰/۱۲٪، ۰/۲٪ و ۰/۲۵٪) مدلسازی شدند و تحت حذف ستون میانی قرار گرفتند و در هر مورد شاخص‌های حساسیت و تنومندی تعیین شد. منحنی‌های نیرو-جاب‌جایی قاب‌ها بدون حذف ستون و با حذف ستون میانی به ترتیب در شکل‌های ۲۱A و ۲۱B نشان داده شده است. مشاهده می‌شود با افزایش ضریب پواسون، ظرفیت باربری در ناحیه مکانیسم تیر و نواحی عملکرد زنجیره‌ای افزایش می‌یابد. نتایج شاخص‌های حساسیت و تنومندی قاب‌ها با ضرایب پواسون مختلف به ترتیب در شکل‌های ۲۱C و ۲۱D نشان داده شده است. مشخص می‌شود که افزایش ضرایب پواسون بتن در محدوده مورد مطالعه، به ترتیب شاخص‌های حساسیت و تنومندی را کاهش و افزایش می‌دهد (جدول ۱۶). بنابراین وضعیت قاب‌ها در برابر انهدام پیشرونده بهبود می‌یابد.



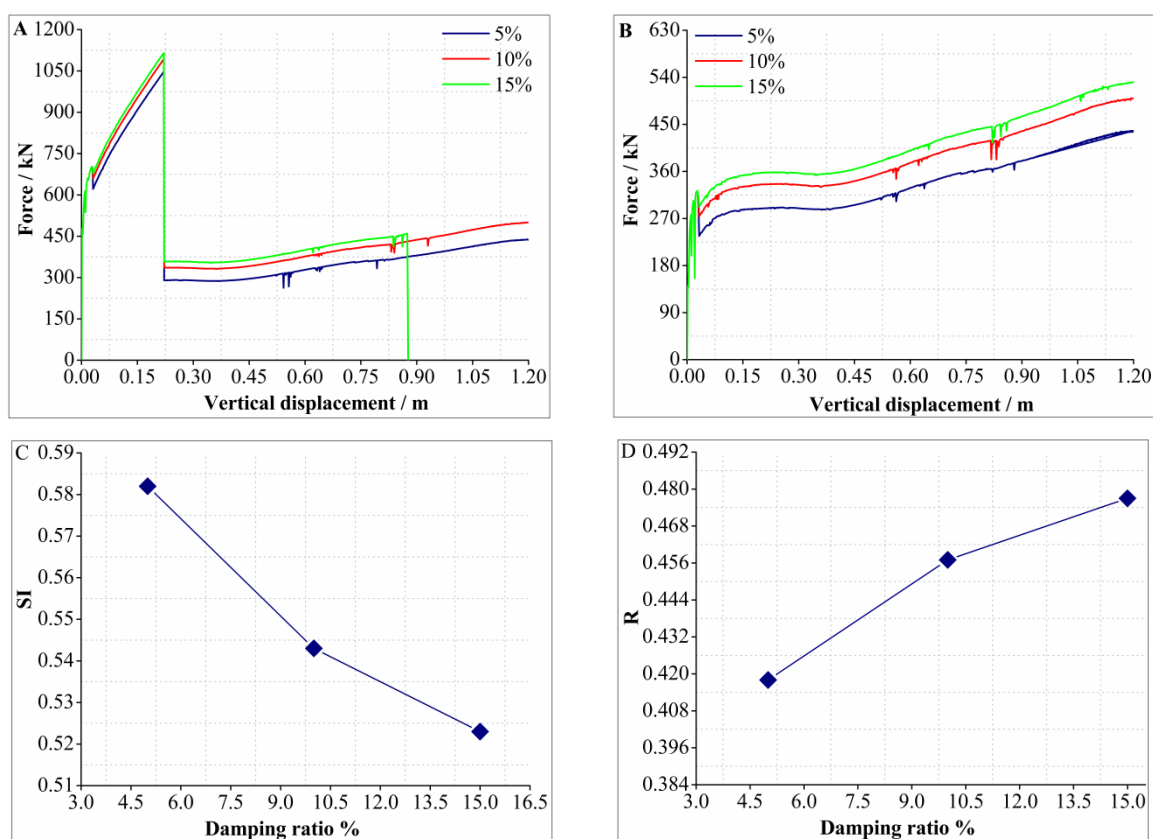
شکل ۲۱: منحنی‌های نیرو-جاب‌جایی قاب‌های ۵ طبقه بتن آرمه با ضرایب پواسون مختلف بتن (A) بدون حذف ستون و (B) با حذف ستون میانی، (C) نمودار شاخص حساسیت و (D) نمودار شاخص تنومندی بر حسب ضرایب پواسون بتن.

