Archive of SID

مجله علمی – پژوهشی
مهندسی عمران مدرس
دوره نوزدهم، شماره ۳، سال ۱۳۹۸

بررسی اثر سیستم سازه‌ای بر پتانسیل وقوع خرابی پیش‌رونده ناشی از حذف ستون‌ها در ساختمان‌های بتن مسلح

صادق گریوانی[۱*]، سید سعید عسکریانی[۲]

۱- استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، گروه عمران، دانشگاه بجنورد
۲- دستیار پژوهشی، کارشناس ارشد مهندسی عمران- سازه، دانشکده فنی و مهندسی، گروه عمران، دانشگاه بجنورد

***garivani@ub.ac.ir**

تاریخ دریافت: [۹۷/۳/۱۵] تاریخ پذیرش: [۹۷/۱۲/۲۲]

چکیده

خرابی پیش‌رونده پدیده‌ای خاص در سازه‌ها است که در آن کل سازه و یا بخشی از آن به علت بروز آسیب یا گسیختگی موضعی در قسمت محدودی از سازه خراب می‌شود. در این پدیده، خرابی بیشتر به علت یک حادثه مانند انفجار در سازه شروع شده و سپس به دلایلی مانند عدم بازتوزیع مناسب نیروها بین سایر اعضای سازه‌ای به دیگر بخش‌های سازه نیز پیش‌روی می‌نماید. در سال‌های اخیر مطالعه روی این پدیده به طور روزافزون مورد توجه قرار گرفته و پژوهش‌های زیادی از جنبه‌های مختلف روی این موضوع انجام شده است. یکی از حوزه‌های مورد مطالعه در این زمینه، بررسی اثر سیستم سازه‌ای بر پتانسیل وقوع خرابی پیش‌رونده در ساختمان‌ها است. یکی از متداول‌ترین انواع سازه‌های ساختمانی، ساختمان‌های بتن مسلح است، که در کشور ما نیز به صورت گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این ساختمان‌ها انواع مختلفی از سیستم‌های سازه‌ای مانند "قاب‌های خمشی بتنی"، "سیستم‌های دوگانه قاب خمشی بتنی همراه با دیوارهای برشی بتنی" و غیره به کار برده می‌شود. انتخاب یک سیستم سازه‌ای مناسب و نیز اقتصادی برای داشتن ایمنی بیشتر در مقابل پدیده خرابی پیش‌رونده مستلزم داشتن دانش کافی از رفتار این سیستم-ها در برابر این پدیده خواهد بود. مساله‌ای که این مقاله به دنبال آن است، رسیدن به درک مناسب از رفتار انواع سیستم‌های سازه‌ای ساختمان‌های بتن مسلح در برابر پدیده خرابی پیش‌رونده و مقایسه این سیستم‌ها با یکدیگر است. در این راستا پس از مرور ادبیات فنی در حوزه خرابی پیش‌رونده و بررسی ضوابط آیین‌نامه‌های موجود در این خصوص، مدل‌سازی‌های عددی لازم برای انجام مطالعات مورد نظر انجام پذیرفته است. مدل‌های عددی شامل قاب‌های ۳، ۷ و ۱۰ طبقه بتنی در سه حالت "قاب خمشی متوسط بتنی"، "قاب خمشی ویژه بتنی" و "قاب خمشی متوسط بتنی همراه با دیوار برشی متوسط بتنی" بوده است. بارگذاری و طراحی این قاب‌ها نیز در دو حالت با و بدون در نظر گرفتن ضوابط مربوط به کنترل خرابی پیش‌رونده انجام پذیرفته است. در حالت طراحی سازه‌ها با هدف پیش‌گیری از وقوع خرابی پیش‌رونده از ضوابط آیین‌نامه UFC-4-023-03 استفاده شده و این سازه‌ها تحت حالات مختلف حذف ستون مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. در نهایت ضوابط مربوط به تحلیل‌های خطی و غیرخطی این آیین‌نامه نیز با یکدیگر مقایسه شده است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که "قاب‌های خمشی بتنی متوسط" نسبت به سایر سیستم‌های سازه‌ای بتنی مورد بررسی در این مقاله، از نظر اقتصادی و نیز تحمل بارهای ناشی از حذف ستون رفتار بهتری از خود بروز می‌دهند. همچنین در سازه‌های مورد بررسی مشخص شده است که در آیین‌نامه UFC-4-023-03، ضوابط مربوط به تحلیل‌های غیرخطی حاشیه امنیت بالاتری را نسبت به تحلیل-های خطی در نظر می‌گیرند.

واژگان کلیدی: خرابی پیش‌رونده، سازه‌های بتن مسلح، سیستم باربر جانبی، حذف ستون در سازه.

www.SID.ir

Archive of SID

۱- مقدمه

خرابی پیش‌رونده پدیده‌ای است که با بروز خرابی در یک عضو سازه‌ای شروع شده و در ادامه آن با شکست اعضای مجاور عضو آسیب دیده، خرابی به سایر بخش‌های سازه گسترش پیدا می‌کند. عوامل مختلفی می‌توانند باعث وقوع چنین پدیده‌ای در سازه‌ها شوند که از جمله مهم‌ترین این عوامل می‌توان به وقوع انفجار در داخل و یا اطراف ساختمان اشاره داشت. از منظر تحلیل سازه‌ای، خرابی پیش‌رونده زمانی اتفاق می‌افتد که الگوی باربری یا شرایط مرزی سازه به گونه‌ای تغییر یابد که در اثر حذف یک یا چند المان باربر، بازتوزیع بارها منجر به خرابی دیگر اعضای سازه شود. عوامل بوجود آورنده خرابی پیش‌رونده را می‌توان به دو دسته "خطاهای طراحی و ساخت" و "بارهای غیر عادی" تقسیم کرد و در مقابل، "شکل‌پذیری"، "نامعینی" و "پیوستگی سازه" را می‌توان به عنوان مهم‌ترین عوامل موثر در کاهش اثرات خرابی پیش‌رونده نام برد که هر سه مورد رابطه مستقیم با سیستم سازه‌ای ساختمان دارند. از این رو با بررسی رفتار انواع سیستم‌های سازه‌ای در مواجهه با پدیده خرابی پیش‌رونده می‌توان به درک درستی از رفتار این سیستم‌ها در مقابل پدیده مذکور دست یافت. یکی از متداول‌ترین انواع سازه‌های ساختمانی، ساختمان‌های بتن مسلح است که در ایران نیز به صورت گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این ساختمان‌ها انواع مختلفی از سیستم‌های سازه‌ای مانند قاب‌های خمشی بتنی، سیستم های دوگانه قاب خمشی بتنی همراه با دیوارهای برشی بتنی و غیره به کار برده می‌شود. انتخاب یک سیستم مناسب برای داشتن ایمنی بیشتر در مقابل پدیده خرابی پیش‌رونده مستلزم داشتن دانش کافی از رفتار این سیستم‌ها در برابر این پدیده است.

