

Progressive collapse Analysis of steel moment frames with semi-rigid bolted end plate connections

Mahmood Amoupour¹, Mohammad Reza Sheidaii²

1-Phd Student of Structural Engineering, Engineering College, Urmia University, Urmia, Iran

2- Professor, Engineering College, Urmia University, Urmia, Iran

ABSTRACT

Progressive collapse refers to the failure of a critical structural member, leading to the gradual collapse of other members and potentially causing significant or total structural failure. The requirement to define and model plastic hinges for all structural components, including beams, columns, and connections (for all probable limit states), is an important requirement outlined in the code for the design of buildings to resist progressive collapse (UFC). In this research, the impact of simultaneously modeling plastic hinges for beam and column members, as well as semi-rigid connections of the bolted end plate type, on the progressive collapse resistance of steel moment frame structures has been studied. The design limit states of the mentioned connection include Yielding of end plate, Failure of weld and Yield of bolts. A 5-story steel frame was analyzed with and without connection plastic hinges, using the nonlinear static alternate path method (UFC) to assess collapse potential by removing corner, peripheral, and internal columns. Results indicate that modeling plastic hinges for both connections and members reduces the structure's resistance to progressive collapse compared to modeling only beams and columns. Strength reductions ranged from 23.03% to 44.39% when connection plastic hinges were included. Among the limit states, end-plate yielding performed best, while weld failure was the weakest in all column removal scenarios.

ARTICLE INFO

Receive Date: 18 December 2024

Revise Date: 28 February 2025

Accept Date: 04 March 2025

Keywords:

Semi rigid connections

Progressive collapse

Steel moment frame

Plastic hinges

Alternate path method

Dynamic increase factor

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/jsce.2025.492458.3594

*Corresponding author: Mohammad Reza Sheidaii.

Email address: m.sheidaii@urmia.ac.ir

تحلیل خرابی پیشرونده قاب‌های خمشی فولادی دارای اتصالات نیمه‌صلب از نوع ورق انتهایی پیچ‌شده

محمود عموپور^۱، محمدرضا شیدائی^{۲*}

۱- دانشجوی دکتری سازه، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

۲- استاد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

چکیده

در مکانیزم شکست سازه‌ای از نوع خرابی پیشرونده، خرابی از حداقل یک عضو بحرانی سازه‌ای شروع شده و بطور متوالی به سایر اعضای سازه گسترش می‌یابد و در نهایت باعث خرابی کلی یا خرابی بخش اعظمی از سازه می‌گردد. الزام تعریف و مدل‌سازی مفاصل پلاستیک برای همه اجزای سازه اعم از تیر، ستون و اتصالات (برای تمامی حالات حدی محتمل)، از الزامات مهم مطرح شده در آیین‌نامه طراحی ساختمان‌های مقاوم در برابر خرابی پیشرونده (UFC) می‌باشد. در این تحقیق تاثیر مدل‌سازی همزمان مفاصل پلاستیک اعضای تیر و ستون و نیز اتصالات نیمه‌صلب از نوع ورق انتهایی پیچ‌شده بر مقاومت خرابی پیشرونده سازه‌های قاب خمشی فولادی مورد مطالعه قرار گرفته است. حالات حدی طراحی اتصال مزبور شامل تسلیم ورق انتهایی، گسیختگی جوش و تسلیم پیچ‌ها بوده است. مدل سازه‌ای قاب خمشی ۵ طبقه طراحی شده و سپس مقاومت آن با و بدون در نظرگیری مفاصل پلاستیک اتصالات مورد ارزیابی قرار گرفته است. ارزیابی پتانسیل خرابی پیشرونده سازه مذکور به ازای حذف ستون‌های گوشه، پیرامونی و داخلی به روش مسیر جایگزین استاتیکی غیرخطی مطابق آیین‌نامه UFC انجام گرفته است. نتایج نشان می‌دهند که با در نظرگیری همزمان مفاصل پلاستیک اتصالات و اعضای تیر و ستون در مقایسه با حالتی که مفاصل پلاستیک صرفاً برای اعضای تیر و ستون مدل‌سازی می‌شدند، سازه، مقاومت کمتری در برابر خرابی پیشرونده نشان داده و مدل‌سازی مفاصل پلاستیک اتصالات در کمترین حالت ۲۳/۰۳٪ و در بیشترین حالت ۴۴/۳۹٪ بر کاهش مقاومت سازه تأثیر می‌گذارد. در هر سه موقعیت حذف ستون، حالت حدی تسلیم ورق انتهایی بهترین عملکرد و حالت حدی گسیختگی جوش ضعیف‌ترین عملکرد را نشان داده است.

کلمات کلیدی: اتصالات نیمه‌صلب، خرابی پیشرونده، قاب خمشی فولادی، مفاصل پلاستیک، روش مسیر جایگزین، ضریب افزایش

دینامیکی

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	10.22065/jsce.2025.492458.3594	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2025.492458.3594	۱۴۰۴/۰۹/۳۰	۱۴۰۳/۱۲/۱۴	۱۴۰۳/۱۲/۱۴	۱۴۰۳/۱۲/۱۰	۱۴۰۳/۰۹/۲۸
محمدرضا شیدائی m.sheidaii@urmia.ac.ir				*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:		

۱- مقدمه

خرابی پیشرونده به عنوان یک پدیده مهم در تحلیل و طراحی سازه‌های مهندسی عمران، به صورت خرابی تمام یا بخش وسیعی از یک سازه بر اثر شکست ایجاد شده در بخش کوچکی که توسط بارهای غیرعادی ایجاد می‌شود تعریف می‌گردد. عوامل زیادی مانند آتش - سوزی، برخورد وسایل نقلیه، خطاهای ناشی از ساخت و ساز، همچنین انفجار ناشی از گاز یا حملات تروریستی منابع اصلی بارگذاری غیرعادی محسوب می‌شوند. معمولاً طراحی سازه‌ها فقط برای بارگذاری‌های عادی نظیر برف، باد، زلزله و بارهای مرده و زنده صورت می‌گیرد در حالیکه بارگذاری غیرعادی مذکور ممکن است سبب ایجاد خرابی موضعی در سازه گردد. در اثر این خرابی موضعی، بدون اینکه افزایشی در بارهای خارجی وارده پیش آید، باز توزیعی در نیروهای داخلی سازه پدید می‌آید و سایر اعضا تحت اثر نیروهای اضافی قرار می‌گیرند. در نتیجه ممکن است یک عضو یا تعداد بیشتری از این اعضا نیز به نوبه خود خراب شده و به تبع آن باز توزیع بیشتری در نیروها ایجاد شود. بدین ترتیب خرابی در کل سازه انتشار یافته و ممکن است به خرابی کلی در سازه منجر شود.

مروری بر گزارشات ثبت شده‌ی مهندسی در آمریکا نشان می‌دهد که در مدت چهار سال (از سال ۱۹۶۸ تا سال ۱۹۷۲) از ۱۱۰ مورد خرابی ۲۲ مورد، یعنی در حدود ۲۰ درصد کل خرابی‌ها مربوط به خرابی پیشرونده می‌باشند. آمار دیگری از نشریات کانادایی مربوط به ده سال (از سال ۱۹۶۲ تا سال ۱۹۷۲) موجود است که طبق آن از تعداد کل ۴۹۵ خرابی، ۷۵ مورد یعنی در حدود ۱۵ درصد از کل خرابی‌های ثبت شده از نوع خرابی پیشرونده بوده است [۱]. مطالعات تجربی و تحلیلی در زمینه رفتار خرابی پیشرونده انواع سیستم‌های سازه‌ای و نیز روش‌های مقاوم‌سازی در برابر پدیده خرابی پیشرونده از موضوعات مهم تحقیقاتی مدنظر محققین می‌باشد [۲ و ۳].

ظرفیت خرابی پیشرونده^۱ به توانایی یک سازه در جلوگیری از گسترش خرابی موضعی به سایر بخش‌ها اشاره دارد. به عبارت دیگر، این مفهوم بیانگر این است که اگر بخشی از سازه به دلیل بارهای غیرعادی (مانند انفجار، ضربه یا خرابی موضعی) آسیب ببیند، سازه بتواند بدون اینکه دچار فروریزش کلی شود، بارها را به بخش‌های دیگر منتقل کند. این مفهوم در طراحی سازه‌های حیاتی مانند برج‌ها، پل‌ها، ساختمان‌های با کاربری خاص و ساختمان‌های بلندمرتبه بسیار مهم است تا ایمنی و پایداری سازه در شرایط بحرانی تضمین شود. یکی از سیستم‌های سازه‌ای که مقاومت خوبی در برابر خرابی پیشرونده از خود نشان می‌دهد سیستم قاب خمشی فولادی است. مطالعات و تحقیقات گذشته نشان داده است که این سیستم‌ها مقاومت و شکل‌پذیری بالایی در برابر خرابی پیشرونده از خود نشان می‌دهند. مقاومت این قاب‌ها در برابر خرابی پیشرونده به واسطه تغییر شکل خمشی تیرها تأمین می‌گردد، رعایت ملزومات طراحی ستون قوی و تیر ضعیف باعث می‌شود تا مفاصل پلاستیک عموماً فقط در اتصالات و تیرها تشکیل شوند و ستون‌ها در ناحیه الاستیک باقی بمانند [۴].

