

Effects of plastic hinges modelling of fully restrained connections in the progressive collapse resistance of steel moment frames

Mohammad saghaie sahebalzaman¹, Mohammad Reza sheidaii^{2*}, Alireza salmasi³

1- Master of Science, Department of Civil Engineering, Urmia University, Urmia, Iran

2- Professor, Department of Civil Engineering, Urmia University, Urmia, Iran

3- Ph.D. Candidate of Structure Engineering, Department of Civil Engineering, Urmia University, Urmia, Iran

ABSTRACT

Nowadays, the using of steel moment frames has been considered as an effective lateral load-resisting system against seismic forces. In this research, the effect of plastic hinges modelling of fully restrained connections has been evaluated on the strength of steel moment frame structures against progressive collapse. In order to assessment of the progressive collapse performance of sample structures, two structural models of 3 and 5-story buildings were designed and then the definition and modelling of plastic hinges have been done in two different modes. In the first mode, plastic hinges were modelled only for the beam and column members. In the second mode, plastic hinges were considered for the connections in addition to the beam and column members. The Five different types of investigated connections included WFP, WBH, WCPinWUF, WUF-B, Welded top and bottom haunch. The progressive collapse resistance of these buildings against sudden removal of internal and external column was separately studied using nonlinear static alternate path method presented in the UFC standard. The results of analysis indicated that if the plastic hinges of connections are separately defined in addition to the plastic hinges of beams and columns, the structure will have lower progressive collapse strength, and the resistance of the structure tends to its actual value. Simultaneous modelling of plastic hinges for connections and members at least 20% and maximum 37% affects the reduction of structural strength against progreive collapse. Therefore, the modelling of plastic hinges for connections and members simultaneously should be considered as a important regulation. According to the comparative results, the WCPinWUF and WUF-B connection respectively demonstrated that the most desirable behaviour and the weakest performance against the progressive collapses.

ARTICLE INFO

Receive Date: 08 May 2019

Revise Date: 20 May 2019

Accept Date: 29 May 2019

Keywords:

Progressive Collapse

Steel moment frame

Plastic hinge

Alternative path method

Nonlinear static analysis

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/JSCE.2019.184813.1855

*Corresponding author: Mohammad Reza Sheidaii.

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

اثرات مدل سازی مفاصل پلاستیک اتصالات صلب بر مقاومت خرابی پیشرونده قاب‌های خمشی فولادی

محمد سقای صاحب الزمان^۱، محمد رضا شیدایی^{۲*}، علیرضا سلماسی^۳

۱- کارشناسی ارشد، مهندسی عمران- سازه، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

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

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

چکیده

امروزه استفاده از سیستم های قاب خمشی فولادی به عنوان یک سیستم باربر جانبی کارآمد در برابر نیروهای لرزه ای مورد توجه قرار گرفته است. در این مطالعه تاثیر مدل سازی مفاصل پلاستیک اتصالات صلب بر مقاومت سازه های قاب خمشی فولادی در برابر خرابی پیشرونده بررسی شده است. برای مطالعه رفتار خرابی پیشرونده ساختمان های نمونه، دو مدل سازه ۳ و ۵ طبقه طراحی شده و سپس تعریف و مدل سازی مفاصل پلاستیک در دو حالت مختلف انجام شده است. در حالت اول مفاصل پلاستیک صرفاً برای اعضای تیر و ستون مدل سازی شدند و در حالت دوم مفاصل پلاستیک علاوه بر اعضای تیر و ستون برای اتصالات نیز در نظر گرفته شده اند. اتصالات بررسی شده شامل پنج نوع مختلف اتصال صلب شامل *WUF-B*، *WCPinWUF*، *WBH*، *WFP* و *Welded top and bottom haunch* بودند. ارزیابی پتانسیل خرابی پیشرونده سازه های مذکور به ازای حذف ستون های پیرامونی و داخلی به روش مسیر جایگزین استاتیکی غیرخطی مطابق آیین نامه *UFC* انجام گرفته است. نتایج تجزیه و تحلیل ها نشان می دهند که با تعریف و اعمال همزمان مفاصل پلاستیک در محل اتصالات و اعضای تیر و ستون، سازه مقاومت کمتری در برابر خرابی پیشرونده از خود نشان می دهد و مقاومت سازه به مقدار واقعی خود نزدیک تر می شود. مدل سازی همزمان مفاصل پلاستیک برای اتصالات و اعضا در کمترین حالت ۲۰٪ و در بیشترین حالت ۳۷٪ بر روی کاهش مقاومت سازه در برابر خرابی پیشرونده تاثیر می گذارد. لذا مدل سازی مفاصل پلاستیک اتصالات و اعضا به صورت همزمان باید به عنوان یک اصل بسیار مهم در نظر گرفته شود. با توجه به نتایج مقایسه ای می توان نتیجه گرفت که اتصال *WUF-B* و *WCPinWUF* به ترتیب بهترین رفتار و ضعیف ترین عملکرد را نسبت به سایر اتصالات در برابر خرابی پیشرونده نشان می دهند.