مطالعات روی بررسی پدیده خرابی پیش‌رونده سالهاست به صورت گسترده در دنیا مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. برین[1] مطالعاتی در مورد جزئیات مربوط به طراحی ساختمان‌های بتنی پیش‌ساخته در برابر خرابی پیش‌رونده انجام داد [1]. از آنجا که ناحیه اتصالات در ساختمان‌های بتنی پیش‌ساخته بحرانی‌ترین نقطه تحت بارهای غیرعادی هستند، پوپوف[2] نقاط ضعیف اتصالات را مورد نظر قرار داد و روش‌هایی را برای بهبود و جلوگیری از خرابی ارائه داد [2]. تیلور[3] بر نامعینی در سازه برای کاهش خطر خرابی تأکید کرد. ایشان بر نقش شکل‌پذیری، مقاومت موضعی خاص و روش مسیر جایگزین برای مقاومت در برابر خرابی تأکید کردند [3]. به علت مشکلات مربوط به محاسبه بارهای غیرعادی، ضرایب بار بارهای غیرعادی توسط روش‌های احتمالاتی تعیین می‌شود. الینگوود[4] و همکاران و نیز الینگوود و دوسنبری[5] روش‌های احتمالاتی را برای تعیین بارهای غیرعادی برای طراحی سازه ارائه دادند [4, 5]. هلمی[6] و همکاران نیز با استفاده از روش مسیر جایگزین، ارائه شده در آیین‌نامه UFC، خرابی پیش‌رونده در سازه‌های ۱۰ طبقه بتن مسلح طراحی شده بر اساس آیین‌نامه‌ی ACI را مورد بررسی قرار دادند. دو سناریوی حذف دیوار و ستون در این سازه‌ها در نظر گرفته شده است. بر اساس نتایج ارائه شده، سازه‌های طراحی شده بر مبنای آیین‌نامه ACI، پتانسیل زیادی برای وقوع خرابی پیش‌رونده پس از حذف ستون گوشه و دیوار برشی کناری را دارند [6]. لی[7] و ژو[8] به تحلیل احتمالاتی قاب‌های بتن مسلح تحت اثر پدیده‌ی خرابی پیش‌رونده پرداختند [7]. سو[9] و همکاران در پژوهشی پدیده خرابی پیش‌رونده درقاب‌های بتن مسلح تحت اثر بارهای انفجاری را مورد مطالعه عددی قرار دادند. بر اساس نتایج بدست آمده، مقاومت در مقابل این پدیده با افزایش مقاومت بتن و نسبت آرماتورهای طولی افزایش می‌یابد [8]. به منظور انجام یک مدل‌سازی دقیق خرابی پیش‌رونده، نخست نیاز به شناسایی اعضای آسیب‌دیده و چگونگی انتشار آسیب است. به این منظور ونگ[10] و همکاران نیزمجموعه‌ای از معیارهای ارزیابی خسارت در پدیده‌ی خرابی پیش‌رونده

1 Breen

2 Popoff
3 Taylor
4 Ellingwood
5 Dusenberry
6 Helmy
7 Le
8 Xue
9 Su
10 Weng

www.SID.ir

Archive of SID

قاب‌های بتن مسلح را ارائه دادند [9]. یو[11] و تان[12] نیز در پژوهشی به بررسی آزمایشگاهی رفتار سازه‌ای قاب‌های بتن مسلح تحت اثر پدیده‌ی خرابی پیش‌رونده پرداختند [10].

هدف از این مقاله، رسیدن به درک مناسب از رفتار انواع متداول سیستم‌های سازه‌ای ساختمان‌های بتن مسلح در برابر پدیده خرابی پیش‌رونده و مقایسه این سیستم‌ها با یکدیگر است. افزون بر این، در نهایت سیستمی که پتانسیل بروز بهترین رفتار برای کنترل خرابی پیش‌رونده در ساختمان‌های بتن مسلح را دارد معرفی می‌شود. به این منظور، سه دسته ساختمان بتن مسلح با تعداد طبقات ۳، ۷ و ۱۰ طبقه هر کدام با سه نوع سیستم سازه‌ای مورد بررسی قرار گرفته‌اند. نخست رفتار سازه‌های طراحی شده بر اساس ضوابط مقررات ملی ساختمان [11, 12] و استاندارد ۲۸۰۰ [13]، با هدف بررسی رفتار سازه‌های طراحی نشده برای خرابی پیش‌رونده، مورد بررسی قرار گرفته و سپس رفتار سازه‌های طراحی شده برای عدم وقوع خرابی پیش‌رونده ارزیابی شده است. در ادامه معرفی سازه‌های مورد بررسی، چگونگی انجام تحلیل‌های مورد نیاز و در نهایت نتایج بدست آمده ارائه می‌شود.

۲- معرفی ساختمان‌های مورد بررسی

در این مقاله سه دسته ساختمان ۳، ۷ و ۱۰ طبقه با ارتفاع طبقات ۳/۲ متر هر یک با سه سیستم "قاب خمشی متوسط بتنی"، "قاب خمشی ویژه بتنی" و "قاب خمشی متوسط بتنی همراه با دیوار برشی متوسط بتنی" مورد بررسی قرار گرفته‌اند. ساختمان‌ها با کاربری اداری، واقع در شهر تهران و روی خاک نوع ۲ فرض شده‌اند. برای بررسی رفتار سازه‌های مورد بررسی از نرم‌افزار ETABS 2016 استفاده شده است. پلان سازه‌های مورد بررسی در شکل (۱) نشان داده شده است. در این شکل موقعیت دیوارهای برشی بتنی در قاب‌های شامل دیوار نیز نمایش داده شده است. در جدول (۱) مقادیر انواع بارهای ثقلی در نظر گرفته شده در مدل‌های سازه‌ای به طور خلاصه آورده شده است.

شکل ۱. پلان سازه‌های مورد بررسی

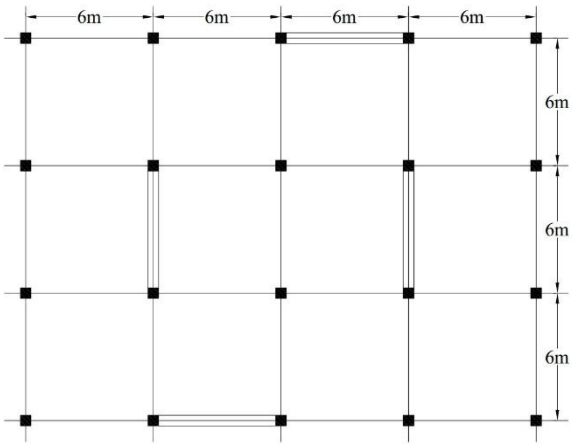


Fig. 1. Studied structures plan

جدول ۱. مقادیر انواع بارهای ثقلی

Load Pattern	Value (kg/m^2)
Dead Load	530
Partition Load	150
Live Load	200
Roof Live Load	150
Snow Load	150
Perimeter Wall Load	240
Parapet Wall Load	345

Table 1. Gravity load values

۳- بررسی رفتار سازه‌های طراحی شده با استاندارد ۲۸۰۰ (طراحی نشده برای کنترل خرابی پیش‌رونده)

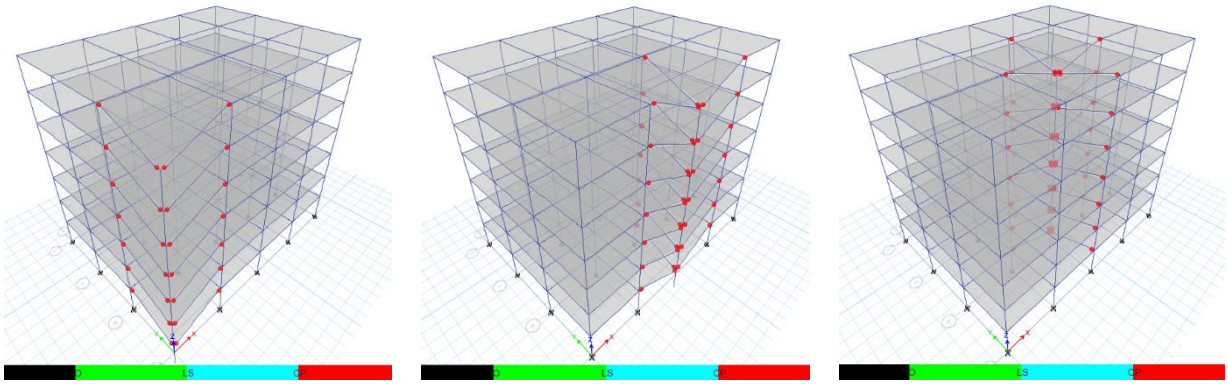
سازه‌های طراحی شده به این روش نمونه‌ای از سازه‌های طراحی شده موجود بدون در نظر گرفتن ضوابط آیین‌نامه‌ای مربوط به طراحی سازه‌ها برای جلوگیری از وقوع خرابی پیش-رونده هستند. تحلیل و طراحی سازه‌ها بر اساس مباحث مقررات ملی ساختمان [11, 12] صورت پذیرفته است. بارگذاری زلزله نیز براساس استاندارد ۲۸۰۰ [13] محاسبه شده است. به منظور تحلیل لرزه‌ای سازه‌ها از روش تحلیل دینامیکی طیفی استفاده شده است. رفتار این سازه‌ها پس از تعیین ابعاد تیرها و ستون‌ها و مقادیر میلگردهای مورد نیاز در این اعضاء تحت سناریوهای مختلف حذف ستون مورد بررسی قرار گرفته است.