جدول ۱۶: توزیع مجدد بارهای وارده در قاب‌های بتن آرمه با ضرایب پواسون متفاوت

ضریب پواسون	λ_0	λ_{damage}	SI	R
۰/۱۲٪	۹۷۵/۴۶۲	۳۲۴/۲۵۵	۰/۶۶۸	۰/۳۳۲
۰/۲٪	۱۰۴۷/۳۵۶	۴۳۷/۸۳۷	۰/۵۸۲	۰/۴۱۸
۰/۲۵٪	۱۰۵۹/۷۷۴	۴۷۱/۳۵۶	۰/۵۵۵	۰/۴۴۵

۷-۵ اثر نسبت میرایی سازه در خرابی پیشرونده

تاثیر نسبت میرایی سازه بر خرابی پیشرونده قاب‌های بتن آرمه ۵ طبقه مورد بررسی قرار گرفت. قاب‌ها با نسبت‌های میرایی مختلف ۵٪، ۱۰٪ و ۱۵٪ مدلسازی شدند و تحت حذف ستون میانی قرار گرفتند و در هر مورد شاخص‌های حساسیت و تنومندی تعیین شدند. منحنی‌های نیرو-جاب‌جایی قاب‌ها بدون حذف ستون و با حذف ستون میانی با نسبت‌های میرایی مختلف سازه به ترتیب در شکل-های ۲۲A و ۲۲B نشان داده شده است. مشاهده می‌شود با افزایش نسبت میرایی سازه، ظرفیت باربری در ناحیه مکانیسم تیر و نواحی عملکرد زنجیره‌ای افزایش می‌یابد. نتایج شاخص‌های حساسیت و تنومندی قاب‌ها با نسبت‌های میرایی مختلف به ترتیب در شکل‌های ۲۲C و ۲۲D نشان داده شده است. مشخص می‌شود که افزایش نسبت‌های میرایی سازه در محدوده مورد مطالعه، به ترتیب شاخص‌های حساسیت و تنومندی را کاهش و افزایش می‌دهد (جدول ۱۷). بنابراین وضعیت قاب‌ها در برابر انهدام پیشرونده بهبود می‌یابد.



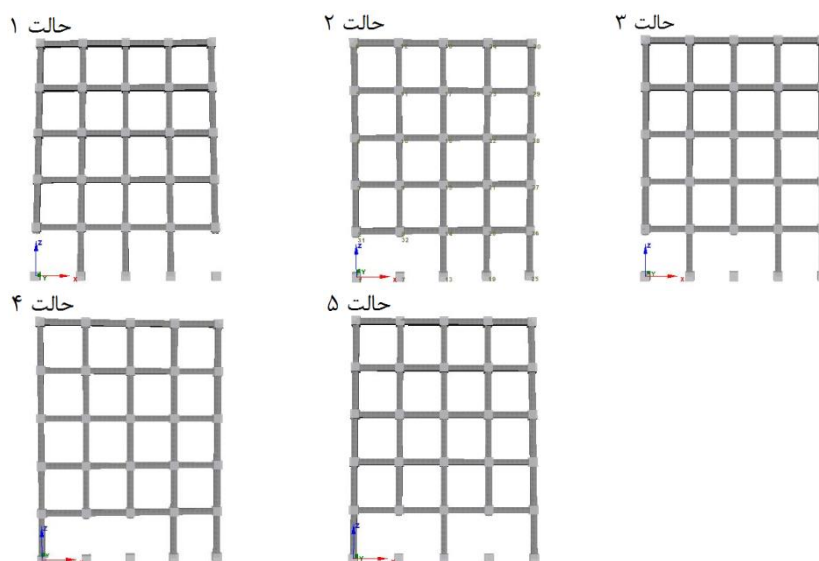
شکل ۲۲: منحنی‌های نیرو-جاب‌جایی قاب‌های ۵ طبقه بتن آرمه با نسبت‌های میرایی مختلف سازه (A) بدون حذف ستون و (B) با حذف ستون میانی، (C) نمودار شاخص حساسیت و (D) نمودار شاخص تنومندی بر حسب نسبت میرایی سازه.