کلمات کلیدی: خرابی پیشرونده، قاب خمشی فولادی، مفصل پلاستیک، روش مسیر جایگزین، تحلیل استاتیکی غیرخطی

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	10.22065/JSCE.2019.184813.1855	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2019.184813.1855	۱۴۰۰/۰۱/۳۰	۱۳۹۸/۰۳/۰۸	۱۳۹۸/۰۳/۰۸	۱۳۹۸/۰۲/۳۰	۱۳۹۸/۰۲/۱۸
				*نویسنده مسئول:		
				محمدرضا شیدایی		
				m.sheidaii@urmia.ac.ir		
				پست الکترونیکی:		

۱- مقدمه

ایمنی سازه‌های همیشه یکی از مهمترین دغدغه‌های ذهنی برای طراحی پروژه‌های مهندسی عمران بوده است. یکی از مکانیزم‌های شکست سازه‌ای که توجه زیادی در دهه‌های اخیر به خود جلب کرده است، خرابی پیشرونده است. خرابی پیشرونده یک پدیده دینامیکی است که به صورت گسترش زنجیروار خرابی‌ها در سازه بروز می‌یابد. خرابی ایجاد شده نامتناسب با عامل ایجاد کننده و آغازگر آن است و از حداقل یک عضو بحرانی سازه‌ای شروع شده و بطور پیوسته به سایر اعضای سازه گسترش می‌یابد و در نهایت باعث خرابی کلی یا بخش اعظمی از سازه می‌گردد [1]. در پدیده خرابی پیشرونده تحت اثر بارهای غیرعادی نظیر اضافه بار، انفجار و غیره، یک خرابی موضعی در سازه ایجاد می‌شود. 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.

مطالعات نشان می‌دهد که ۲۰٪ کل خرابی‌ها در آمریکا و حدود ۱۵٪ کل خرابی‌ها در کانادا، در سال‌های اخیر ناشی از پدیده خرابی پیشرونده بوده است [2]. این پدیده بدلیل طبیعت فاجعه‌آمیز پیامدهایش و نیز احتمال بالای وقوع آن، به تدریج در استانداردهای طراحی مورد توجه قرار گرفته است. برای اولین بار توجه جامعه مهندسی با خرابی قسمتی از ساختمان Ronan Point واقع در لندن در سال ۱۹۶۸ به خرابی پیشرونده جلب شد. زمینه پاسخ سازه‌ای به حوادث غیرعادی بعد از واقعه فروریزش برج‌های ساختمان تجارت جهانی در ۱۱ سپتامبر سال ۲۰۰۱ مورد توجه بیشتری قرار گرفت. تفکر مجدد و اصلاح استانداردهای مربوط به مراحل طراحی خرابی پیشرونده، توجه محققین در مؤسسات مختلف را به خود معطوف ساخت. به عنوان مثال مطالعاتی فنی در این زمینه توسط دپارتمان دفاع ایالات متحده DOD یا UFC [3] و GSA [4] و تدوین کننده‌های آیین‌نامه‌های اروپایی صورت گرفته است.

Cortes و همکاران [5] رفتار قاب‌های ساده ساختمانی فولادی با اتصالات ساده که عمدتاً برای انتقال برش ناشی از بارهای ثقلی طراحی می‌شوند را تحت سناریوی حذف ناگهانی ستون مورد مطالعه قرار دادند. در این تحقیق اشاره شد که تحت سناریوی حذف ستون، بارهای محوری بسیار بزرگی در اتصالات ایجاد می‌شوند که به مراتب بیشتر از نیروهای برشی هستند که اتصال برای آن طراحی شده است. در این مقاله ده نمونه سازه‌ای با پنج نوع اتصال مختلف به صورت آزمایشگاهی در اثر حذف ناگهانی ستون مورد بررسی قرار گرفت. اتصالات ساده معمولی ظرفیت بسیار پایینی را در برابر ترکیب بار خرابی پیشرونده تعریف شده در آیین‌نامه UFC از خود نشان دادند از اینرو برای تقویت اتصال در برابر خرابی پیشرونده دو ورق تقویتی در امتداد بال تیر به بال ستون در ناحیه اتصال نصب گردید.