11 Yu
12 Tan

www.SID.ir

Archive of SID

شکل ۲. چگونگی تشکیل مفاصل خمیری در قاب خمشی متوسط هفت طبقه تحت سناریوهای مختلف حذف ستون



(a) corner column removal removal (b) side column removal (c) middle column removal

Fig. 2. Plastic hinges developed in 7-story intermediate moment frame under various column removal scenarios

سه سناریوی حذف ستون در این سازه‌ها در نظر گرفته شده است که در هر سناریو یکی از ستون‌های گوشه، کناری و میانی از طبقه‌ی همکف سازه حذف شده و مقاومت اعضای سازه پس از وقوع چنین پدیده‌ای مورد بررسی قرار گرفته است. روش تحلیل برای در نظر گرفتن رفتار سازه پس از حذف ستون نیز استاتیکی غیرخطی بوده که در آن بارهای ثقلی بدون ضریب به تدریج افزایش داده شده است. مفاصل خمیری اعضا نیز بر اساس ضوابط آیین‌نامه UFC-4-023-03 [14] تعیین شده و به اعضای سازه اختصاص داده شده است. در شکل (۲) به عنوان نمونه چگونگی تشکیل مفاصل خمیری تحت سناریوهای مختلف حذف ستون در اعضای سازه در سازه‌های هفت طبقه قاب خمشی متوسط، نشان داده شده است. لازم به ذکر است با توجه تشابه نتایج به دست آمده در سایر سازه‌ها و نیز به جهت اختصار در کلام از ارائه شکل‌های مربوط به سایر سازه‌ها پرهیز شده است.

نتایج بررسی‌های انجام شده در این بخش نشان می‌دهد که در کلیه سازه‌های مورد بررسی هیچ یک از تیرهای مجاور ستون حذف شده توانایی تحمل بارهای وارده و انتقال آن به ستون‌های مجاور، بدون وقوع خرابی را نداشته و پیش از رسیدن مقدار بار به ۱۰۰ درصد مقدار تعریف شده، تغییر شکل این اعضا از معیارهای پذیرش تعریف شده فراتر رفته است. البته درصد پیشرفت تحلیل پیش از وقوع خرابی در قاب‌های مورد بررسی متفاوت بوده به طوری که به ترتیب قاب خمشی متوسط، قاب خمشی ویژه و قاب خمشی متوسط با دیوار برشی متوسط رفتار بهتری از خود در برابر این پدیده نشان داده‌اند. به عبارت دیگر قاب‌های خمشی متوسط در مقایسه با دو سیستم دیگر پتانسیل بیشتری برای مقاومت در برابر خرابی پیش‌رونده را دارا هستند، هر چند که در نهایت توان تحمل ۱۰۰ درصد بارهای وارد شده را نخواهند داشت. لازم به ذکر است افزایش ارتفاع در سازه‌ها نیز تغییر معناداری در نتایج ایجاد نکرده است. این نتایج لزوم طراحی سازه‌ها بر اساس ضوابط آیین‌نامه‌های ویژه برای جلوگیری از خرابی پیش‌رونده را متذکر می‌شود.

٤- بررسی رفتار سازه‌های طراحی شده با آیین‌نامه UFC-4-023-03 به منظور کنترل خرابی پیش‌رونده در سازه‌ها

پس از بررسی رفتار قاب‌های طراحی شده بر اساس ضوابط مباحث مقررات ملی ساختمان [11, 12] و استاندارد ۲۸۰۰ [13] تحت سناریوهای مختلف حذف ستون که با هدف بررسی رفتار سازه‌های طراحی نشده برای خرابی پیش‌رونده انجام پذیرفت. در این بخش به بررسی رفتار قاب‌های طراحی شده برای عدم وقوع خرابی پیش‌رونده پرداخته می‌شود. برای طراحی قاب‌های ۳، ۷ و ۱۰ طبقه مورد بررسی در این حالت از ضوابط تحلیل خطی آیین‌نامه UFC-4-023-03 [14] و روش مسیر جایگزین استفاده شده است. در این روش، سازه می‌باید تحت سناریوهای مختلف حذف ستون تحلیل شده و نیروهای وارد بر اعضای سازه تعیین شد.

www.SID.ir

Archive of SID

مطابق ضوابط این بخش از آیین‌نامه UFC-4-023-03 [14]، در اعمال بارهای ضریب‌دار در چشمه‌های مجاور ستون‌های حذف شده، می‌باید ضرایب بار متفاوتی به بارهای ثقلی اعمال نمود. در شکل (۳) نواحی تحت تاثیر ستون حذف شده و نوع بار ثقلی که می‌باید به این چشمه‌ها اعمال نمود آورده شده است. تعریف ترکیب بارهای ثقلی نشان داده شده در این شکل نیز در جدول (۲) آورده شده است که D، L و S در این جدول به ترتیب معرف بارهای مرده، زنده و برف بوده و m_{LIF} نیز کمینه مقدار ضریب m در اعضای مستقیما وصل شده به ستون فوقانی ستون حذف شده است. لازم به ذکر است ضریب m، ضریبی است که می‌باید بیشینه نسبت نیرو به مقاومت هر عضو به آن محدود شود و مقدار آن نیز برای هر عضو از جداول ارائه شده در آیین‌نامه UFC-4-023-03 [14] بدست آمده است. در هر یک از سناریوهای در نظر گرفته شده برای طراحی سازه‌های این بخش، مطابق ضوابطی که بیان شد، چشمه‌های سقف مطابق ضرایب ذکر شده بارگذاری شده است.

شکل ۳. نوع و محل اعمال بارهای ثقلی بسته به ستون حذف شده در سازه [14]

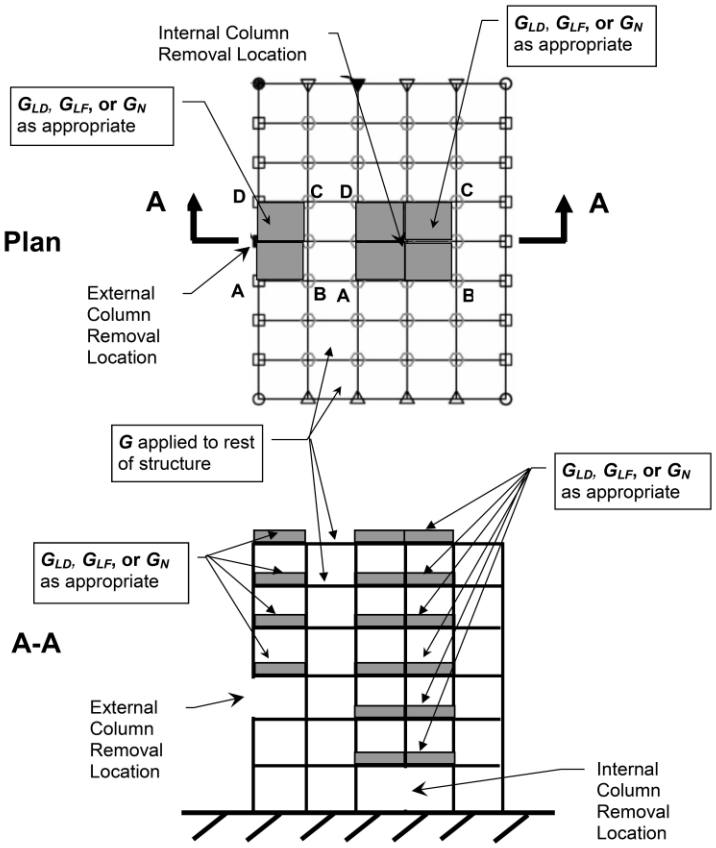


Fig. 3. Loads and Load Locations for Column Removal [14]