جدول ۱۷: توزیع مجدد بارهای وارده در قاب‌های بتن آرمه با نسبت‌های میرایی مختلف

نسبت میرایی سازه	λ_0	λ_{damage}	SI	R
۵٪	۱۰۴۷/۳۵۶	۴۳۷/۸۳۷	۰/۵۸۲	۰/۴۱۸
۱۰٪	۱۰۹۲/۸۵۳	۴۹۹/۹۷۴	۰/۵۴۳	۰/۴۵۷
۱۵٪	۱۱۱۵/۳۵۶	۵۳۲	۰/۵۲۳	۰/۴۷۷

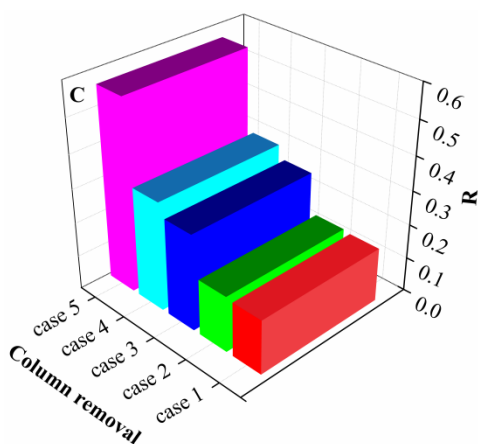
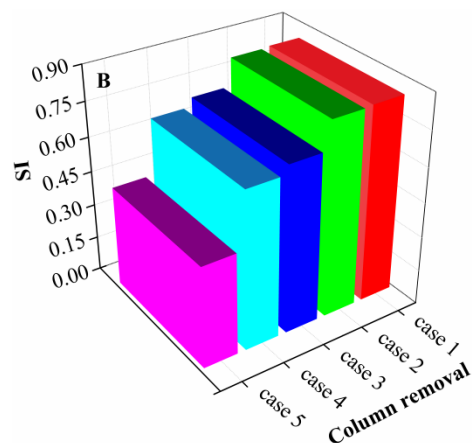
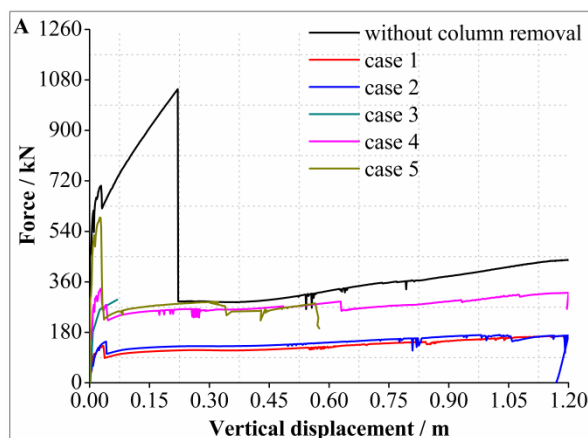
۶- اثر حذف چند ستون در خرابی پیشرونده

برای بررسی تاثیر حذف همزمان چند ستون در خرابی پیشرونده قاب‌های ۵ طبقه بتن آرمه، حذف همزمان دو ستون در حالات مختلف (۱ تا ۵) بررسی گردید. برای این منظور، قاب‌های ۵ طبقه بتنی با و بدون حذف دو ستون مدلسازی شدند. بارگذاری در قاب‌ها مطابق آیین‌نامه DoD صورت پذیرفت و در هر حالت، شاخص‌های حساسیت و تنومندی تعیین گردید. حالات مختلف حذف ستون‌ها در شکل ۲۳ نشان داده شده است.



شکل ۲۳: حالات مختلف حذف ستون در قاب‌های ۵ طبقه بتن آرمه.