سانگ و همکارانش [۵] ظرفیت مقاومت در برابر خرابی پیشرونده قاب‌های خمشی معمولی فولادی (OMFs) و قاب‌های خمشی متوسط (IMFs) با جزئیات مختلف اتصال را به صورت عددی ارزیابی و مقایسه کردند. سه ساختمان نمونه با سیستم‌های به ترتیب قاب خمشی معمولی فولادی (OMFs) با اتصالات WUF-B، قاب خمشی معمولی فولادی (OMFs) با اتصالات RBS و قاب خمشی متوسط فولادی (IMFs) با اتصالات RBS مطابق آیین‌نامه ساختمان کره (KBC) طراحی و با مدل‌های تعدیل‌یافته تحلیل شدند. سناریوهای حذف ۱ و ۲ ستون از طریق تحلیل‌های غیرخطی و روش‌های مبتنی بر انرژی ارزیابی شد. با مقایسه ظرفیت‌های مقاومت در برابر خرابی پیشرونده بر اساس آیین‌نامه^۲ GSA [۶]، شاخص استحکام سازه‌ای و شاخص حساسیت تعیین شد. هر سه ساختمان ظرفیت در حذف ۱ ستون مقاومت کافی داشتند، اما در حذف ۲ ستون ناکام ماندند. همچنین، قاب‌های OMFs با اتصالات RBS عملکرد بهتری نسبت به WUF-B داشتند و در شرایط مشابه نسبت به قاب‌های IMFs مقاوم‌تر بودند.

سلماسی و همکاران [۷]، برای ارزیابی تأثیر نوع اتصال تیر به ستون بر مقاومت خرابی پیشرونده، رفتار یک قاب خمشی متوسط فولادی را با ۱۰ نوع اتصال صلب بررسی کردند. تحلیل با استفاده از روش مسیر جایگزین استاتیکی غیرخطی طبق آیین‌نامه UFC [۸] انجام شد. مفاصل پلاستیک برای تیرها، ستون‌ها و اتصالات مطابق استاندارد ASCE41 [۹] تعریف و مدل‌سازی شدند. نتایج نشان داد که

¹ Progressive Collapse Capacity
² General Services Administration

تعریف جداگانه مفاصل پلاستیک برای اتصالات، مقاومت خرابی پیشرونده را کاهش و ضریب افزایش دینامیکی را افزایش می‌دهد. در این میان، اتصال بال آزاد^۳ بهترین عملکرد و بیشترین مقاومت را داشت.

کورتز و همکارانش [۱۰] رفتار قاب‌های ساده ساختمانی فولادی با اتصالات ساده را تحت سناریوی حذف ناگهانی ستون مورد مطالعه قرار دادند. این تحقیق نشان داد در این شرایط، بارهای محوری بسیار بزرگی در اتصالات ایجاد می‌شوند که به مراتب از نیروهای برشی منظور شده برای طراحی اتصال، بیشتر هستند. در این مقاله ده نمونه با پنج نوع اتصال مختلف به صورت آزمایشگاهی بررسی شدند. اتصالات ساده معمولی ظرفیت بسیار پایینی را در برابر ترکیب بار تعریف شده در آیین‌نامه ASCE7-16 [۱۱] از خود نشان دادند. برای بهبود مقاومت، دو ورق تقویتی در محل اتصال تیر به ستون اضافه شد که نتایج نشان داد این تقویت‌ها توانایی اتصالات را در برابر خرابی پیشرونده افزایش می‌دهند.

برمکی و همکاران [۱۲]، با استفاده از روش آنالیز شبه استاتیکی غیرخطی، قاب خمشی فولادی با انواع مختلف اتصالات جوشی تیر به ستون شامل اتصال مستقیم تقویت نشده جوشی (W-WUF)، اتصال تیر با مقطع کاهش‌یافته (RBS)، اتصال جوشی به کمک ورق‌های روسری و زیرسری (WFP) و اتصال مستقیم جوشی (I-W)، تحت اثر سه سناریوی مختلف حذف ستون گوشه، داخلی، کناری و همچنین سناریوی حذف ستون با دو تیر هم‌راستا را مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج تحلیل نشان داد که اتصال WFP در تمامی موقعیت‌های اتصالاتی تیر به ستون مقاومت بهتری در برابر خرابی پیشرونده دارد؛ و ظرفیت باربری این اتصال بالا است. بعد از اتصال WFP، به ترتیب اتصالات I-W، W، RBS و W-WUF در حالت حذف ستون داخلی و با چهار تیر متعامد از مقاومت بالاتری برخوردار بودند. بررسی نتایج حاصل از نمودارهای نیرو-تغییر مکان نشان داد که اتصالات W-WUF و I-W در سناریوی حذف ستون کناری و اتصالات RBS و WFP در سناریوی حذف ستون میانی، مقاومت بیشتری در برابر خرابی پیشرونده دارند.

برمکی و همکاران [۱۳]، با بررسی مقاومت اتصالات خمشی با صفحه انتهایی پیچ‌شده، نشان دادند با افزودن تعداد پیچ‌ها در ناحیه بال تحتانی تیر، مسیرهای انتقال بار افزایش یافته و به تبع آن شکل‌پذیری و ظرفیت سازه نیز در برابر خرابی پیشرونده بطور محسوسی افزایش پیدا می‌کند. بر همین اساس توصیه نمودند در سازه‌های در معرض خرابی پیشرونده، حداقل ۴ ردیف پیچ در ناحیه تحتانی ورق انتهایی در نظر گرفته شود.

آکسویلا و همکارانش [۱۴]، مطالعه‌ای را در مورد عملکرد لرزه‌ای قاب‌هایی با دهانه و ارتفاع بلند با اتصالات نیمه‌صلب انجام دادند. ساختمان‌های در نظر گرفته شده در این تحقیق دو ساختمان سه طبقه با طول دهانه‌های مختلف ۷ و ۹ متر بودند. در این تحقیق اتصالات نیمه‌صلب از نوع اتصال ورق انتهایی با شش پیچ بدون سخت‌کننده می‌باشد که با استفاده از روش خطوط تسلیم طراحی می‌شود. آن‌ها دریافتند که با کاهش ظرفیت خمشی اتصال، سختی اولیه و ظرفیت نهایی قاب نیز کاهش می‌یابد. از طرفی در قاب‌های نیمه‌صلب اولین تسلیم در اتصالات رخ می‌دهد و هیچ تسلیمی در تیرها اتفاق نمی‌افتد. آن‌ها همچنین دریافتند که با کاهش ظرفیت اتصال، حالت‌های حدی اتصال در تراز بار کمتری اتفاق می‌افتند ولی تأثیر یکسانی روی حالت‌های حدی ستون مشاهده نمی‌شود.

سلماسی و همکاران [۱۵]، رفتار خرابی پیشرونده چهار نوع اتصال جوشی مختلف تیر-ستون شامل اتصال مستقیم تقویت‌نشده جوشی (W-WUF)، اتصال تیر با مقطع کاهش‌یافته (RBS)، اتصال جوشی به کمک ورق‌های روسری و زیرسری (WFP) و اتصال مستقیم جوشی (I-W) را تحت سناریوی حذف ستون مورد مطالعه قرار دادند. اتصالات WFP به دلیل وجود صفحات بالا و پایین و دور نگه داشتن تنش‌های بحرانی از ناحیه اتصال بهترین عملکرد را نشان دادند. اتصالات RBS ضعیف‌ترین رفتار را به دلیل تمرکز بیش از حد تنش‌ها و شکست سریع و تحمل حداقل بارهای عمودی از خود نشان دادند. همچنین نتیجه گرفتند در طراحی ساختمان‌های در معرض پدیده خرابی پیشرونده، بار محوری قابل توجهی که در ناحیه اتصالات ایجاد می‌شود، باید در مرحله طراحی در نظر گرفته شود.

با توجه به بررسی منابع انجام شده می‌توان به این نتیجه رسید که ظرفیت اتصال یا میزان صلبیت اتصال تأثیر تعیین‌کننده‌ای بر روی مقاومت قاب‌های خمشی فولادی در برابر خرابی پیشرونده دارد به نحوی که اکثر خرابی‌های سازه‌هایی که در معرض بارهای غیرعادی قرار داشته‌اند از محل اتصال تیر به ستون شروع شده است. در ارزیابی رفتار ساختمان‌ها در برابر خرابی پیشرونده، سازه وارد ناحیه غیرارتجاعی می‌گردد و تفاوت در رفتار حدی غیرارتجاعی اتصالات مختلف، سبب تفاوت در مقاومت این اتصالات در برابر خرابی پیشرونده

³ Free flange

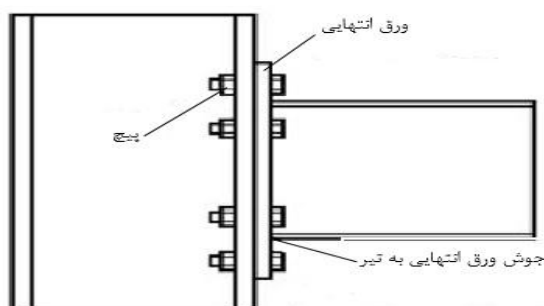
شده و به تبع آن عملکرد سازه برای انواع مختلف اتصالات در ساختمان، متفاوت خواهد بود. بنابراین ضروری است تا رفتار قاب‌های خمشی فولادی با اتصالات نیمه‌صلب لرزه‌ای مورد ارزیابی دقیق‌تر قرار گیرد. در این مطالعه تاثیر مدل‌سازی مفاصل پلاستیک اتصالات نیمه‌صلب از نوع ورق انتهایی پیچ‌شده بر روی مقاومت سازه در برابر خرابی پیشرونده با استفاده از روش‌های مسیر جایگزین استاتیکی غیرخطی آیین‌نامه UFC، مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. مفاصل پلاستیک در دو حالت تعریف و مدل‌سازی شده‌اند، در حالت اول طبق روش معمول، مفاصل پلاستیک صرفاً برای اعضای تیر و ستون مدل‌سازی و تحلیل شده است و در حالت دوم مفاصل پلاستیک علاوه بر اعضای تیر و ستون برای اتصالات مورد بررسی در این تحقیق نیز مدل‌سازی شده‌اند و نتایج این دو روش مورد مقایسه قرار گرفته است. فلوچارت روند انجام تحقیق در شکل ۱ نشان داده شده است.