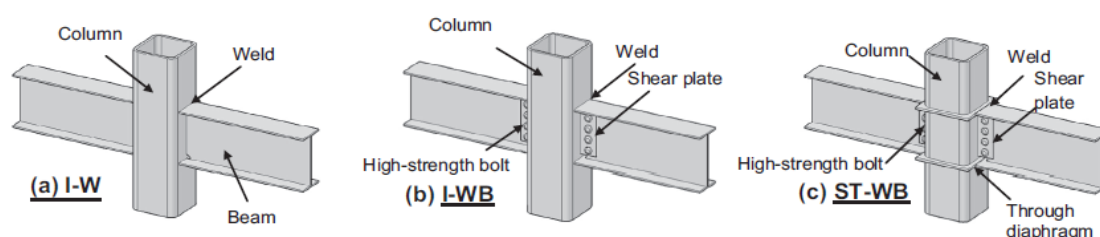
Wang و همکاران [6] اتصال تیر به ستون SHS در برابر خرابی پیشرونده را در قالب یک تحقیق جامع آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار دادند. ۳ نوع اتصال بررسی شده در این مقاله در شکل ۱ نشان داده شده‌اند. نتایج آزمایشات نشان داد که هر سه مدل اتصال عملکرد رضایت‌بخشی را در برابر حذف ستون دارند. نمونه I-WB بالاترین تغییر شکل در برابر خرابی اولیه را نشان داد و نمونه ST-WB به دلیل انعطاف پذیری کمتر و تنش بالاتر سریع‌تر در برابر خرابی اولیه تسلیم شد و نمونه I-W نیز انعطاف پذیری بسیار خوبی را به عنوان یک اتصال جوشی در مقابل خرابی اولیه از خود نشان داد. نتایج آزمایش هم‌چنین نشان داد که در میان این سه نوع اتصال، I-WB عملکرد بهتری در برابر خرابی پیشرونده نسبت به اتصالات دیگر دارد.

Yang و همکاران [7] هفت نوع اتصال رایج تیر به ستون فولادی پیچی را به صورت آزمایشگاهی تحت سناریوی حذف ستون میانی بررسی کردند. در این مقاله رفتار و مدهای شکست اتصالات مختلف با در نظرگیری توانایی آنها در تشکیل مدهای شکست زنجیره‌ای بررسی شد. نتایج نشان داد که اگر اثر دوران‌های بزرگ در مرحله‌ی طراحی در نظر گرفته نشود ممکن است اتصالاتی که دارای ظرفیت دوران کمتری هستند تحت اثر سناریوی حذف ستون به سرعت دچار خرابی شوند.

Jalali و Yasrebi [8] کارکرد اتصالات جوشی خمشی در سازه‌های فولادی در برابر خرابی ستون را مورد مطالعه قرار دادند. در این مقاله عملکرد چهار اتصال خمشی پیشنهاد شده در آیین‌نامه FEMA350 که برای نیروهای لرزه‌ای مناسب است شامل WFP، WUF،

W, FF و RBS در برابر خرابی ناگهانی ستون بررسی شدند. تحلیل عددی استفاده شده ابتدا با نتایج آزمایشگاهی که در سال ۲۰۱۰ به وسیله ی موسسه NIST انجام شده مقایسه شده است. نتایج نشان داد که فرضیات استفاده شده در مدل عددی، مطابقت خوبی با مدل آزمایشگاهی دارد. اتصال RBS مقاومت کمتری نسبت به سایر اتصالات دارد و با نیروی کمتری به تغییر مکان بیشینه می رسد. در حالی که اتصال FF و اتصال WUF-W از نظر کارکرد شبیه هم بوده و مقاومت بیشتری نسبت به اتصال RBS دارند. اتصال WFP نسبت به اتصالات WUF-W, FF و RBS در برابر خرابی ستون مقاومت بیشتری دارد بگونه ای که ظرفیت باربری این اتصال در اثر خرابی ستون، دو برابر سایر اتصالات بوده و بر اساس نتایج به دست آمده، این اتصال قابل استفاده در سازه های با سطح محافظت بالا در برابر خرابی پیشرونده است.