جدول ۲. ترکیب بارهای ثقلی مورد نیاز در تحلیل خطی و روش مسیر جایگزین

Load combination ID	Description	Load combination	Load increase factor
G	Gravity loads	$G = 1.2D+(0.5L \text{ or } 0.2S)$	---
G_{LD}	Increased gravity loads for deformation-controlled actions for Linear Static Analysis	$G_{LD} = \Omega_{LD}[1.2D+(0.5L \text{ or } 0.2S)]$	$\Omega_{LD}=1.2m_{LIF}+0.80$
G_{LF}	Increased gravity loads for force-controlled actions for Linear Static analysis	$G_{LF} = \Omega_{LF}[1.2D+(0.5L \text{ or } 0.2S)]$	$\Omega_{LF}=2$

Table 2. Gravity load combinations required for linear analysis and alternate path method

www.SID.ir

Archive of SID

در تمامی سازه‌های مورد بررسی، ابتدا سازه با فرض حذف یکی از ستون‌ها در طبقه همکف طراحی شده و هندسه‌ی اعضای بتنی به همراه مقادیر میلگردهای مورد نیاز آن‌ها تعیین شده است. به دلیل تقارن در پلان قاب‌های مورد مطالعه، تعداد ٦ ستون نشان داده شده در شکل (٤) به نوبت در طبقه‌ی همکف از سازه حذف شده و طراحی با فرض عدم وجود یکی از این ستون‌ها انجام شده است. در انتها نیز حداکثر ابعاد و میلگردهای بدست آمده برای اعضای سازه‌ای در تمام حالات به عنوان هندسه و میلگردگذاری نهایی هر عضو تعیین شده است. در ادامه، از این سازه به عنوان سازه طراحی شده بر اساس ضوابط آیین‌نامه UFC-4-023-03 [14] نام برده شده است.

در ادامه، هندسه‌ی اعضای سازه‌های طراحی شده بر اساس ضوابط آیین‌نامه UFC-4-023-03 [14] بدون تغییر در نظر گرفته شده و این سازه‌های بتنی برای سه حالت مختلف سیستم باربر جانبی مورد بررسی در این پژوهش مجددا بارگذاری ثقلی و لرزه‌ای شده (بر اساس ضوابط مقررات ملی ساختمان [11, 12] و استاندارد ۲۸۰۰ [13]) و مقادیر میلگردهای مورد نیاز در اعضای آن‌ها بدست آمده است. تیرهای موجود در سازه‌ها به سه دسته تیرهای گوشه، کناری و میانی دسته‌بندی شده و برای هر دسته، مقادیر میلگردهای مورد نیاز بدست آمده است.

شکل ٤. ستون‌های حذف شده در طراحی برای جلوگیری از وقوع خرابی پیش‌رونده

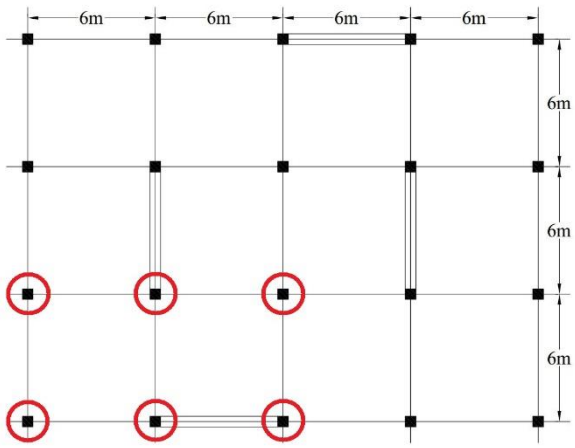
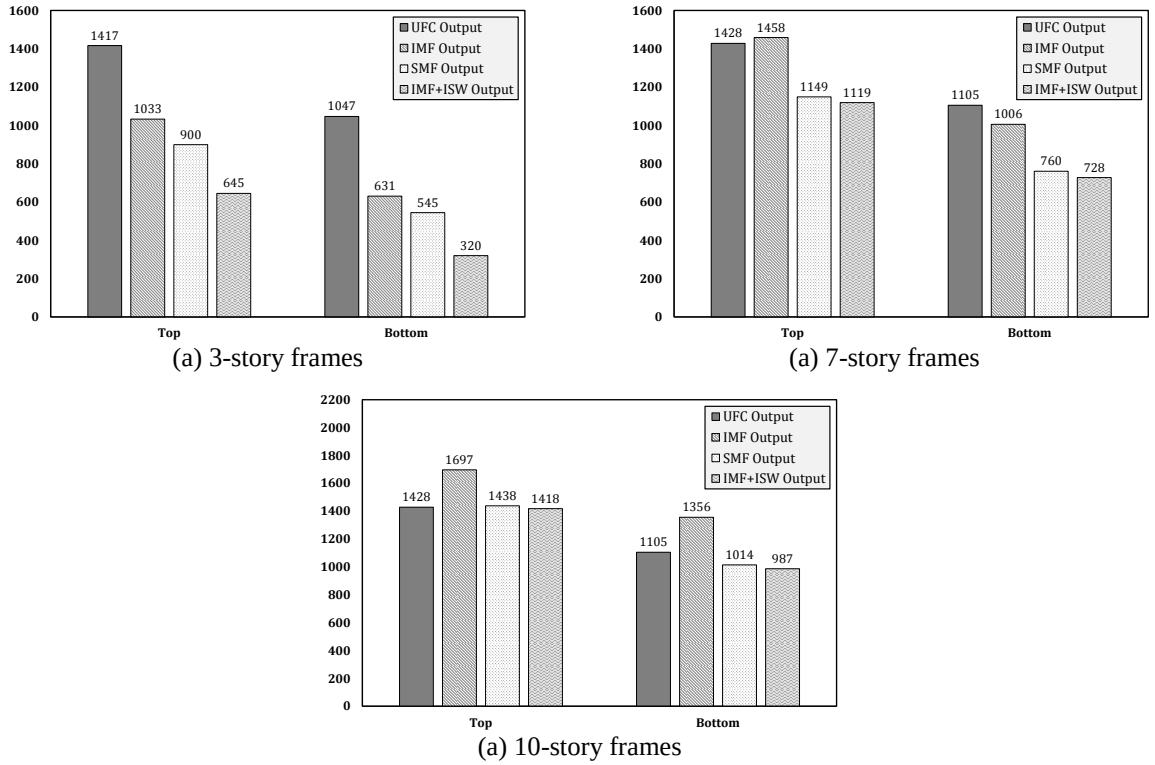


Fig. 4. Removed columns considered for progressive collapse design

شکل ٥. مساحت مورد نیاز میلگردهای طرفین تیرهای گوشه (mm^2)