۲- معرفی و مدل‌سازی نمونه‌های تحلیلی

۲-۱- اتصال نیمه‌صلب مورد بررسی

در این تحقیق، اتصال گیردار فلنجی چهار پیچی بدون ورق سخت‌کننده (BEP) (شکل ۲) بررسی شده است. حالات حدی این اتصال در جدول ۱ ارائه شده و نشان‌دهنده شرایطی است که ممکن است خرابی در بخش‌هایی مانند ورق انتهایی، پیچ‌ها یا جوش رخ دهد. در طراحی سازه، تلاش شده است که حالت حدی قوی (کمترین خرابی برای سازه) اتفاق بیفتد [۱۶]. برای مدل‌سازی اتصالات نیمه‌صلب، از مفاصل پلاستیک استفاده شده است. همچنین، هر حالت حدی به دلیل تفاوت در ظرفیت دوران پلاستیک، ضریب افزایش دینامیکی Ω_N مخصوص به خود را دارد که باعث ایجاد تفاوت در بارگذاری و رفتار خرابی پیشرونده در نمونه‌های تحلیلی مختلف می‌شود [۷].



شکل ۲: نمایش شماتیک اتصال

جدول ۱: اتصال نیمه‌صلب و حالت‌های حدی مربوطه مورد استفاده در این تحقیق

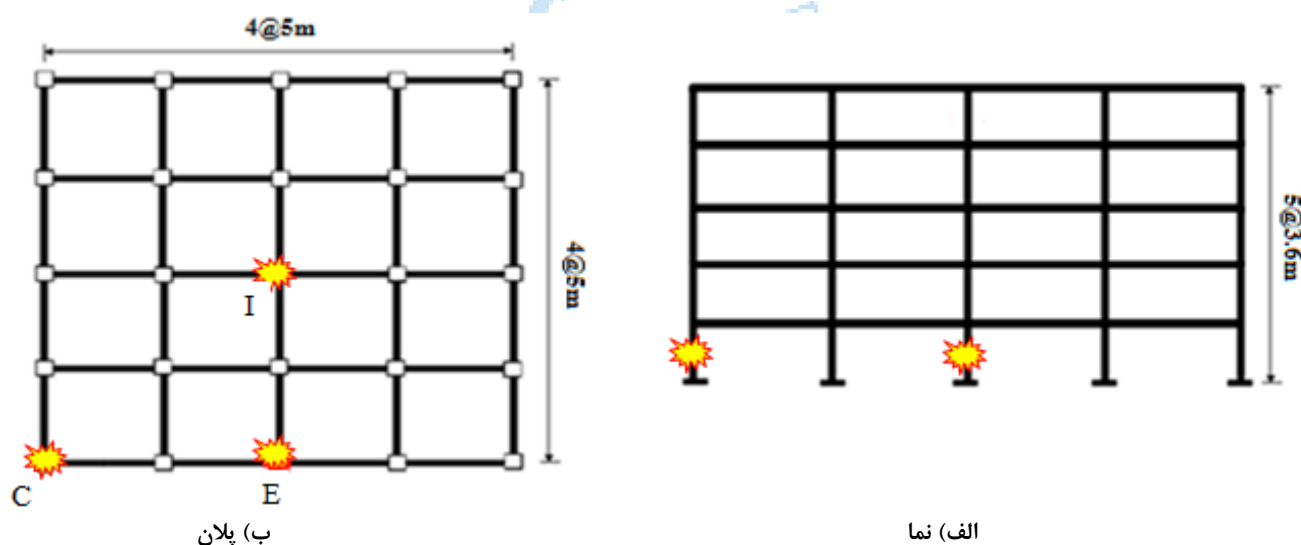
نام اتصال	حالات حدی اتصال
ورق انتهایی پیچ شده (BEP)	تسلیم ورق انتهایی (Yield of end plate)
	تسلیم پیچ‌ها (Yield of bolts)
	تسلیم جوش (Failure of weld)

۲-۲- مشخصات سازه

در این تحقیق آسیب‌پذیری یک ساختمان فولادی با سیستم باربر جانبی قاب خمشی فولادی متوسط با اتصالات نیمه‌صلب لرزه‌ای تحت حالات حدی حاکم مختلف، در برابر خرابی پیشرونده بررسی شده است. پلان و نمای این ساختمان در شکل ۳ نشان داده شده است. ساختمان مزبور ۵ طبقه با ارتفاع طبقات ۳/۶ متر، دارای چهار دهانه در هر دو راستا با طول هر دهانه ۵ متر می‌باشد، ساختمان دارای کاربری مسکونی و در ناحیه‌ای با لرزه‌خیزی زیاد واقع شده و ضریب زلزله برای این سازه $C=0.088$ محاسبه گردیده است. مقاطع به کار رفته برای تیرها و ستون‌ها به ترتیب از نوع I شکل و قوطی شکل بوده و مشخصات مصالح مصرفی در تمام مدل‌ها مطابق با جدول ۲ می‌باشد.

جدول ۲: مشخصات مصالح مصرفی در مدل‌های نمونه

مصالح فولادی		مصالح بتنی	
جرم واحد حجم	7850 kgf/m ³	جرم واحد حجم	2500 kgf/m ³
مدول الاستیسیته	2.1×10^6 kgf/cm ²	مدول الاستیسیته	2.1×10^5 kgf/cm ²
ضریب پواسون	0.3	ضریب پواسون	0.2
تنش تسلیم F_y	3450 kgf/cm ²	-	-
مقاومت نهایی F_u	4500 kgf/cm ²	-	-



شکل ۳: نما و پلان ساختمان و موقعیت‌های حذف ستون در سازه

در این تحقیق از آیین‌نامه‌های ASCE7-16 [۱۱] و UFC2016 [۱۷] برای بارگذاری متعارف و ارزیابی مقاومت خرابی پیشرونده سازه استفاده شده است. بر این اساس مقادیر بارهای متعارف در نظر گرفته شده برای طراحی سازه به شرح جدول ۳ بوده است. سیستم باربر جانبی از نوع قاب خمشی فولادی متوسط در نظر گرفته شده و طراحی قاب‌ها بر اساس الزامات آیین‌نامه‌های AISC341-16 [۱۸] و AISC360-16 [۱۹] انجام شده است.

جدول ۳: بارهای ثقلی طراحی سازه

محل اعمال بار	بار مرده kgf/m ²	بار زنده kgf/m ²	بار زنده تیغه‌ها و تاسیسات kgf/m ²	بار دیوارهای پیرامونی kgf/m ²
طبقات	550	200	100	600
بام	600	150	0	100

طراحی متعارف قاب خمشی فولادی با استفاده از نرم‌افزار ETABS [۲۰] انجام شده و مقاطع اعضای سازه مطابق جدول ۴ به دست آمده است. مقاطع استفاده شده در جدول با علامت BOX35×35×1 یعنی مقطع قوطی با عرض و ارتفاع ۳۵ میلیمتر و ضخامت ۱ میلیمتر و با علامت W14×26 یعنی مقطع از نوع I شکل بر اساس استاندارد AISC با ارتفاع ۱۴ اینچ و وزن واحد طول ۲۶ پوند بر فوت می‌باشد.

جدول ۴: مقاطع طراحی برای مدل تحلیلی

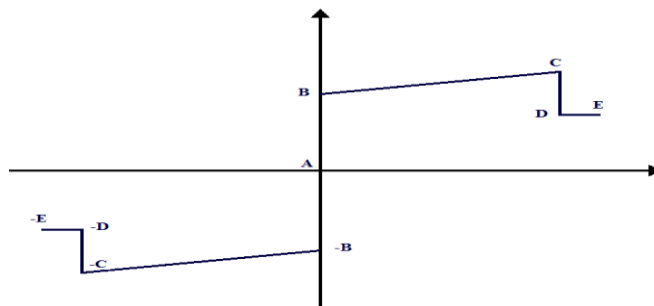
نوع المان	طبقات ۱ و ۲ و ۳	طبقات ۴ و ۵
ستون	BOX35×35×1	BOX25×25×1
تیرهای داخلی	W14×26	W14×22
تیرهای خارجی	W12×19	W10×17

۳- مدل سازی تحلیل خرابی پیشرونده

در این تحقیق، تحلیل خرابی پیشرونده مدل‌های نمونه با روش مسیر جایگزین استاتیکی غیرخطی مطابق UFC 2016 انجام شده است. در هر مدل، یکی از ستون‌های گوشه (C)، محیطی (E) یا داخلی (I) فقط در طبقه همکف حذف و تأثیر آن با استفاده از تحلیل مسیر جایگزین استاتیکی غیرخطی مدل سه بعدی سازه ارزیابی شده است. موقعیت‌های حذف ستون در شکل ۳ نشان داده شده‌اند.