در تمامی تحقیقات انجام گرفته بر این نکته تاکید شده است که نوع رفتار اتصالات در برابر خرابی پیشرونده متفاوت از رفتار آنها در برابر بار لرزه ای است و عمده نتایج از مدل های آزمایشگاهی استخراج شده است. هدف این مقاله ارزیابی عملکرد سازه با سیستم باربر جانبی قاب خمشی فولادی مجهز به انواع اتصالات صلب لرزه ای در برابر خرابی پیشرونده به صورت تحلیل عددی است، با این تفاوت که در این حالت هم مفصل پلاستیک اتصالات و هم مفصل پلاستیک اعضای تیر و ستون در سازه مدل سازی شده است.

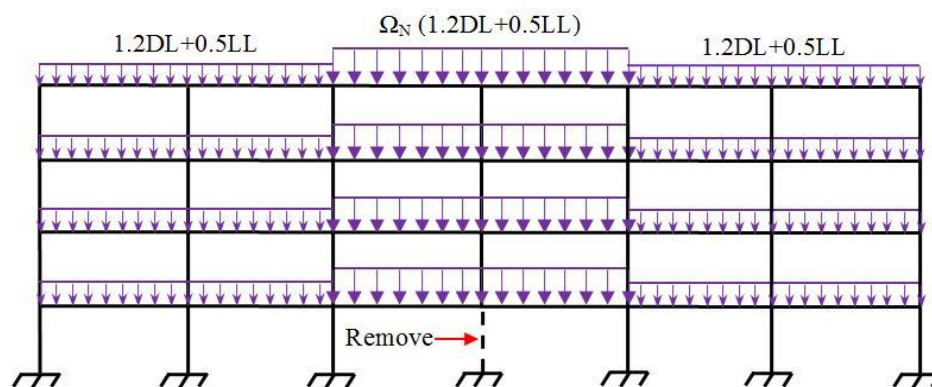


شکل ۱: انواع اتصال تیر به ستون SHS در نظر گرفته شده در مطالعه وانگ

در این مقاله، عملکرد مقاومت سیستم قاب خمشی فولادی متوسط با پنج نمونه اتصال صلب مختلف در برابر حذف ناگهانی یک ستون با استفاده از تحلیل مسیر جایگزین استاتیکی غیرخطی آیین نامه UFC مورد ارزیابی قرار گرفته است. در تحلیل استاتیکی غیرخطی (PUSH-DOWN) ستون مورد نظر از همان ابتدا از مدل تحلیلی حذف شده و سازه تحت بارگذاری نشان داده شده در شکل ۲ قرار می گیرد. برای دهانه های مرتبط با محل حذف ستون از ترکیب بار $\Omega_N(1.2DL+0.5LL)$ استفاده شده و برای دهانه های غیرمرتبط با محل حذف ستون از ترکیب بار $(1.2DL+0.5LL)$ استفاده می شود. آیین نامه UFC برای تحلیل استاتیکی، استفاده از ضریب افزایش دینامیکی Ω_N را در ترکیب بار گرانشی توصیه می کند که مقدار آن از رابطه ۱ به دست می آید [9].

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

در رابطه ۱ پارامتر θ_y چرخش حد تسلیم و θ_{pra} زاویه دوران پلاستیک می باشد.



شکل ۲: بارگذاری در تحلیل استاتیکی غیرخطی طبق UFC2016

در روش تحلیل مسیر جایگزین استاتیکی غیرخطی، عملکرد سازه‌ها در برابر خرابی پیشرونده بدین صورت ارزیابی می‌شود که بارگذاری سازه به صورت تدریجی افزایش می‌یابد تا اینکه در نهایت سازه تحت الگوی بار پیشنهادی آیین‌نامه به مرز فروریزش برسد [10]. برای تحلیل غیرخطی خرابی پیشرونده، رفتار غیرخطی مصالح با اختصاص مفاصل پلاستیک (plastic hinge) به اعضا، در نرم‌افزار SAP2000 [11] تعریف می‌شود. به طور کلی در مدل‌های سازه‌ای مورد بررسی سه نوع مفصل پلاستیک برای اتصالات، تیر و ستون تعریف شده است.