(a) 3-story frames

(a) 7-story frames

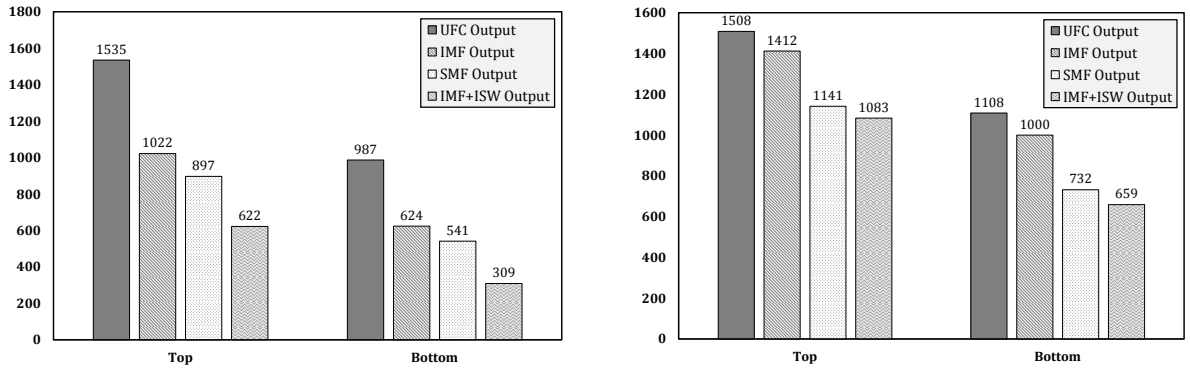
(a) 10-story frames

Fig. 5. Required rebar area in two ends of corner beams (mm^2)

www.SID.ir

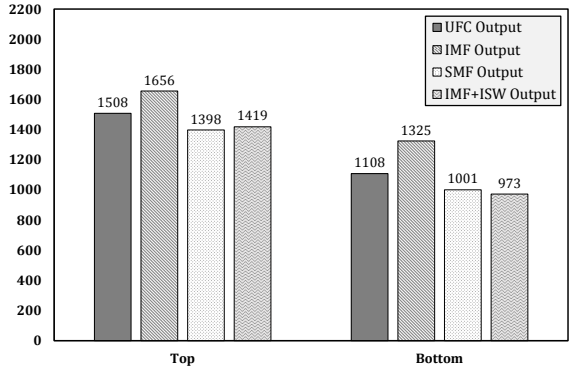
Archive of SID

شکل ٦. مساحت مورد نیاز میلگردهای طرفین تیرهای کناری ($\mathbf{mm^2}$)



(a) 3-story frames

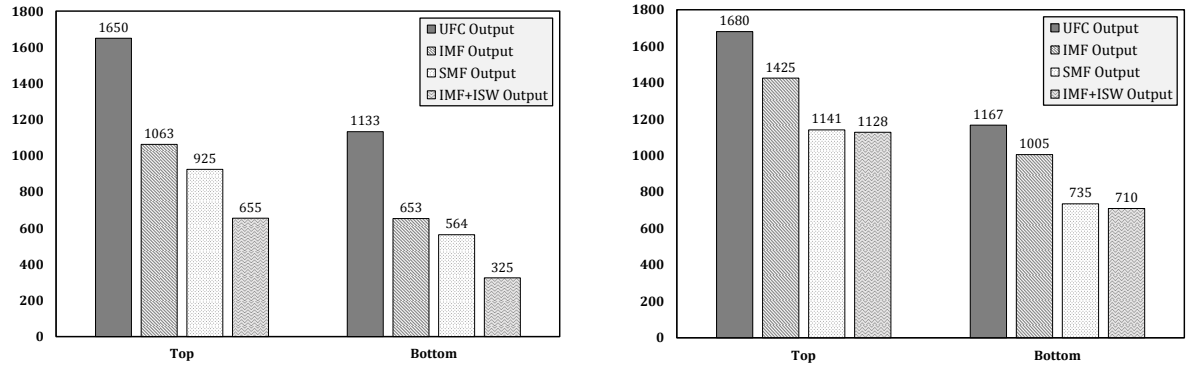
(a) 7-story frames



(a) 10-story frames

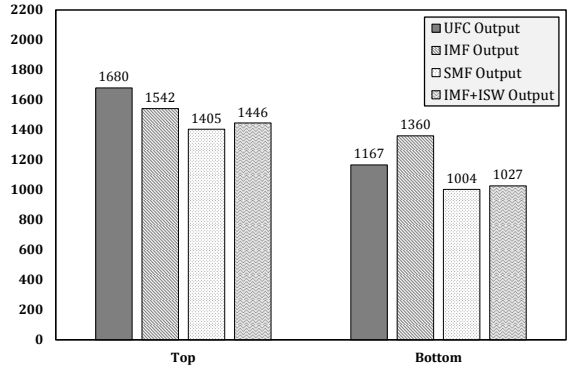
Fig. 6. Required rebar area in two ends of side beams (mm^2)

شکل ۷. مساحت مورد نیاز میلگردهای طرفین تیرهای میانی ($\mathbf{mm^2}$)



(a) 3-story frames

(a) 7-story frames



(a) 10-story frames

Fig. 7. Required rebar area in two ends of middle beams (mm^2)

www.SID.ir

Archive of SID

در ادامه به مقایسه مقادیر میلگرد مورد نیاز در تیرهای این قاب‌ها در ٤ حالت زیر پرداخته شده است.

- میلگرد مورد نیاز در سازه طراحی شده بر اساس ضوابط آیین‌نامه UFC-4-023-03 [14]
- میلگرد مورد نیاز در صورت داشتن سیستم قاب خمشی بتنی متوسط
- میلگرد مورد نیاز در صورت داشتن سیستم قاب خمشی بتنی ویژه
- میلگرد مورد نیاز در صورت داشتن سیستم قاب خمشی متوسط بتنی با دیوار برشی بتنی متوسط

در شکل‌های (۵ تا ۷)، مقایسه‌ی میانگین مساحت مورد نیاز میلگردها در تیرهای گوشه، کناری و میانی برای ٤ حالت مذکور آورده شده است.

همان‌طور که در شکل‌های (۵ تا ۷) ملاحظه می‌شود با تغییر سیستم سازه‌ای با توجه به تغییر در ضریب رفتار و دیگر پارامترهای لرزه‌ای، مقادیر میلگرد مورد نیاز در تیرها نیز تغییر می‌نماید. از طرف دیگر، دیده می‌شود که تیرهای طراحی شده بر اساس ضوابط آیین‌نامه UFC-4-023-03 [14] برای جلوگیری از وقوع خرابی پیش‌رونده، در قاب‌های ۳ و ۷ طبقه و در هر سه سیستم سازه‌ای مورد بررسی، جوابگوی بارهای ناشی از زلزله نیز خواهند بود. ضمنا مشاهده می‌شود که در صورت استفاده از سیستم "قاب خمشی متوسط"، اختلاف کمتری بین نتایج طراحی خرابی پیش‌رونده و طراحی لرزه‌ای وجود خواهد داشت. با افزایش ارتفاع سازه، این اختلاف بین نتایج طراحی خرابی پیش‌رونده و طرح لرزه‌ای، رفته رفته کاهش یافته تا جایی که در سازه ۱۰ طبقه مورد بررسی و در سیستم "قاب خمشی متوسط"، میلگردهای مورد نیاز طرح لرزه‌ای بیش از میلگردهای مورد نیاز برای طراحی خرابی پیش‌رونده بدست آمده است.

به منظور بررسی اثر افزایش ارتفاع سازه، نسبت مقادیر میلگرد مورد نیاز تیرها در طراحی برای خرابی پیش‌رونده به همین مقادیر در طراحی لرزه‌ای در هر سه تیپ میلگردهای گوشه، کناری و میانی و در هر دو سفره فوقانی و تحتانی به دست آمده است. در ادامه میانگین کل میلگردها در هر سه تیپ تیر و در هر دو سفره فوقانی و تحتانی محاسبه شده و در شکل (۸) نشان داده شده است.

براساس نتایج نشان داده شده در شکل (۸)، میانگین کل سیستم‌ها در قاب‌های ده طبقه برای نسبت مساحت میلگرد مورد نیاز تیرها در طراحی برای خرابی پیش‌رونده به طراحی لرزه‌ای عدد ۱/۰۳ بدست آمده است که در مقایسه با عدد ۲/۰۸ برای قاب‌های سه طبقه و ۱/۳٤ برای قاب‌های هفت طبقه مقدار کمتری می‌باشد. این بدین معنی است که با افزایش ارتفاع سازه، تفاوت بین میلگردهای مورد نیاز برای تحمل بارهای لرزه‌ای و میلگردهای مورد نیاز برای جلوگیری از خرابی پیش‌رونده رفته رفته کاهش خواهد داشت.