برای انجام تحلیل‌های غیرخطی خرابی پیشرونده از نرم‌افزار SAP2000 [۲۱] استفاده شده است. برای انجام تحلیل‌های غیرخطی خرابی پیشرونده دو نوع اثرات غیرخطی، شامل اثر غیرخطی هندسی و اثر غیرخطی مصالح در نظر گرفته شده است. منحنی مشخصات

مفاصل پلاستیک با استفاده از یک منحنی چندخطی و نقاط مشخصه آن همانند شکل ۳ تعیین می شود. برای تعریف مفاصل پلاستیک از منحنی های لنگر- دوران مطابق دستورالعمل FEMA-356 [۲۲] استفاده شده است. با استفاده از این نمودارها می توان رفتار عضو را تحت نیروهای وارده در نقطه تسلیم و در ناحیه پلاستیک مدل کرد. در منحنی رفتاری نشان داده شده در شکل ۴ قبل از نقطه B تمام تغییر شکل ها از نوع الاستیک بوده و در خود امان قاب ایجاد می شوند. نقطه B نقطه تسلیم را نشان می دهد. نقطه C نشان دهنده ظرفیت نهایی در تحلیل های غیرخطی و نقطه E نشانگر وضعیت گسیختگی کلی در تحلیل است.



شکل ۴: منحنی رفتاری مفاصل پلاستیک در نرم افزار SAP2000

۳-۱- مفاصل پلاستیک اعضای تیر و ستون

در این تحقیق رفتار غیرخطی مصالح برای تیر با استفاده از تخصیص مفصل پلاستیک خمشی در نسبت های ۰/۰۵ و ۰/۹۵ طول تیر و برای ستون با تخصیص مفاصل پلاستیک خمشی - محوری در نسبت های ۰، ۰/۵ و ۱ طول ستون از ابتدای آن تعریف شده است.

۳-۲- مفصل پلاستیک اتصالات نیمه صلب

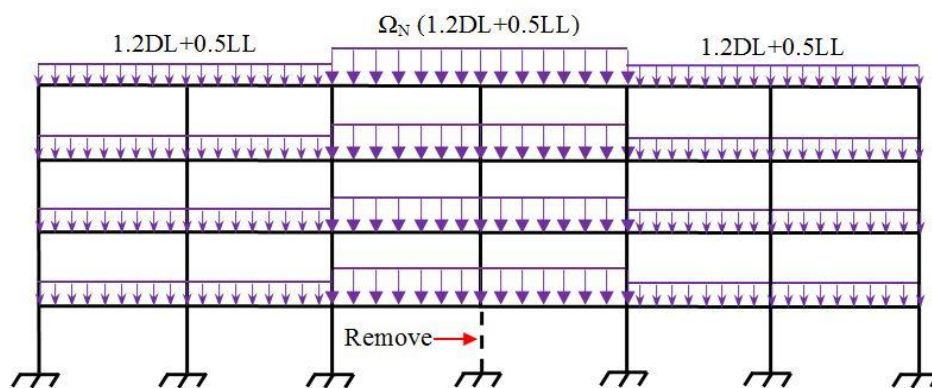
برای مدل سازی مفصل پلاستیک اتصالات از مقادیر جدول ۵-۶ دستورالعمل FEMA-356 [۱۶] یا جدول ۶-۹ آیین نامه ASCE41-17 [۹]، ذیل عنوان پارامترهای مدل سازی و معیارهای پذیرش در روش های غیرخطی اجزای سازه های فولادی (جدول ۵)، استفاده شده است. محل تشکیل مفاصل پلاستیک برای اتصالات نیمه صلب از نوع ورق انتهایی پیچ شده در بر ستون ها (در نسبت ۰ و ۱ از طول تیر) در نظر گرفته شده است.

جدول ۵- پارامترهای مدل سازی و معیارهای پذیرش اتصالات در روش های غیرخطی اجزاء سازه های فولادی

معیارهای پذیرش					پارامترهای مدل سازی			جزء / تلاش	
زاویه دوران پلاستیک (رادیان)					نسبت تنش پسماند	زاویه دوران پلاستیک (رادیان)			
اعضا غیر اصلی		اعضا اصلی		کلبه اعضا		b	a		
CP	LS	CP	LS	IO	c	b	a	تیر- در خمش	
0.1155	0.0945	0.084	0.063	0.0105	0.6	0.1155	0.0945		
0.035	0.035	0.035	0.028	0.010	0.8	0.042	0.042		تسلیم ورق انتهایی
0.020	0.020	0.015	0.010	0.008	0.8	0.024	0.018		تسلیم پیچ ها
0.015	0.015	0.010	0.008	0.003	0.8	0.018	0.012	تسلیم جوش	

۳-۳- تحلیل مسیر جایگزین استاتیکی غیرخطی

در تحلیل مسیر جایگزین استاتیکی غیرخطی، ستون موردنظر از همان ابتدا از مدل تحلیلی حذف شده و سازه تحت ترکیب بارگذاری نشان داده شده در شکل ۵ قرار می‌گیرد. آیین‌نامه UFC [۸] برای تحلیل استاتیکی، استفاده از ضریب افزایش دینامیکی Ω_N را در ترکیب بار گرانشی توصیه می‌کند که مقدار آن از رابطه (۱) به دست می‌آید [۲۲].



شکل ۵: بارگذاری در تحلیل استاتیکی غیرخطی طبق UFC2016

$$\Omega_N = 1.08 + 0.76 / ((\theta_{pra} / \theta_y) + 0.83) \quad (1)$$

پارامتر θ_y زاویه دوران حد تسلیم و θ_{pra} زاویه دوران پلاستیک می‌باشد.

برای محاسبه مقدار Ω_N در تیرها، در تیرها، θ_{pra} برابر با مقدار متناظر با معیار پذیرش CP در نظر گرفته شده است که مطابق با دستورالعمل FEMA-356 [۱۶] و آیین‌نامه UFC [۸] برای اعضای اصلی برابر با $8\theta_y$ می‌باشد و θ_y نیز ثابت بوده و از رابطه (۲) به دست می‌آید. در این حالت مقدار Ω_N برابر با 1.166 به دست آمده است. برای محاسبه مقدار Ω_N در هر حالت حدی اتصال موردنظر نیز θ_{pra} برابر با مقدار معیار پذیرش CP در نظر گرفته شده است و θ_y نیز همانند تیرها محاسبه می‌گردد.

$$\theta_y = \frac{ZF_{ye}l_b}{6EI_b} \quad (2)$$

که در آن Z اساس مقطع خمیری، F_{ye} تنش حد تسلیم مورد انتظار برای مصالح، l_b طول تیر، I_b لنگر اینرسی مقطع تیر و E مدول الاستیسیته می‌باشد.

جدول ۶ مقادیر ضریب افزایش دینامیکی صرفاً بر اساس مدل‌سازی مفاصل پلاستیک اعضا و با در نظرگیری همزمان مفاصل پلاستیک اعضا و اتصالات در حالت‌های حدی اتصال و درصد افزایش این ضریب را در هر یک از حالت‌های حدی اتصال نسبت به تیر نشان می‌دهد. با توجه به نتایج جدول ۶ ضریب افزایش دینامیکی باید بر اساس مشخصات اتصالات محاسبه شده و در بارگذاری ثقلی اعضای مرتبط با محل حذف ستون ضرب شود. در بیشترین حالت مقدار ۲۸/۶۴٪ و در کمترین حالت مقدار ۸/۲۳٪ افزایش در میزان ضریب افزایش دینامیکی مشاهده می‌شود.

نوع عضو	ضریب افزایش دینامیکی	درصد افزایش ضریب افزایش دینامیکی
Beam	1.166	-
Yield of end plate	1.262	8.23%

افزایش ضریب افزایش

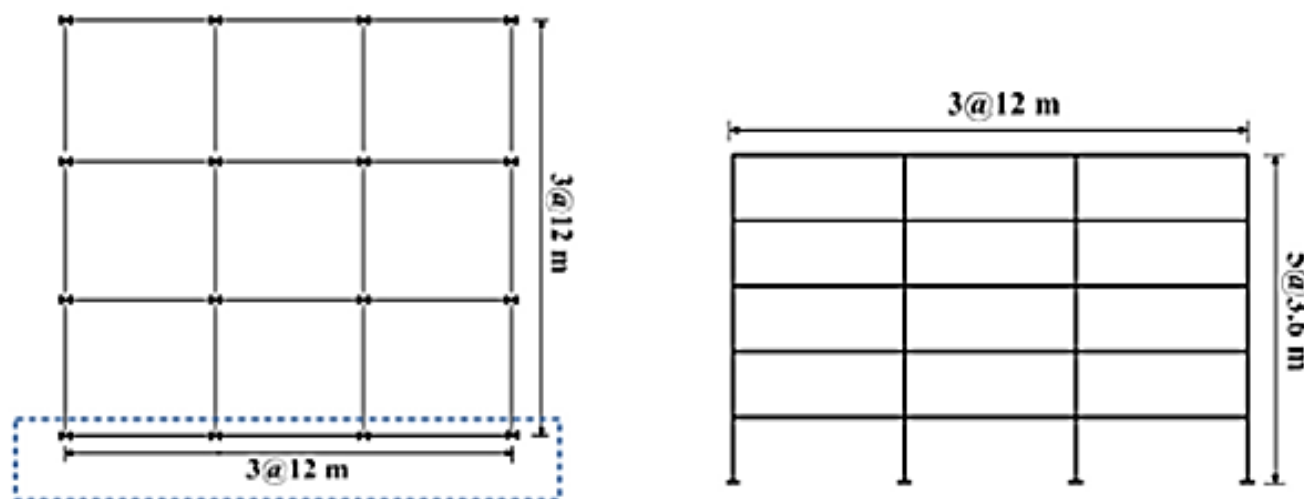
21.44%	1.416	Yield of bolts
28.64%	1.500	Failure of weld

جدول ۶: مقدار و درصد دینامیکی

در روش تحلیل مسیر جایگزین استاتیکی غیرخطی، عملکرد سازه‌ها در برابر خرابی پیشرونده بدین صورت ارزیابی می‌شود که بارگذاری سازه به صورت تدریجی آن قدر افزایش می‌یابد تا اینکه در نهایت سازه تحت الگوی بار پیشنهادی آیین‌نامه به مرز فروریزش برسد [۲۳].