منحنی‌های نیرو-جاب‌جایی قاب‌ها با و بدون حذف همزمان دو ستون در حالات مختلف در شکل ۲۴A و نمودارهای شاخص حساسیت و شاخص تنومندی به ترتیب در شکل‌های ۲۴B و ۲۴C نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که از حالت ۱ به حالت ۵، ظرفیت باربری قاب‌ها در هر دو ناحیه عملکرد قوس فشاری در مقطع تیر و ناحیه عملکرد زنجیره‌ای بهبود می‌یابد. نتایج شاخص‌های حساسیت و تنومندی در حالات مختلف حذف ستون در جدول ۱۸ ارائه شده است. مشخص می‌شود که حالت ۵ حذف ستون‌ها، دارای کمترین شاخص حساسیت و بیشترین شاخص تنومندی می‌باشد، در نتیجه شرایط بهتری در خرابی پیشرونده دارد. در حالی که، حالت ۱ حذف ستون‌ها، دارای بیشترین شاخص حساسیت و کمترین شاخص تنومندی می‌باشد. در نتیجه، از بین حالات مطالعه شده بدترین شرایط را در خرابی پیشرونده دارد.



شکل ۲۴: (A) منحنی‌های نیرو-جاب‌جایی قاب‌های ۵ طبقه بتن آرمه در حالت‌های مختلف حذف همزمان دو ستون، (B) نمودار شاخص حساسیت و (C) نمودار شاخص تنومندی در حالت‌های مختلف حذف ستون.

جدول ۱۸: توزیع مجدد بارهای وارده در قاب‌های ۵ طبقه بتن آرمه با حذف همزمان دو ستون

حالت حذف ستون	λ_0	λ_{damage}	SI	R
حالت ۱	۱۰۴۷/۳۵۶	۱۶۶/۸۵۰	۰/۸۴۱	۰/۱۵۹
حالت ۲	۱۰۴۷/۳۵۶	۱۷۱/۴۸۹	۰/۸۳۶	۰/۱۶۴
حالت ۳	۱۰۴۷/۳۵۶	۲۹۶/۶۴۶	۰/۷۱۷	۰/۲۸۳
حالت ۴	۱۰۴۷/۳۵۶	۳۳۵/۸۸۳	۰/۶۷۹	۰/۳۲۱
حالت ۵	۱۰۴۷/۳۵۶	۵۸۹/۶۵۹	۰/۴۳۷	۰/۵۶۳

۷- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، یک مدل عددی با مدل لی و همکاران شبیه‌سازی و صحت‌سنجی شد. پس از توسعه مدل عددی، سطوح عملکرد بررسی شد و مطالعه پارامتری بر روی قاب ۵ طبقه بتنی با حذف ستون میانی صورت پذیرفت. در پایان، حذف همزمان چند ستون در قاب‌های ۵ طبقه بتنی بررسی گردید. در تمامی حالات، شاخص‌های حساسیت و تنومندی بدست آمد. بر اساس مطالعات انجام شده، نتایج به شرح زیر می‌باشند:

- ۱- بررسی تأثیر تعداد طبقات بر خرابی پیشرونده قاب‌ها نشان می‌دهد که افزایش تعداد طبقات، به ترتیب شاخص‌های حساسیت و تنومندی را کاهش و افزایش می‌دهد. در نتیجه، با افزایش تعداد طبقات، شرایط برای جلوگیری از خرابی پیشرونده به دلیل عملکرد ویریندیل در قاب‌ها بهتر خواهد بود.
- ۲- مفاصل پلاستیک در قاب‌های ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ طبقه با و بدون حذف ستون تعیین گردید. نتایج نشان داد تعداد مفاصل پلاستیک در قاب‌های با حذف ستون به مراتب بیشتر از حالت بدون حذف ستون می‌باشد.
- ۳- بررسی تأثیر طول دهانه بر خرابی پیشرونده قاب‌ها نشان داد که افزایش طول دهانه، به ترتیب شاخص‌های حساسیت و تنومندی را افزایش و کاهش می‌دهد. در واقع، با افزایش طول دهانه، مقاومت در برابر خرابی پیشرونده کاهش می‌یابد. این امر به این دلیل است که با افزایش طول دهانه، ظرفیت باربری در عملکرد قوس فشاری، اولین شکست می‌لگردد و در ناحیه عملکرد زنجیره‌ای کاهش می‌یابد.
- ۴- بررسی تأثیر ارتفاع طبقه بر خرابی پیشرونده قاب‌ها نشان داد که افزایش ارتفاع طبقه، به ترتیب شاخص‌های حساسیت و تنومندی را افزایش و کاهش می‌دهد. در نتیجه با افزایش ارتفاع طبقه، وضعیت سازه در خرابی پیشرونده بحرانی‌تر می‌شود.
- ۵- در بررسی تأثیر مقاومت فشاری بتن بر خرابی پیشرونده قاب‌ها مشاهده می‌شود قبل از حذف ستون، با افزایش مقاومت فشاری بتن، ظرفیت باربری در ناحیه مکانیسم تیر (ظرفیت خمشی و عملکرد قوس فشاری تیر) و عملکرد زنجیره‌ای تغییر چندانی نمی‌کند ولی در حالت با حذف ستون، ظرفیت باربری در ناحیه مکانیسم تیر و در ناحیه عملکرد زنجیره‌ای افزایش می‌یابد. نتایج نشان داد که افزایش مقاومت فشاری بتن در محدوده مورد مطالعه، به ترتیب شاخص‌های حساسیت و تنومندی را کاهش و افزایش می‌دهد و در نتیجه وضعیت سازه در برابر خرابی پیشرونده بهبود می‌یابد.
- ۶- بررسی تأثیر مقاومت تسلیم می‌لگردد بر خرابی پیشرونده قاب‌ها نشان داد با افزایش مقاومت تسلیم می‌لگردد، ظرفیت باربری در ناحیه مکانیسم تیر (ظرفیت خمشی و عملکرد قوس فشاری تیر) و در ناحیه عملکرد زنجیره‌ای افزایش می‌یابد. نتایج نشان داد که افزایش مقاومت تسلیم می‌لگردد در محدوده مورد مطالعه، به ترتیب شاخص‌های حساسیت و تنومندی را کاهش و وضعیت سازه در برابر خرابی پیشرونده بهبود می‌یابد.
- ۷- در بررسی تأثیر ضرایب پواسون مختلف بتن بر خرابی پیشرونده قاب‌ها مشاهده می‌شود با افزایش ضریب پواسون، ظرفیت باربری در ناحیه مکانیسم تیر و نواحی عملکرد زنجیره‌ای افزایش می‌یابد. نتایج نشان داد که افزایش ضرایب پواسون بتن در محدوده مورد مطالعه، به ترتیب شاخص‌های حساسیت و تنومندی را کاهش و افزایش می‌دهد. بنابراین وضعیت قاب‌ها در برابر انهدام پیشرونده بهبود می‌یابد.
- ۸- در بررسی تأثیر نسبت میرایی سازه بر خرابی پیشرونده قاب‌ها مشاهده می‌شود با افزایش نسبت میرایی سازه، ظرفیت باربری در ناحیه مکانیسم تیر و نواحی عملکرد زنجیره‌ای افزایش می‌یابد. نتایج نشان می‌دهد افزایش نسبت‌های میرایی سازه در محدوده مورد مطالعه، به ترتیب شاخص‌های حساسیت و تنومندی را کاهش و افزایش می‌دهد. بنابراین وضعیت قاب‌ها در برابر انهدام پیشرونده بهبود می‌یابد.
- ۹- در بررسی تأثیر حذف همزمان چند ستون در خرابی پیشرونده قاب‌ها در حالت‌های مختلف مشاهده می‌شود که از حالت ۱ به حالت ۵، ظرفیت باربری قاب‌ها در هر دو ناحیه عملکرد قوس فشاری در مقطع تیر و ناحیه عملکرد زنجیره‌ای بهبود می‌یابد. نتایج نشان می‌دهد که حالت ۵ حذف ستون‌ها، دارای کمترین شاخص حساسیت و بیشترین شاخص تنومندی می‌باشد، در نتیجه شرایط بهتری در خرابی پیشرونده دارد.

۸- پیشنهادات

پیشنهادات زیر برای ادامه کار پژوهشی صورت گرفته ارائه می‌شوند:

- ۱- بررسی خرابی پیشرونده قاب‌های بتن آرمه با در نظر گرفتن دیوارهای میانقاب
- ۲- بررسی خرابی پیشرونده قاب‌های بتن آرمه با حذف ستون در طبقات گوناگون (طبقات میانی، طبقه زیرین بام و ...)
- ۳- بررسی عملکرد قاب‌های بتن آرمه به همراه دیوار برشی فلزی در خرابی پیشرونده

سیاسگزاری

از حمایت‌های مالی و معنوی دانشگاه آزاد اسلامی واحد سمنان قدردانی می‌کنیم.