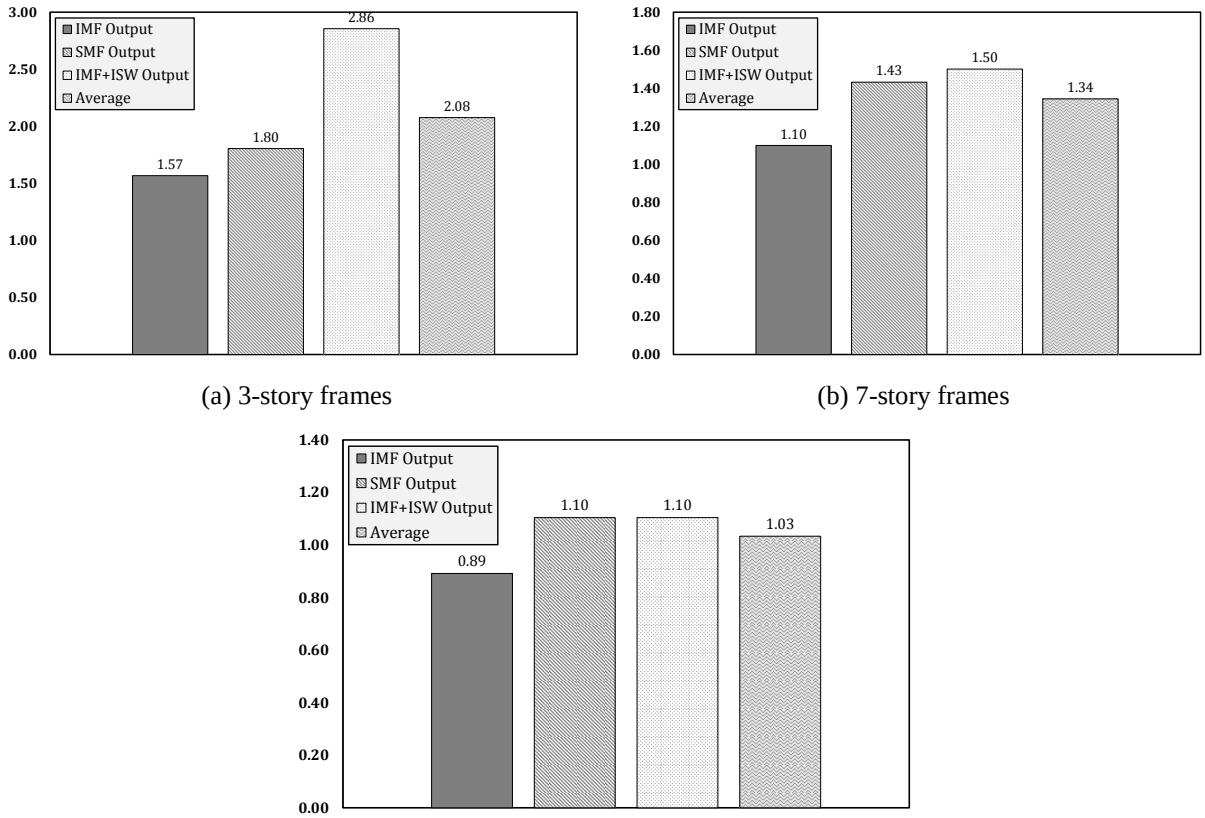
۵- بررسی رفتار غیرخطی سازه‌های طراحی شده با آیین‌نامه UFC-4-023-03

با هدف مقایسه‌ی نتایج حاصل از روش‌های تحلیل خطی و غیرخطی آیین‌نامه UFC-4-023-03 [14]، رفتار قاب‌های طراحی شده بر اساس نتایج تحلیل خطی مجددا با استفاده از ضوابط تحلیل غیرخطی این آیین‌نامه مورد بررسی قرار گرفته است. برای این کار قاب‌های طراحی شده، تحت سناریوهای مختلف حذف ستون (ستون‌های گوشه، کناری و میانی) به صورت غیرخطی تحلیل شده و کفایت اعضای سازه‌ای برای انتقال بارهای ثقلی ضریب‌دار مورد بررسی قرار گرفته است. در شکل‌های (۹ تا ۱۱) به ترتیب وضعیت تشکیل مفاصل در قاب‌های ۳، ۷ و ۱۰ طبقه طراحی شده با ضوابط آیین‌نامهUFC-4-023-03 [14] نمایش داده شده است. لازم به ذکر است مفاصل خمیری اعضا طوری تعریف شده‌اند که عبور از سطح CP بیان‌گر عبور از معیارهای پذیرش تعریف شده در آیین‌نامه مذکور خواهد بود. تصاویر ارائه شده در شکل (۹) متناظر با گام بارگذاری قبل از وقوع اولین خرابی در تیرها است.

www.SID.ir

Archive of SID

شکل ۸. میانگین کل نسبت مساحت میلگرد مورد نیاز تیرها در طراحی برای خرابی پیش‌رونده به طراحی لرزه‌ای



(a) 3-story frames

(b) 7-story frames

(c) 10-story frames

Fig. 8. Ratio of beams rebar area in the progressive collapse design to seismic design (Total average)

نکته جالب توجه در خصوص نتایج قاب‌های سه طبقه این است که با وجود طراحی سازه برای تحمل بارهای وارد بر اعضاء پس از حذف ستون‌ها (مبتنی بر نتایج تحلیل‌های خطی)، در تحلیل غیرخطی، اعضاء توان تحمل ۱۰۰ درصد بارهای وارد را نداشته و برای حالات حذف ستون‌های گوشه، کناری و میانی، تیرهای مجاور ستون حذف شده به ترتیب توان تحمل ۹۱، ۸۹ و ۸۰ درصد بارهای وارد شده را قبل از وقوع خرابی داشته‌اند. در قاب‌های هفت طبقه برخلاف قاب-های سه طبقه، اعضا توان تحمل ۱۰۰ درصد بارهای وارده را قبل از وقوع خرابی داشته‌اند. البته ذکر این نکته نیز ضروری است که مقدار دوران تیرهای متصل به ستون‌های میانی حذف شده قدری بیشتر از دوران نهایی تیرهای متصل به ستون‌های گوشه و کناری حذف شده بدست آمده است. در قاب‌های ده طبقه نیز مانند قاب‌های سه طبقه، اعضاء توان تحمل ۱۰۰ درصد بارهای وارد شده را نداشته و برای حالات حذف ستون‌های گوشه، کناری و میانی، تیرهای مجاور ستون حذف شده به ترتیب تا ۸٤، ۸۲ و ۸۳ درصد بارهای وارد شده را قبل از وقوع خرابی تحمل نموده‌اند. بنابراین به طور کلی می‌توان گفت نتایج بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد که روش تحلیل غیرخطی آیین‌نامه UFC-4-023-03 [14] تا حدودی ضوابط محافظه کارانه‌تری نسبت به روش‌های خطی پیشنهاد می‌دهد به طوری که سازه طراحی شده بر اساس روش تحیلی خطی این آیین‌نامه لزوما معیارهای پذیرش مربوطه به روش تحلیل غیرخطی همین آیین‌نامه را برآورده نکرده است.

٦- پیشنهاداتی برای طراحی سازه‌های مقاوم در برابر خرابی پیش‌رونده

در خصوص ضوابط آیین‌نامه‌ای برای کنترل پدیده خرابی پیش‌رونده در سازه‌ها، استفاده از ضوابط موجود در آیین‌نامه UFC-4-023-03 [14] پیشنهاد می‌شود. علت پیشنهاد این آیین‌نامه در مقایسه با سایر موارد، وجود توضیحات کامل-

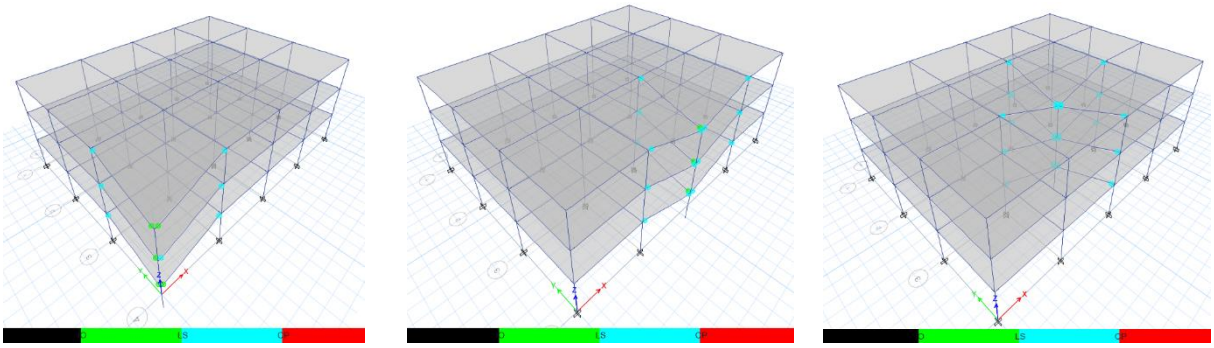
www.SID.ir

Archive of SID

تر، شکل‌ها و نمودارهای مناسب‌تر، ارائه ضوابط به صورت تفکیکی برای انواع سازه‌ها و در نهایت نیز ارائه نمونه‌های عددی برای توضیح بیشتر ضوابط ارائه شده است.