۴- صحت سنجی

Lee و Kim [۲۴] ظرفیت قاب‌های خمشی فولادی تقویت شده به وسیله ورق‌های میانقاب فولادی را در برابر خرابی پیشرونده مورد بررسی قرار دادند. در تحقیق مزبور ساختمان‌های دو، سه و پنج طبقه با ارتفاع طبقات ۳/۶ متر و بارهای مرده و زنده به



پلان مدل پنج طبقه

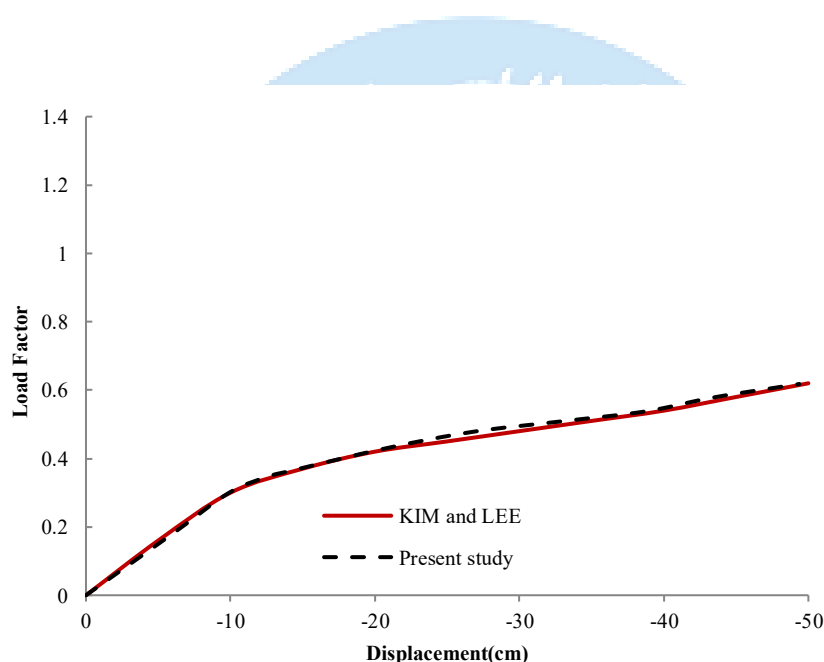
الف) برش مدل پنج طبقه

شکل ۶: پلان و نمای مدل‌های سازه‌ای مطالعه منتخب برای صحت سنجی

ترتیب ۰ و ۲/۵ کیلونیوتن بر مترمربع بر اساس روش LRFD تشریح شده در آیین‌نامه AISC 341-16 [۱۸] با مدول یانگ و ضریب پواسن به ترتیب $2/0.5 \times 10^5$ مگاپاسکال و ۰/۳ و ستون‌ها از فولاد SM490 با تنش تسلیم و نهایی به ترتیب ۳۲۵ و ۴۹۰ مگاپاسکال و تیرها از فولاد SS400 با تنش تسلیم و نهایی به ترتیب ۲۴۰ و ۴۰۰ مگاپاسکال طراحی شده و در برابر خرابی پیشرونده مورد ارزیابی قرار گرفته است. در این تحقیق برای صحت‌سنجی نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها، ساختمان نمونه پنج طبقه مورد بررسی توسط Lee و Kim [۲۴] با طول دهانه ۱۲ متر با جزئیات کامل مدل‌سازی گردیده و رفتار این سازه به ازای حذف ناگهانی ستون میانی به روش مسیر جایگزین استاتیکی غیرخطی مجدداً بررسی شده است. شکل ۶ پلان و نمای ساختمان مورد بررسی را نشان می‌دهد.

در شکل ۷ منحنی ضریب بار- تغییرمکان نقطه فوقانی ستون حذف شده در سازه بررسی شده توسط Lee و Kim [۲۴] و در مدل تحلیلی که جهت صحت سنجی در این تحقیق به کار رفته، نشان داده شده است. با توجه به شکل ۷ در تغییرشکل‌های کوچک در حد

الاستیک و تا معیار پذیرش IO دو مدل تطابق بسیار خوبی را نشان داده و سختی سیستم در بخش الاستیک در هر دو مدل تقریباً یکسان بوده است و در تغییرشکل‌های زیاد در ناحیه پلاستیک تا معیارهای پذیرش LS و CP حداکثر اختلاف ضریب بار در دو مدل کمتر از ۴ درصد می‌باشد، از این رو نتایج بدست آمده از تحلیل‌های انجام گرفته مطابقت مناسبی با نتایج مقاله مرجع دارد.



شکل ۷: نمودار ضریب بار - تغییرمکان سازه نمونه ۵ طبقه بر اثر حذف ستون (مدل‌سازی شده توسط Kim and Lee [۲۴] و تحقیق حاضر)

۵- بررسی نتایج تحلیل نمونه‌ها

برای مدل کردن، تحلیل و تخمین آسیب‌پذیری ساختمان در برابر خرابی پیشرونده از مدل‌های سه‌بعدی استفاده شده است، طبق آیین‌نامه UFC استفاده از مدل‌های دوبعدی مجاز نیست. بعد از انجام تحلیل مسیر جایگزین استاتیکی غیرخطی، عملکرد سازه بر اساس معیارهای پذیرش مطرح شده در آیین‌نامه مذکور بررسی شده و آسیب‌پذیری آن در برابر خرابی پیشرونده تعیین شده است. در ادامه نتایج تحلیل مسیر جایگزین استاتیکی غیرخطی سازه با اتصال نیمه‌صلب از نوع ورق انتهایی پیچ‌شده تحت سه حالت حدی مختلف مطرح شده برای این نوع اتصال (مطابق جدول ۱)، ارائه شده و سپس مقایسه‌ای بین رفتار خرابی پیشرونده سازه به ازای حالات حدی مختلف اتصال مذکور، صورت گرفته است.

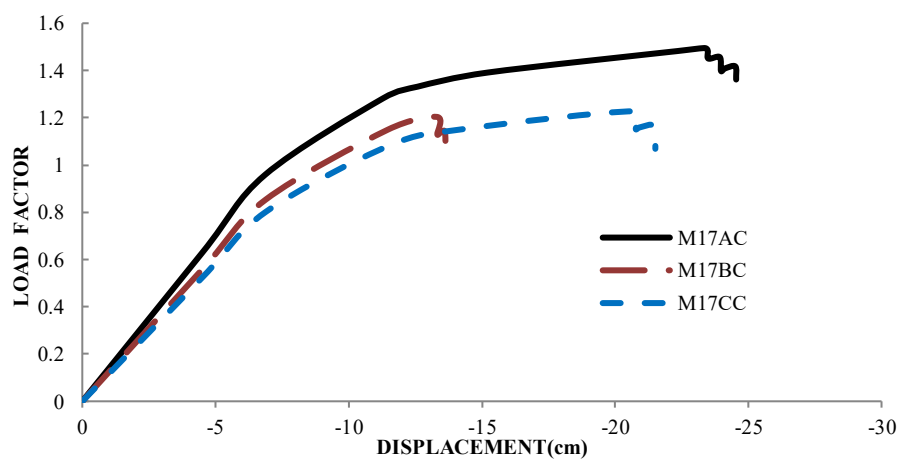
برای ایجاد تسهیل در ارائه نتایج از یک نامگذاری اختصاری سه قسمتی استفاده شده است که جملات آن به ترتیب از چپ به راست عبارتند از: نوع اتصال معرفی شده در نشریه ۳۶۰ (دستورالعمل بهسازی لرزه‌ای ساختمان‌های موجود)، نوع حالت حدی (A تسلیم ورق انتهایی، B تسلیم پیچ‌ها، C تسلیم جوش)، محل ستون حذف‌شده در پلان (C گوشه، E پیرامونی، I داخلی)، به عنوان مثال M17AC مدل سازه‌ای است که در آن M17 نماد اتصال هفدهم نشریه ۳۶۰، A بیانگر نوع حالت حدی حاکم (تسلیم ورق انتهایی) و C نشان‌دهنده موقعیت حذف ستون گوشه در پلان می‌باشد.

پس از انجام تحلیل مسیر جایگزین خرابی پیشرونده بر روی هر یک از مدل‌های نمونه، ابتدا منحنی ضریب بار-تغییرمکان سازه رسم شده است. منظور از تغییرمکان در این نمودارها، تغییرمکان قائم نقطه بالای ستون حذف‌شده می‌باشد. به نسبت بار وارده در هر گام از تحلیل استاتیکی غیرخطی به مقدار کل بار ثقلی سرویس آیین‌نامه‌ای خرابی پیشرونده، ضریب بار گفته می‌شود. پس هرگاه مقدار بار وارد بر سازه برابر با مقدار کل بار خرابی پیشرونده باشد، ضریب بار مساوی ۱ خواهد بود. در واقع اگر منحنی ضریب بار-تغییرمکان سازه‌ای بتواند تا ضریب بار ۱ به صورت صعودی پیش برود، آن سازه در برابر خرابی پیشرونده مقاوم محسوب می‌گردد و در غیر این صورت دارای مقاومت کافی برای مقابله با خرابی پیشرونده نخواهد بود.