مراجع

- [1] Khizab, B., Sadeghi, A., Hashemi, S., Mehdizadeh, K. and Nasser, H. (2021). Investigation the performance of dual systems moment-resisting frame with steel plate shear wall subjected to blast loading. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 8, 102-127.
- [2] Karimian, A., Armaghani, A. and Behraves, A. (2019). Performance of low-yield strength plates in beam-column connections against progressive collapse. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 23, 335-345.
- [3] Kiakojoori, F., Sheidaii, M.R., De Biagi, V. and Chiaia, B. (2020). Progressive collapse assessment of steel moment-resisting frames using static- and dynamic-incremental analyses. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 34, 1-13.
- [4] Rezaie, F., Fakhradini, S. and Ghahremannejad, M. (2018). Numerical evaluation of progressive collapse potential in reinforced concrete buildings with various floor plans due to single column removal. *Civil Engineering Infrastructures Journal*, 51, 405-424.
- [5] Sahebalzaman, M.S., Sheidaii, M.R. and Salmasi, A. (2021). Effects of plastic hinges modelling of fully restrained connections in the progressive collapse resistance of steel moment frames. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 8, 327-342.
- [6] Panahi, S. and Zahrai, S.M. (2021). Performance of typical plan concrete buildings under progressive collapse. *Structures*, 31, 1163-1172.
- [7] GSA. (2013). Alternate path analysis and design guidelines for progressive collapse resistance. General Services Administration, Washington, D.C.
- [8] GSA. (2016). Alternate path analysis and design guidelines for progressive collapse resistance revision 1. General Services Administration, Washington, D.C.
- [9] UFC. 4-010-01 (2013). DoD minimum antiterrorism standards for buildings. Unified facilities criteria, Washington, D.C.
- [10] UFC. 4-023-03 (2016). Design of buildings to resist progressive collapse. Unified facilities criteria, Washington, D.C.
- [11] Yi, W.J., Yi, F. and Zhou, Y. (2021). Experimental studies on progressive collapse behavior of RC frame structures: Advances and future needs. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 15, 1-23.
- [12] Alshaikh, I.M.H., Abadel, A.A. and Alrubaidi, M. (2022). Precast RC structures' progressive collapse resistance: Current knowledge and future requirements. *Structures*, 37, 338-352.
- [13] kheyroddin, A., Sharbatdar, M.K. and Farahani, A. (2019). Effect of structural height on the location of key element in progressive collapse of RC structures. *Civil Engineering Infrastructures Journal*, 52, 41-58.
- [14] Farahani, A., Kheyroddin, A. and Sharbatdar, M.K. (2018). Finding critical element in the progressive collapse of RC structures using sensitivity analysis. *Civil Engineering Journal*, 4, 3038-3057.
- [15] Gu, X.L., Zhang, B., Wang, Y. and Wang, X.L. (2021). Experimental investigation and numerical simulation on progressive collapse resistance of RC frame structures considering beam flange effects. *Journal of Building Engineering*, 42, 102797.
- [16] Ashrafi, H.R. and Hassanzadeh, S.A. (2018). Investigation of progressive collapse in reinforced concrete frames, considering end rigid zones and various scenarios for column removal duration. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 5, 66-84.