در خصوص روند طراحی اعضای سازه‌ای برای جلوگیری از وقوع خرابی پیش‌رونده در سازه‌های بتن مسلح، پیشنهاد می‌شود نخست بر اساس پلان ستون‌گذاری موجود، موقعیت ستون‌هایی که می‌باید به نوبت حذف شوند تعیین شود. سپس بسته به موقعیت قرارگیری (گوشه‌ها، کناره‌ها و بخش‌های میانی)، اعضای سازه‌ای موجود در پلان و ارتفاع تیپ‌بندی شوند. سپس در فایل‌های مدل‌سازی مختلف، ستون-های انتخاب شده برای حذف شدن به نوبت حذف می‌شوند. به عبارت دیگر تبعات حذف هر ستون در یک مدل مجزا بررسی می‌شود. در هر یک از مدل‌ها با حذف ستون مورد نظر، ابعاد هندسی و مقدار میلگردهای مورد نیاز در هر تیپ از اعضای سازه‌ای تعیین می‌شود. به ازای هر مدل مقادیر مذکور برای هر تیپ در جایی یادداشت شده و در نهایت برای هر تیپ عضو سازه‌ای، بیشترین مقادیر مورد نیاز در تمام مدل‌های مورد بررسی تعیین می‌شود. با داشتن این مقادیر، ابعاد اعضا و درصد آرماتور هر یک تعیین شده و سازه طراحی شده در صورت حذف احتمالی هر یک از ستون‌های قابل حذف آن، توان تحمل بارهای وارد شده و باز توزیع نیروها را دارا بوده و در نهایت سازه در مقابل وقوع خرابی پیش‌رونده ایمن خواهد بود.

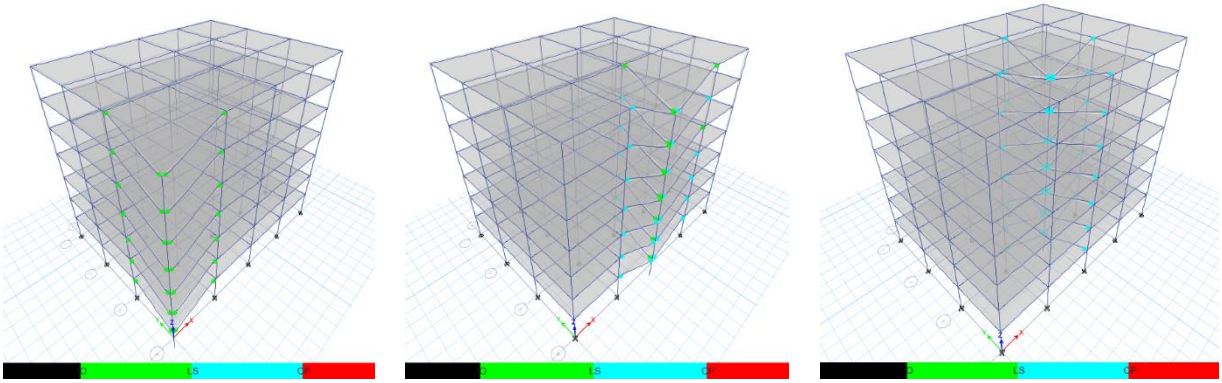
شکل ۹. وضعیت تشکیل مفاصل در قاب سه طبقه طراحی شده با آیین‌نامه UFC تحت سناریوهای مختلف حذف ستون



(a) corner column removal (b) side column removal (c) middle column removal

Fig. 9. Plastic hinges developed in 3-story frame designed using UFC provisions under various column removal scenarios

شکل ۱۰. وضعیت تشکیل مفاصل در قاب هفت طبقه طراحی شده با آیین‌نامه UFC تحت سناریوهای مختلف حذف ستون



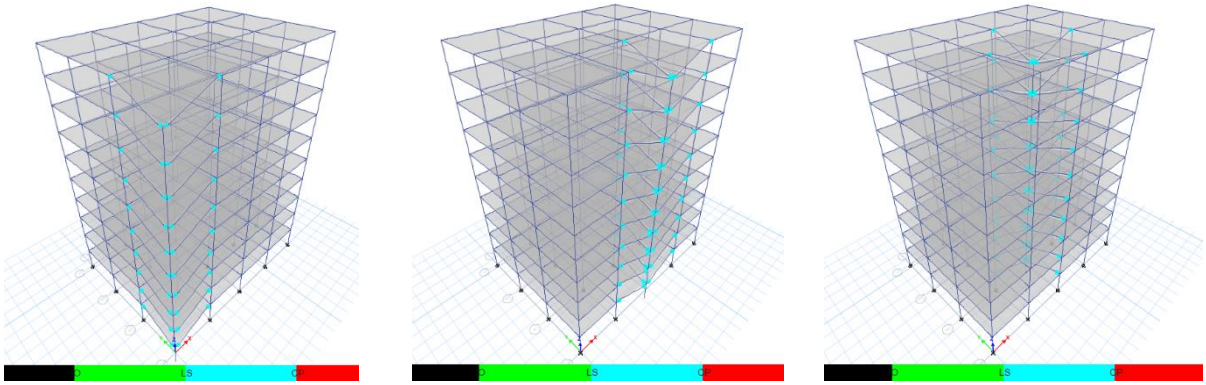
(a) corner column removal (b) side column removal (c) middle column removal

Fig. 10. Plastic hinges developed in 7-story frame designed using UFC provisions under various column removal scenarios

www.SID.ir

Archive of SID

شکل ۱۱. وضعیت تشکیل مفاصل در قاب ده طبقه طراحی شده با آیین‌نامه UFC تحت سناریوهای مختلف حذف ستون



(a) corner column removal (b) side column removal (c) middle column removal

Fig. 11. Plastic hinges developed in 10-story frame designed using UFC provisions under various column removal scenarios

در بین انواع سیستم‌های سازه‌ای در ساختمان های بتن مسلح، در این مقاله سه سیستم متداول در کشور یعنی "قاب خمشی متوسط بتنی"، "قاب خمشی ویژه بتنی" و "قاب خمشی متوسط بتنی همراه با دیوار برشی متوسط بتنی" مورد بررسی موردی قرار گرفتند. بر اساس نتایج بدست آمده، سیستم قاب خمشی متوسط بتنی در مقایسه با دو سیستم دیگر، چه در سازه‌های موجود و چه در سازه‌های جدید، با در نظر گرفتن ملاحظات مقاومتی و اقتصادی سیستم مناسب‌تری برای جلوگیری از وقوع خرابی پیش‌رونده خواهد بود.

۷- نتیجه‌گیری

هدف این مقاله رسیدن به درک مناسب و جامع از رفتار انواع سیستم‌های سازه‌ای ساختمان‌های بتن مسلح در برابر پدیده خرابی پیش‌رونده و مقایسه این سیستم‌ها با یکدیگر بوده است. افزون بر این، سعی شده است سیستمی که پتانسیل بروز بهترین رفتار برای کنترل خرابی پیش‌رونده در ساختمان‌های بتن مسلح را دارد، معرفی شده تا در ساخت و ساز ساختمان-هایی که احتمال بروز این پدیده در آن‌ها بیشتر است، از این نوع سیستم استفاده شود. نتایج کلی بدست آمده از این پژوهش در ذیل آورده شده است.