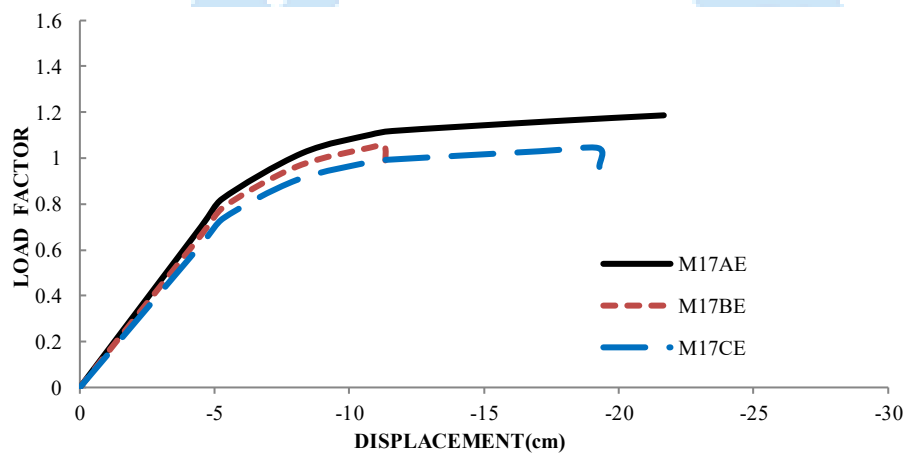
۱-۵- مقایسه نتایج تحلیل خرابی پیشرونده استاتیکی غیرخطی

در شکل ۸ منحنی‌های ضریب بار-تغییرمکان حالت‌های حدی اتصال به ازای حذف ستون در سه موقعیت گوشه، پیرامونی و داخلی ارائه شده است. جداول ۷، ۸ و ۹ خلاصه‌ای از نتایج تحلیل خرابی پیشرونده نمونه‌ها به ازای حذف ستون در هر سه موقعیت مذکور را به همراه تعداد مفاصل پلاستیک تشکیل شده نشان می‌دهند. با توجه به منحنی‌های نمودار شکل ۸-الف)، ب) و پ) به ازای حذف ستون در هر سه موقعیت گوشه، پیرامونی و داخلی، مطلوب‌ترین عملکرد در مقابل خرابی پیشرونده زمانی است که حالت حدی تسلیم ورق انتهایی (M17A) در اتصال حاکم باشد. در این حالت سازه در ضریب بار ۱/۴۲ ظرفیت باربری خود را از دست داده و دچار خرابی کلی می‌شود. ضریب بار سازه در تراز بار خرابی پیشرونده (کمترین مقدار ضریب بار متناظر با عدم ارضای ضوابط پذیرش UFC [۸]) برابر ۱/۳۰ می‌باشد. بنابراین مطابق معیارهای آیین‌نامه UFC می‌توان نتیجه گرفت که سازه در برابر خرابی پیشرونده مقاوم است. همچنین ضعیف‌ترین عملکرد در هر سه موقعیت حذف ستون مربوط به حالت حدی تسلیم جوش (M17C) با ضریب بار ۰/۹۶ بوده است. بنابراین در سازه‌های در معرض خرابی پیشرونده در صورت استفاده از اتصال ورق انتهایی پیچ‌شده، حالت حدی تسلیم ورق انتهایی دارای اطمینان بیشتری نسبت به سایر حالات حدی اتصال می‌باشد.

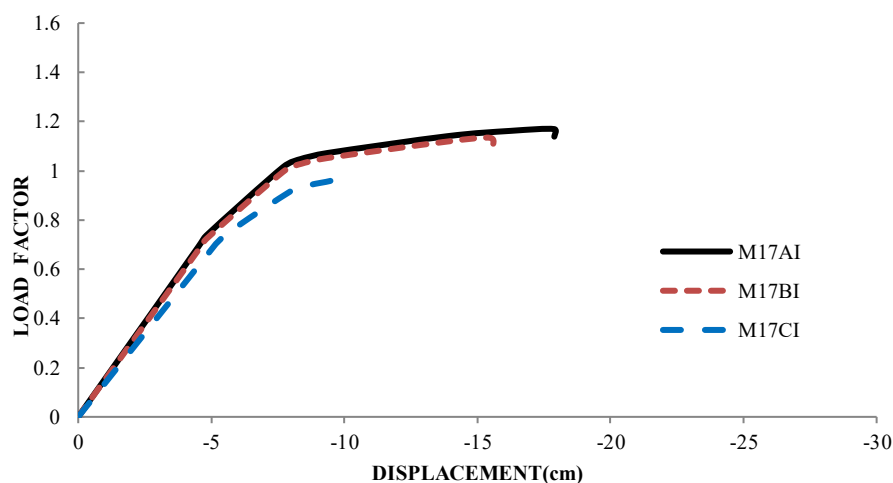
با توجه به نتایج جدول‌های ۷، ۸، ۹ و شکل ۸ استنباط می‌شود که در مدل سازه‌ای مورد مطالعه حذف ستون داخلی در تمامی حالت‌های حدی اتصال بسیار مخاطره‌آمیزتر از حذف ستون گوشه و پیرامونی می‌باشد چرا که در حالت حذف ستون داخلی تعداد اعضای مرتبط با محل حذف ستون یا به عبارت دیگر تعداد اعضای اصلی افزایش می‌یابد و اعضای اصلی بار بیشتری را تحمل کرده و همین عامل باعث افزایش مقدار خمش در اعضای مختلف سازه شده و لذا با توجه به پایین بودن ظرفیت دوران پلاستیک در اتصالات، سازه سریع‌تر دچار خرابی می‌شود.



الف: حذف ستون گوشه



ب: حذف ستون پیرامونی



پ: حذف ستون داخلی

شکل ۸: منحنی‌های ضریب بار - تغییر مکان حالت‌های جدی اتصال به ازای حذف ستون در سه موقعیت گوشه، پیرامونی و داخلی

نام مدل	تراز بار	ضریب بار	تغییر مکان قائم گره فوقانی ستون حذف شده (cm)	تعداد و محدوده مفاصل پلاستیک	
				اتصالات	تیر
نام مدل M17AE	تراز بار بار متناظر با معیار پذیرش UFC	ضریب بار 1.05	ستون حذف 17.2	B-IO(6), IO-LS(5) LS-CP(4)	تیر IO-LS(15)
				B-IO(6), IO-LS(5) LS-CP(4), D-E(1)	تیر IO-LS(15)
M17BE	تراز بار بار متناظر با معیار پذیرش UFC	ضریب بار 0.91	22.01	IO-LS(18) LS-CP(4)	تیر IO-LS(25)
				B-IO(3), IO-LS(17) LS-CP(4), D-E(1)	تیر IO-LS(25)
M17BC	تراز بار بار متناظر با معیار پذیرش UFC	ضریب بار 0.86	17.40	B-IO(6), IO-LS(22)	تیر B-IO(4), IO-LS(28)
				IO-LS(12)	تیر IO-LS(25)
M17CC	تراز بار بار متناظر با معیار پذیرش UFC	ضریب بار 1.14	21.67	LS-CP(10), D-E(1)	تیر B-IO(8), IO-LS(32)
				B-IO(4), IO-LS(36)	تیر B-IO(4), IO-LS(36)
	تراز بار بار فروریزش	ضریب بار 1.03	12.61	B-IO(6), IO-LS(22)	تیر IO-LS(25)
	تراز بار بار فروریزش	ضریب بار 1.16	13.63	LS-CP(10), D-E(1)	تیر IO-LS(25)
	تراز بار بار متناظر با معیار پذیرش UFC	ضریب بار 1.01	16.39	B-IO(4), IO-LS(36)	تیر B-IO(8), IO-LS(32)
	تراز بار بار فروریزش	ضریب بار 1.14	21.47	B-IO(4), IO-LS(14) LS-CP(10), D-E(1)	تیر B-IO(4), IO-LS(36)

جدول ۷: نتایج تحلیل استاتیکی غیرخطی به ازای حذف ستون گوشه

-	B-IO(6), IO-LS(24) LS-CP(2), D-E(2)	B-IO(4), IO-LS(32)	19.23	1.04	بار فروریزش	
---	--	--------------------	-------	------	-------------	--