- [17] Soleymani, A. and Esfahani, M.R. (2019). 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*, 6, 24-40.
- [18] Qiang, H., Yang, J., Feng, P. and Qin, W. (2020). Kinked rebar configurations for improving the progressive collapse behaviours of RC frames under middle column removal scenarios. *Engineering Structures*, 211, 110425.
- [19] Tao, Y. and Huang, Yuan. (2022). Numerical investigation on progressive collapse resistance of post-tensioned precast concrete beam-column assemblies under a column-loss scenario. *Engineering Structures*, 251, 113528.
- [20] Qian, K., Lan, D.Q., Li, S.K. and Fu, F. (2021). Effects of infill walls on load resistance of multi-story RC frames to mitigate progressive collapse. *Structures*, 33, 2534-2545.
- [21] Elsanadedy, H.M. and Abadel, A.A. (2022). High-fidelity FE models for assessing progressive collapse robustness of RC ordinary moment frame (OMF) buildings. *Engineering Failure Analysis*, 136, 106228.
- [22] Lin, K., Chen, Z., Li, Y. and Lu, X. (2022). Uncertainty analysis on progressive collapse of RC frame structures under dynamic column removal scenarios. *Journal of Building Engineering*, 46, 103811.
- [23] Parisi, F. and Scalvenzi, M. (2020). Progressive collapse assessment of gravity-load designed European RC buildings under multi-column loss scenarios. *Engineering Structures*, 209, 110001.
- [24] Tan, Z., Zhong, W., Tian, L., Zheng, Y., Meng, B. and Duan, S. (2021). Numerical study on collapse-resistant performance of multi-story composite frames under a column removal scenario. *Journal of Building Engineering*, 44, 102957.
- [25] Yu, J., Gan, Y.P., Wu, J. and Wu, H. (2019). Effect of concrete masonry infill walls on progressive collapse performance of reinforced concrete infilled frames. *Engineering Structures*, 191, 179-193.
- [26] Zhang, Q., Zhao, Y.G., Kolozvari, K. and Xu, L. (2020). Simplified model for assessing progressive collapse resistance of reinforced concrete frames under an interior column loss. *Engineering Structures*, 215, 110688.
- [27] Qin, W., Xi, Z., Liu, X., Feng, P., Ou, X. and Yang, J. (2022). Experimental and theoretical analyses of the progressive collapse resistance of NSM strengthening RC frames after the failure of a corner column. *Journal of Building Engineering*, 47, 103805.
- [28] Qian, K., Cheng, J.F., Weng, Y.H. and Fu, F. (2021). Effect of loading methods on progressive collapse behavior of RC beam-slab substructures under corner column removal scenario. *Journal of Building Engineering*, 44, 103258.
- [29] Prakash, M. and Satyanarayanan, K.S. (2021). Experimental study on progressive collapse of reinforced concrete frames under a corner column removal scenario. *Materials Today: Proceedings*, 40, S69-S74.
- [30] Karimiyan, S. (2020). Seismic progressive collapse evaluation in 3 story reinforced concrete buildings due to inner column removal. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 7, 206-226.
- [31] Yaghoubi, M., Aghayari, R. and Hashemi, S. (2021). Investigation of progressive collapse in reinforced concrete buildings with slab-wall structural system. *Journal of Rehabilitation in Civil Engineering*, 9, 40-60.
- [32] Havaei, G. and Bayat, E. (2017). 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*, 4, 81-100.
- [33] Qian, K., Lan, D.Q., Li, S.K. and Fu, F. (2021). Effects of infill walls on load resistance of multi-story RC frames to mitigate progressive collapse. *Structures*, 33, 2534-2545.
- [34] Feng, F.F., Hwang, H.J., Kang, S.M. and Yi, W.J. (2022). Multilinear model for progressive collapse response of reinforced concrete frames under penultimate column removal scenario. *Journal of Building Engineering*, 47, 103850.
- [35] Qian, K., Weng, Y.H., Fu, F. and Deng, X.F. (2021). Numerical evaluation of the reliability of using single-story substructures to study progressive collapse behaviour of multi-story RC frames. *Journal of Building Engineering*, 33, 101636.
- [36] Mucedero, G., Brunesi, E. and Parisi, F. (2020). Nonlinear material modelling for fibre-based progressive collapse analysis of RC framed buildings. *Engineering Failure Analysis*, 118, 104901.
- [37] Scalvenzi, M., Gargiulo, S., Freddi, F. and Parisi, F. (2022). Impact of seismic retrofitting on progressive collapse resistance of RC frame structures. *Engineering Failure Analysis*, 131, 1-19.
- [38] Elsanadedy, H.M. and Abadel, A.A. (2022). High-fidelity FE models for assessing progressive collapse robustness of RC ordinary moment frame (OMF) buildings. *Engineering Failure Analysis*, 136, 1-34.
- [39] Azim, I., Yang, J., Bhatta, S., Wang, F. and Liu, Q. (2020). Factors influencing the progressive collapse resistance of RC frame structures. *Journal of Building Engineering*, 27, 1-20.
- [40] Li, S., Shan, S., Zhai, C. and 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.
- [41] Mander, J.B., Priestley, M.J.N. and Park, R. (1988). Theoretical stress-strain model for confined concrete. *Journal of Structural Engineering*, 114, 1804-1826.