سازه‌های طراحی شده بر اساس ضوابط مقررات ملی ساختمان و استاندارد ۲۸۰۰ بدون در نظر گرفتن ملاحظات ویژه برای عدم وقوع خرابی پیش‌رونده، قابلیت عدم وقوع خرابی پیش-رونده پس از حذف ستون را نخواهند داشت.

در بین سیستم‌های سازه‌ای مورد بررسی، قاب‌های خمشی متوسط بتنی قابلیت بیشتری برای تاخیر در وقوع خرابی پیش-رونده را دارا هستند.

در سازه‌های طراحی شده بر اساس آیین‌نامه UFC [14]، در قاب‌های خمشی متوسط بتنی اختلاف کمتری بین میلگردهای مورد نیاز لرزه‌ای و میلگردهای مورد نیاز برای عدم وقوع خرابی پیش‌رونده مشاهده می‌شود.

سازه‌های طراحی شده بر اساس نتایج تحلیل‌های خطی آیین‌نامه UFC [14]، در تحلیل‌های غیرخطی تقریبا تا ۹۰ درصد بارهای ثقلی ضریب‌دار را قبل از وقوع خرابی در اعضای سازه‌ای تحمل می‌کنند.

ضوابط آیین‌نامه UFC [14] برای همخوانی بیشتر نتایج تحلیل و طراحی خطی با نتایج تحلیل‌های غیرخطی نیاز به اصلاحاتی جزئی دارد.

به طور کلی، از نظر احتمال وقوع خرابی پیش‌رونده در سازه‌های موجود، قاب‌های خمشی متوسط بتنی در مقایسه با سایر سیستم‌ها در قاب‌های بتن مسلح متداول، به ویژه در قاب‌های با ارتفاع کم و متوسط مناسب‌تر خواهند بود.

در سازه‌های جدید با ارتفاع کم و متوسط، قاب‌های خمشی متوسط بتنی در مقایسه با سایر سیستم‌ها در قاب‌های بتن مسلح متداول، با در نظر گرفتن ملاحظات خرابی پیش‌رونده و نیز ملاحظات اقتصادی، مناسب‌ترین سیستم خواهند بود.

www.SID.ir

Archive of SID

۸- مراجع References

[1] Breen, J.E. 1975. *Summary Report: Research Workshop on Progressive Collapse of Building Structures: Held at Joe C. Thompson Conference Center, the University of Texas at Austin, November 18-20*, National Science Foundation.

[2] Popoff JR, A. 1975. Design against progressive collapse. *PCI journal*, 20(2), 44-57.

[3] Taylor, D. 1975. Progressive collapse. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 2(4), 517-529.

[4] Ellingwood, B., Leyendecker, E. & Yao, J. T. 1983. Probability of failure from abnormal load. *Journal of Structural Engineering*, 109(4), 875-890.

[5] Ellingwood, B.R. & Dusenberry, D.O. 2005. Building design for abnormal loads and progressive collapse. *Computer- Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 20(3), 194-205.

[6] Helmy, H., Salem, H., & Mourad, S. 2012. Progressive collapse assessment of framed reinforced concrete structures according to UFC guidelines for alternative path method. *Engineering Structures*, 42, 127-141.

[7] Le, J.L. & Xue, B. 2014. Probabilistic analysis of reinforced concrete frame structures against progressive collapse. *Engineering Structures*, 76, 313-323.

[8] Su, Z.B., Hu, Q.G., Zhang, F.Z., B, J., & He, M.J. 2017. Numerical analysis of progressive collapse performance of reinforced concrete frame under blast loading. *Proceedings of the 2017 3rd International Forum on Energy, Environment Science and Materials, (IFEESM 2017)*.

[9] Weng, J., Lee, C.K., Tan, K.H. & Lim, N.S. 2017. Damage assessment for reinforced concrete frames subject to progressive collapse. *Engineering Structures*, 149, 147-160.

[10] Yu, J. & Tan, K.H. 2017. Structural Behavior of Reinforced Concrete Frames Subjected to Progressive Collapse. *ACI Structural Journal*. 114(1), 63-74.

[11] Iranaian National Building Codes and Standards For Structural Design, Design Loads for Buildings, Part 6. (3rd Edition). Road, Housing and Urban Development Research Center. (2013), (In Persain).

[12] Iranaian National Building Codes and Standards For Structural Design, Design and Construction of Concrete Structures, Part 9. (4rd Edition). Road, Housing and Urban Development Research Center. (2013), (In Persain).

[13] Iranaian National Building Codes and Standards For Structural Design, Iranian Code of Practice for Seismic Resistant Design of Buildings, Standard 2800-05 (4rd Edition). Road, Housing and Urban Development Research Center. (2005), (In Persain).

[14] US Department of Defense, Design of Buildings to Resist Progressive Collapse, The Unified Facilities Criteria (UFC) 4-023-03. (2009).

www.SID.ir

Archive of SID

Investigating the impact of structural systems on the potential for progressive collapse in reinforced concrete buildings

S. Garivani[1]*, S.S. Askariani[2]

1- Assistant Professor, Faculty of Engineering, Civil Engineering Department, University of Bojnord.
2- Research Assistant, M.Sc. of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Civil Engineering Department, University of Bojnord.

***garivani@ub.ac.ir**

Abstract:

Progressive collapse is a particular phenomenon in structures in which all or a part of the structure is collapsed due to a local damage or fracture in a limited part of the structure. This phenomenon is often triggered by an accident such as an explosion in the structure and then progresses for reasons other than the proper redistribution of forces between other members of the structure. In this phenomenon, failure is often triggered by an accident such as an explosion in the structure and then progressed to other parts of the structure due to some reasons such as inappropriate redistribution of forces between the other structural members. In recent years, study on progressive collapse in structures has been increasingly taken into account and a number of different researches have been conducted on this topic. One of the issues discussed in this regard is the impact of structural systems on the potential for progressive collapse in buildings. One of the most common types of building structures is reinforced concrete buildings that are also widely used in Iran. In these buildings, various types of structural systems such as "moment-resisting frames systems", "bearing wall systems", "dual systems include moment-resisting frames and shear wall", etc. are used. Choosing an appropriate system to have more safety against a premature failure requires knowledge of the behavior of these systems against this phenomenon. Proposing and choosing an appropriate structural system to have more safety against the progressive collapse, taking account economic considerations, requires having sufficient knowledge of the behavior of these systems against this phenomenon. In this paper, an attempt has been made to compare the behavior of various structural systems of reinforced concrete structures against the progressive collapse. In this regard, after literature review on the researches and existing standards/codes provisions related to this issue, nine reinforced concrete frames different in structural systems or number of stories have been modeled and the behavior of these frames has been investigated. These frames consist of 3, 7, and 10-story frames, as well as three structural systems: "Intermediate reinforced concrete moment frame", "special reinforced concrete moment frame" and "Intermediate reinforced concrete moment frame + Intermediate reinforced concrete shear walls". The loading and design of these frames is done in two ways: taking into account the criteria for progressive collapse, without taking into account these criteria. In the design of the structures with the aim of preventing a progressive collapse, the UFC-4-023-03 regulations have been used and these structures have been evaluated under different column removal scenarios. Finally, the provisions for linear and nonlinear analysis presented in this code are also compared. The results show that in terms of the ability to withstand the loads on the structure after column removal and also economic considerations, "Intermediate reinforced concrete moment frame" have better behavior than other structural systems studied in this paper. Moreover, in the studied structures, it is determined that the UFC-4-023-03 regulations, in the nonlinear analysis method, has been provided more conservative criteria compared with linear analysis.

Keywords: Progressive collapse, Reinforced concrete buildings, Load-resisting system, Column removal.

www.SID.ir