جدول ۸: نتایج تحلیل استاتیکی غیرخطی به ازای حذف ستون پیرامونی

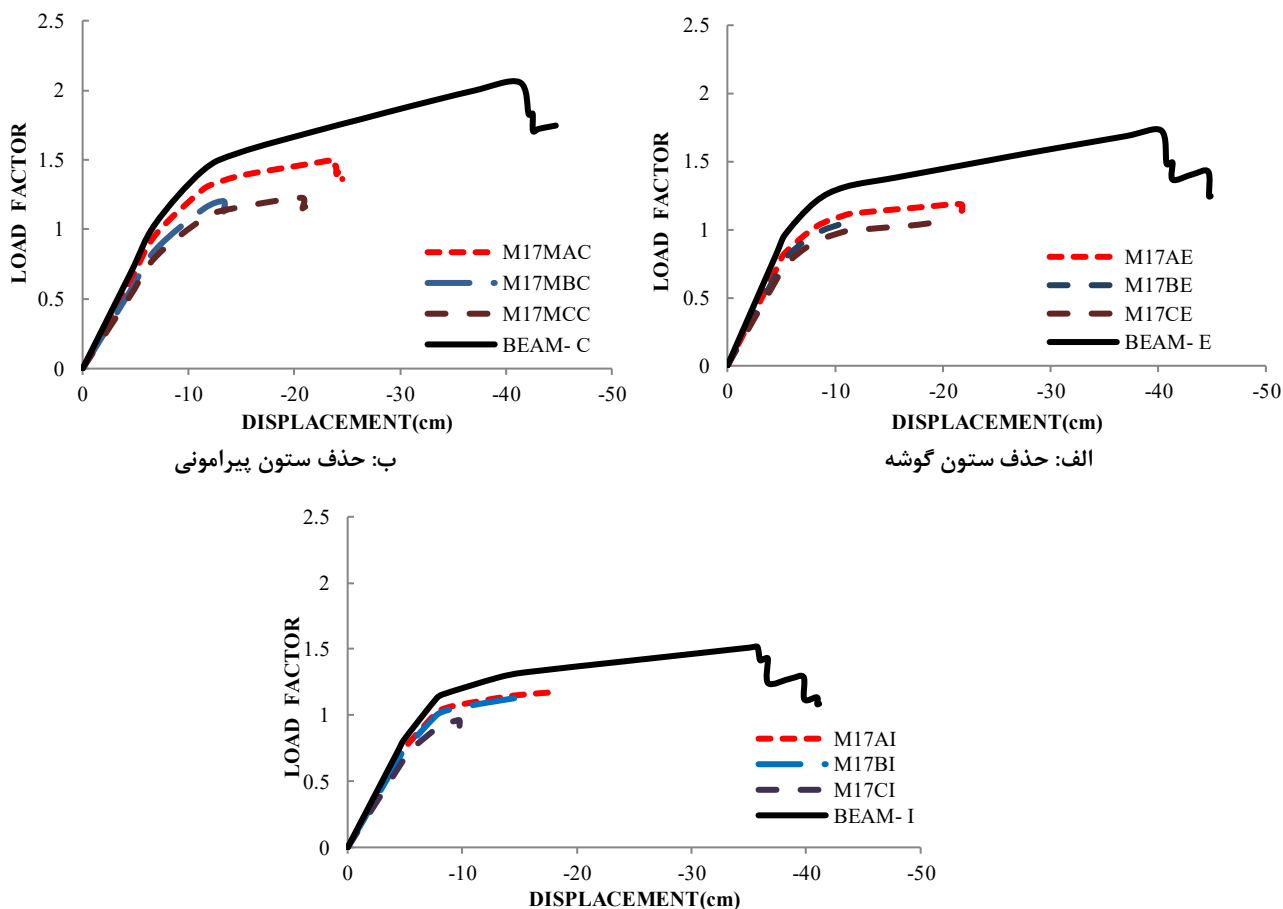
جدول ۹: نتایج تحلیل استاتیکی غیرخطی به ازای حذف ستون داخلی

نام مدل	تراز بار	ضریب بار	تغییر مکان قائم گره فوقانی ستون حذف شده (cm)	تعداد و محدوده مفاصل پلاستیک	
				تیر	اتصالات
M17AI	بار متناظر با معیار پذیرش UFC	1.02	15.02	IO-LS(15)	B-IO(6), IO-LS(5) LS-CP(2), CP-C(2)
	بار فروریزش	1.17	17.88	IO-LS(15)	B-IO(5), IO-LS(6) LS-CP(1), CP-C(2), D-E(1)
M17BI	بار متناظر با معیار پذیرش UFC	0.9	12.09	IO-LS(25)	B-IO(3), IO-LS(12)
	بار فروریزش	1.03	15.50	IO-LS(25)	B-IO(1), IO-LS(13), D-E(1)
M17CI	بار متناظر با معیار پذیرش UFC	0.83	7.43	B-IO(4), IO-LS(28)	B-IO(6), IO-LS(22), LS-CP(2)
	بار فروریزش	0.96	9.74	B-IO(4), IO-LS(28)	B-IO(6), IO-LS(24) LS-CP(2), D-E(2)

۲-۵- مقایسه نتایج تحلیل برای دو حالت مختلف مدل سازی مفاصل پلاستیک

در این بخش عملکرد دو حالت مختلف مدل سازی مفاصل پلاستیک در تحلیل مسیر جایگزین غیرخطی خرابی پیشرونده به ازای حذف ستون در موقعیت‌های مختلف گوشه، پیرامونی و داخلی بررسی و مقایسه شده است. در حالت اول، که در اینجا به اختصار "حالت مفاصل پلاستیک اعضا" نامیده شده است، مفاصل پلاستیک صرفاً برای اعضای تیر و ستون مدل سازی شده‌اند اما در حالت دوم، که در اینجا به اختصار "حالت مفاصل پلاستیک اعضا و اتصالات" نامیده شده است، مفاصل پلاستیک علاوه بر اعضای تیر و ستون برای اتصالات در حالات حدی مختلف نیز مدل سازی گردیده است. نتایج تحلیل مسیر جایگزین نمونه‌ها برای این دو حالت مختلف در شکل ۹ نشان داده شده است.

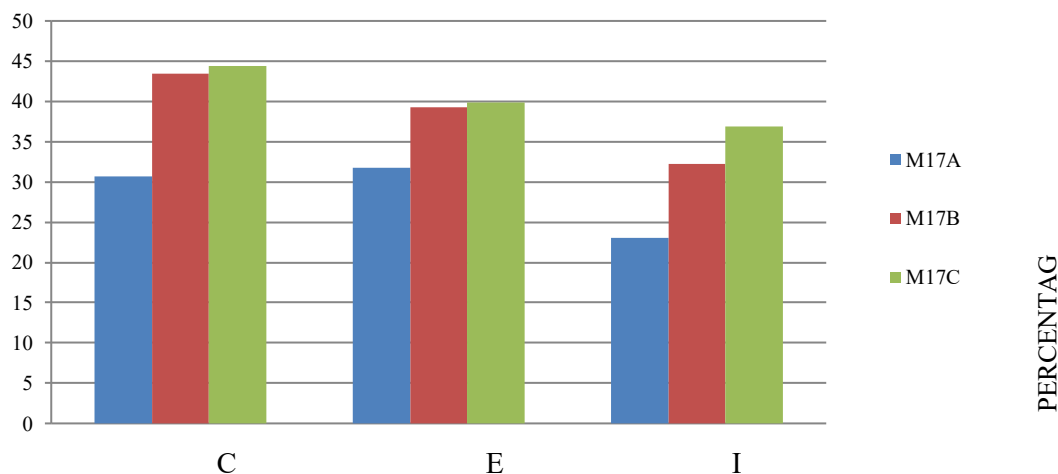
مطابق شکل ۹، در حالت دوم، یعنی حالت مفاصل پلاستیک اعضا و اتصالات، ضریب بار ماکزیمم به دست آمده به ازای حالت‌های حدی مختلف اتصالات همواره کمتر از ضریب بار ماکزیمم حالت اول، یعنی حالت مفاصل پلاستیک اعضا، می‌باشد و این امر ناشی از افزایش ضریب دینامیکی در حالت دوم و کم بودن ظرفیت دوران پلاستیک اتصالات می‌باشد. طبق جدول ۱۰ مشاهده می‌شود که ضریب بار ماکزیمم نظیر حالت اول در موقعیت‌های مختلف حذف ستون گوشه، پیرامونی و داخلی، به ترتیب برابر با ۲/۰۵، ۱/۷۳ و ۱/۵۲ بوده و برای حالت دوم به ترتیب ۱/۴۲، ۱/۱۸ و ۱/۱۷ می‌باشد نمودار شکل ۱۰ درصد کاهش مقاومت را برای حالات حدی مختلف اتصالات در موقعیت‌های مختلف حذف ستون نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود در هنگام مدل سازی و طراحی سازه در برابر خرابی پیشرونده، چنانچه مفاصل پلاستیک صرفاً برای اعضای تیر و ستون مدل شوند به ازای موقعیت‌های مختلف حذف ستون، عملاً مقاومت خرابی پیشرونده سازه حدود ۰۳/۲۳٪ تا ۳۹/۴۴٪ بیشتر در نظر گرفته می‌شود و در صورت بروز حادثه، خرابی‌ها خارج از حد انتظار در سازه رخ خواهد داد و سازه از مقاومت کافی در برابر خطر بروز خرابی پیشرونده برخوردار نخواهد بود.