- [42] Martinez-Rueda, J.E. and Elnashai, A.S. (1997). Confined concrete model under cyclic load. *Materials and Structures*, 30, 139-147.
- [43] European Committee for Standardization. (2004a). EN 1998-1-5:2004, Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance – Part 1-5: Specific rules for concrete buildings. Belgium, Brussels: European Committee for Standardization.
- [44] European Committee for Standardization. (2004b). EN 1992-1-1:2004, Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings. Belgium, Brussels: European Committee for Standardization.
- [45] Paulay, T. and Priestley, M.J.N. (1992). Seismic design of reinforced concrete and masonry buildings. John Wiley & Sons Inc., 1-744.
- [46] Barney, G. (2003). Vertical transportation in tall buildings. *Elevator World*, 51, 66-75.
- [47] Stafford Smith, B. and Coull, A. (1991). *Tall building structures: analysis and design*. New Jersey: Wiley, 1-552.
- [48] Krawinkler, H. and Nassar, A.A. (1992). Seismic design based on ductility and cumulative damage demands and capacities. *Nonlinear seismic analysis and design of reinforced concrete buildings* (Edited by Fajfar, P. and Krawinkler, H.). London: Elsevier Applied Science, 95-104.
- [49] Gholampoor, S., Vaseghi Amiri, J., Naseri, A. and Rezayi, S. (2018). Effect of eliminating the column on progressive collapse on seismic performance in dual steel structures. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 5, 5-27.
- [50] El-Ariss, B., Elkholly, S. and Shehada, A. (2022). Benchmark numerical model for progressive collapse analysis of RC beam-column sub-assemblages. *Buildings*, 12, 122-126.
- [51] Han, Q., Liu, M., Lu, Y. and Wang, C. (2015). Progressive collapse analysis of large-span reticulated domes. *International Journal of Steel Structures*, 15, 261-269.
- [52] Ito, T., Ohi, K. and Li, Z. (2005). A sensitivity analysis related to redundancy on framed structures subjected to vertical loads. *Journal of structural and construction engineering: transactions of AIJ*, 70, 145-151.
- [53] Arjomandi, K., Estekanchi, H. and Vafai, A. (2009). Correlation between structural performance levels and damage indexes in steel frames subjected to earthquakes. *Scientia Iranica*, 16, 147-155.
- [54] Li, Y., Lu, X., Guan, H. and Ren, P. (2016). Numerical investigation of progressive collapse resistance of reinforced concrete frames subject to column removals from different stories. *Advances in Structural Engineering*, 19, 314-326.
- [55] Sasani, M., Bazan, M. and Sagioglu, S. (2007). Experimental and analytical progressive collapse evaluation of actual reinforced concrete structure. *ACI Structural Journal*, 104, 731-739.
- [56] Abdelwahed, B. (2019). A review on building progressive collapse, survey and discussion. *Case Studies in Construction Materials*, 11, e00264.
- [57] Li, Y., Lu, X., Guan, H. and Ye, L. (2011). An improved tie force method for progressive collapse resistance design of reinforced concrete frame structures. *Engineering Structures*, 33, 2931-2942.
- [58] Brunesi, E. and Nascimbene, R. (2014). Extreme response of reinforced concrete buildings through fiber force-based finite element analysis. *Engineering Structures*, 69, 206-215.
- [59] Fascetti, A., Kunnath, S.K. and Nisticò, N. (2015). Robustness evaluation of RC frame buildings to progressive collapse. *Engineering Structures*, 86, 242-249.
- [60] Brunesi, E. and Parisi, F. (2017). Progressive collapse fragility models of European reinforced concrete framed buildings based on pushdown analysis. *Engineering Structures*, 152, 579-596.
- [61] Parisi, F., Scalvenzi, M. and Brunesi, E. (2019). Performance limit states for progressive collapse analysis of reinforced concrete framed buildings. *Structural Concrete*, 20, 68-84.