شکل ۹: مقایسه رفتار خرابی پیشرونده سازه در حالات مختلف مدل سازی مفاصل پلاستیک اعضا و اتصالات

جدول ۱۰: خلاصه نتایج تحلیل خرابی پیشرونده به ازای حالات مختلف مدل سازی مفاصل پلاستیک اعضا و اتصالات

نتایج به ازای حذف ستون داخلی			نتایج به ازای حذف ستون پیرامونی			نتایج به ازای حذف ستون گوشه			مدل
درصد کاهش ظرفیت سازه	ضریب بار ماکزیمم	تغییر مکان قائم گره فوقانی ستون حذف شده (سانتیمتر)	درصد کاهش ظرفیت سازه	ضریب بار ماکزیمم	تغییر مکان قائم گره فوقانی ستون حذف شده (سانتیمتر)	درصد کاهش ظرفیت سازه	ضریب بار ماکزیمم	تغییر مکان قائم گره فوقانی ستون حذف شده (سانتیمتر)	
-----	1.52	35.74	-----	1.73	40.26	-----	2.05	41.27	Beam
23.03	1.17	17.88	31.79	1.18	21.67	30.73	1.42	24.51	M17A
32.24	1.03	9.74	39.31	1.05	11.3	43.41	1.16	13.63	M17B
36.84	0.96	15.5	39.88	1.04	19.23	44.39	1.14	21.47	M17C



شکل ۱۰: درصد کاهش مقاومت حالت‌های حدی مختلف اتصال در موقعیت‌های مختلف حذف ستون



۶- نتیجه‌گیری

در این مطالعه تاثیر مدل‌سازی مفاصل پلاستیک اتصالات نیمه‌صلب از نوع ورق انتهایی پیچ‌شده بر ارزیابی مقاومت خرابی پیشرونده سازه قاب خمشی فولادی به روش تحلیل مسیر جایگزین استاتیکی غیرخطی آیین‌نامه UFC، مورد بررسی قرار گرفته است. مفاصل پلاستیک در دو حالت مختلف تعریف و مدل‌سازی شدند در حالت اول مفاصل پلاستیک صرفاً برای اعضا مدل‌سازی شد، در حالت دوم مفاصل پلاستیک به طور همزمان برای اتصالات و اعضای تیر و ستون تعریف و مدل‌سازی شدند، سپس نتایج تحلیل خرابی پیشرونده مربوط به هر دو حالت برای حالات حدی مختلف خرابی اتصال و به ازای حذف ستون در موقعیت‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفت. اهم نتایج حاصل از این پژوهش در حوزه مدل‌های سازه‌ای مورد بررسی به شرح زیر می‌باشد:

۱- با تعریف همزمان مفاصل پلاستیک برای اعضای تیر و ستون و اتصالات مربوطه، مقاومت خرابی پیشرونده به دست آمده از تحلیل مسیر جایگزین نمونه‌ها، در مقایسه با حالتی که مفاصل پلاستیک صرفاً برای اعضای تیر و ستون تعریف شوند، کاهش پیدا می‌کند، بنابراین تعریف مفاصل پلاستیک اتصالات در ارزیابی مقاومت قاب‌های خمشی در برابر خرابی پیشرونده دارای تاثیر تعیین‌کننده است. در روال معمول طراحی، اتصالات برای ظرفیت لنگر خمشی پلاستیک بزرگتری نسبت به تیرها طراحی می‌شوند، از اینرو در صورت مدل‌سازی هر دو مفصل پلاستیک اتصال و تیر در سازه، هرچند که در ابتدا مفصل پلاستیک خمشی در انتهای عضو تیر تشکیل می‌شود ولی با افزایش تغییرشکل‌های ناشی از بارهای وارده، امکان تشکیل مفصل پلاستیک در محل اتصال فراهم می‌آید که این امر به علت کوچک بودن ظرفیت دوران پلاستیک و شکل‌پذیری اتصال در تغییرشکل‌های بالا می‌تواند رخ دهد.

۲- مقدار ضریب افزایش دینامیکی Ω_N محاسبه شده در حالت مدل سازی مفاصل پلاستیک اعضا و اتصالات همواره از حالتی که مفاصل پلاستیک صرفاً برای اعضا مدل سازی می شوند بزرگتر بوده و در نتیجه ضریب افزایش دینامیکی محاسبه شده بر اساس مشخصات اتصالات، در تحلیل مسیر جایگزین استاتیکی غیرخطی حاکم خواهد بود. در سازه نمونه مورد بررسی، ضریب افزایش دینامیکی با در نظرگیری مفصل پلاستیک صرفاً برای اعضا برابر ۱/۱۶۶ و در صورت تعریف مفاصل پلاستیک برای اعضا و اتصالات، این ضریب برای حالت های حدی مختلف خرابی اتصالات برابر با ۱/۲۶۲، ۱/۴۱۶ و ۱/۵۰ بود.

۳- در هر سه موقعیت حذف ستون (گوشه، داخلی و پیرامونی)، در جابجایی های یکسان، ضریب بار در حالت حدی تسلیم ورق انتهایی بیشتر از حالت حدی تسلیم پیچ و ضریب بار مربوط به حالت حدی تسلیم پیچ بیشتر از حالت حدی تسلیم جوش بوده است. بنابراین در نمونه های مورد بررسی ضعیف ترین عملکرد مربوط به حالت حدی تسلیم جوش بوده و حالت حدی تسلیم ورق انتهایی بهترین عملکرد را از نظر مقاومت در برابر خرابی پیشرونده از خود نشان داده است.

۴- در حالت مدل سازی مفاصل پلاستیک اتصالات نیمه صلب از نوع ورق انتهایی پیچ شده، ظرفیت خرابی پیشرونده سازه در مقایسه با حالتی که مفاصل پلاستیک صرفاً برای اعضا مدل سازی می شوند به میزان ۲۳/۰۳٪ تا ۴۴/۳۹٪ کاهش یافته است. لذا مدلسازی مفاصل پلاستیک اتصالات در برابر اعضا باید به عنوان یک اصل بسیار مهم پذیرفته شود و در طراحی مقاوم در برابر خرابی پیشرونده لحاظ گردد.



مراجع:

- [1] Allen, D.E. and Schriever, W.R. (1972). *Progressive Collapse, Abnormal loads and buildings codes. Structural failure*. Ohio: ASCE National Meeting on Structural Engineering, 21-47
- [2] Kiakojouri, F., De Biagi V., Chiaia B. and Sheidaii M. R. (2020). Progressive collapse of framed building structures: Current knowledge and future prospects. *Engineering Structures*, 206, 110061.
- [3] Kiakojouri F., De Biagi V., Chiaia B. and Sheidaii M. R. (2022). Strengthening and retrofitting techniques to mitigate progressive collapse: A critical review and future research agenda. *Engineering Structures*, 262, 114274
- [4] Taewan, K. and Jinkoo, K. (2009). Collapse analysis of Steel Moment Frames with Various Seismic Connections. *Journal of Constructional Steel Research*, 65, 1316-1322.
- [5] Lee, SY., Noh, SY. and Lee D. (2021). Comparison of progressive collapse resistance capacities of steel ordinary and intermediate moment frames considering different connection details. *Engineering Structures*, 231, 111753.
- [6] GSA, U. (2003). *Progressive collapse analysis and design guidelines for new federal office buildings and major modernization projects*. Washington, DC.
- [7] Salmasi, A., Sheidaii, M. R., Saghale Sahebalzaman, M. and Tariverdilo, S. (2020). Effect of fully restrained beam-to-column connection on the progressive collapse strength of steel moment frames. *Advances in Structural Engineering*, 23 (8), 1656-1668.
- [8] DOD (Department of Defence). (2009). *Design of buildings to resist progressive collapse*, Unified Facilities Criteria (UFC) 4-023-03.
- [9] American society of civil engineers (ASCE 41). (2017). *Seismic evaluation and retrofit of existing buildings*, New York: ASCE41-17.
- [10] Cortes, G. Liu, J. (2017). Behavior of conventional and enhanced gravity connections subjected to column loss. *Journal of Constructional Steel Research*, 133, 475-484.
- [11] American Society of Civil Engineers (ASCE 7). (2016). *Minimum design loads for buildings and other structures*, New- York: ASCE7-16.
- [12] Barmaki, S., Sheidaii, M. R., and Azizpour, O. (2022). Progressive collapse resistance of steel moment frames with different types of beam-to-column welded connections in various column removal scenarios. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 9(6), 51-79
- [13] Barmaki, S., Sheidaii, M. R., and Azizpour, O. (2020). Progressive Collapse Resistance of Bolted Extended End-Plate Moment Connections. *International Journal of Steel Structures*, 20 (4), 1-15.
- [14] Aksoylar, N. Elnashia, A. and Mahmoud, H. (2011). The design and seismic performance of low-rise long-span frames with semi-rigid connection. *Journal of Constructional Steel Research*, 67 (1), 114-126.
- [15] Salmasi A., Sheidaii M.R. and Tariverdilo S, (2021), Performance of Fully Restrained Welded Beam-Column Connections Subjected to Column Loss. *International Journal of Steel Structures*, 21(4), 1370-1382.
- [16] Prestandard, F. E. M. A. (2000). *Commentary for the seismic rehabilitation of buildings (FEMA356)*. Washington, DC: Federal Emergency Management Agency, 7.
- [17] UFC. (2016). *Design of buildings to resist progressive collapse*. 4-023-03, Department of Defense (DOD), Washington, D.C., VA: Unified Facility Criteria.
- [18] ANSI/AISC 341-16. (2016). *Seismic provisions for structural steel buildings*. American Institute of Steel Construction, Chicago.
- [19] ANSI/AISC 360. (2016). *Specifications for structural steel buildings*. American Institute of Steel Construction, Chicago.
- [20] ETABS. (2000). *Reference manual*. CSI (Computers and Structures Inc), Berkeley.

- [21] SAP2000. (2014). *Integrated structural analysis and design Inc.* Computers and Structures, version 16.0.0, Berkeley.
- [22] Mohamed, OA. (2015). Calculation of load increase factors for assessment of progressive collapse potential in framed steel structures. *Journal of Structural Engineering*, 3, 11-18.
- [23] Kim, J. and Hee Park, J. (2011). Sensitivity analysis of steel buildings subjected to column loss. *Engineering Structures*, 33, 421-432.
- [24] Kim, J. and Lee, H. (2013). Progressive Collapse-Resisting capacity of framed structures with infill steel panels. *Journal of Constructional Steel Research*, 89, 145-152.