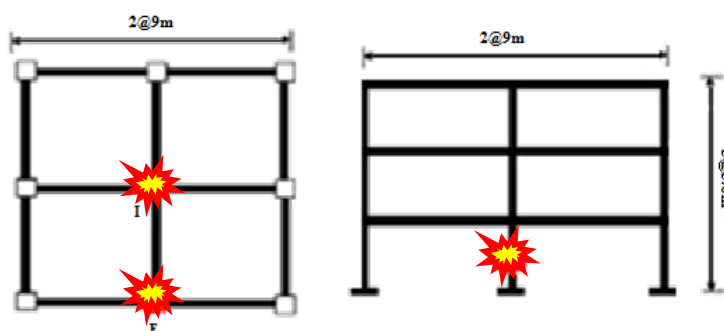
در آیین‌نامه UFC اعضای مختلف سازه‌ای به صورت اعضای اصلی و ثانویه شناخته می‌شوند. اعضای اصلی، اعضای هستند که تأمین کننده ظرفیت سازه در برابر خرابی ناشی از حذف یک عضو برابر قائم می‌باشند. سایر اعضای سازه اعضای ثانویه هستند. برای تحلیل‌های غیرخطی، آیین‌نامه UFC مقدار حداکثر دوران مفاصل پلاستیک را برای اعضای اصلی به عنوان معیار پذیرش برای خرابی پیشرونده تعیین می‌کند. جدول ۱ معیارهای پذیرش اعضای مختلف سازه‌ای در سیستم قاب خمشی فولادی را نشان می‌دهد.

جدول ۱: معیارهای پذیرش اعضای مختلف سازه‌ای در تحلیل خرابی پیشرونده

Component	Performance level (UFC2016)
Steel beams	CP
Steel columns	LS
Connection	CP

۲- معرفی مدل‌های تحلیلی

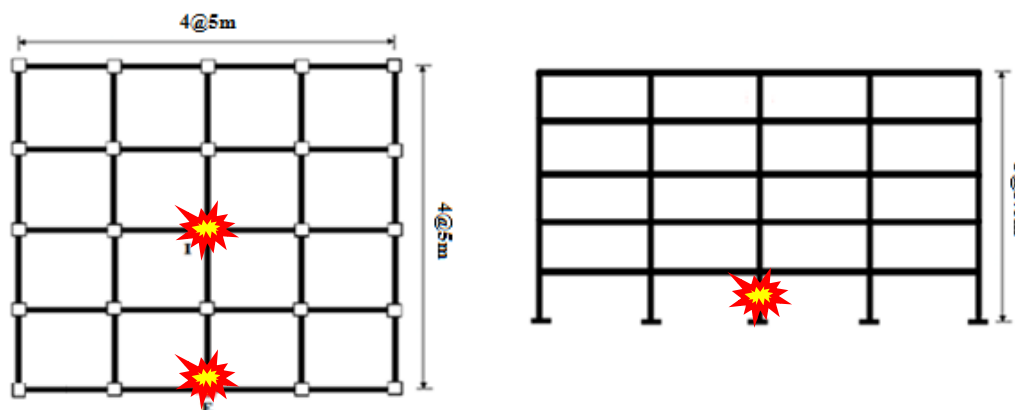
در این مطالعه آسیب پذیری دو ساختمان ۳ و ۵ طبقه با سیستم باربر جانبی قاب خمشی فولادی دارای شکل پذیری متوسط در برابر خرابی پیشرونده با استفاده از روش مسیر بار جایگزین آیین‌نامه UFC مورد بررسی قرار گرفته است. کاربری ساختمان‌ها مسکونی بوده و ارتفاع طبقات ۳/۶ متر است. ساختمان‌های ۳ و ۵ طبقه به ترتیب با تعداد دهانه‌های ۲ و ۴ با طول دهانه‌های به ترتیب ۹ و ۵ متر به صورت متقارن در دو راستا طراحی شده‌اند. شکل‌های ۳ و ۴ به ترتیب پلان سازه‌های ۳ و ۵ طبقه طراحی شده را نشان می‌دهند. جنس مصالح فولادی برای ستون‌ها و تیرهای هر دو سازه به ترتیب SM490 با $(F_y=325 \times 10^5 \text{Kgf/m}^2, F_u=490 \times 10^5 \text{Kgf/m}^2)$ و SS400 با $(F_y=240 \times 10^5 \text{Kgf/m}^2, F_u=400 \times 10^5 \text{Kgf/m}^2)$ می‌باشند. در تمامی مدل‌ها حذف ستون به ازای حذف ستون داخلی (I) و ستون پیرامونی (E) در طبقه اول سازه‌ها انجام شده است.



ب) پلان

الف) نما

شکل ۳: نمای ارتفاع و پلان ساختمان ۳ طبقه

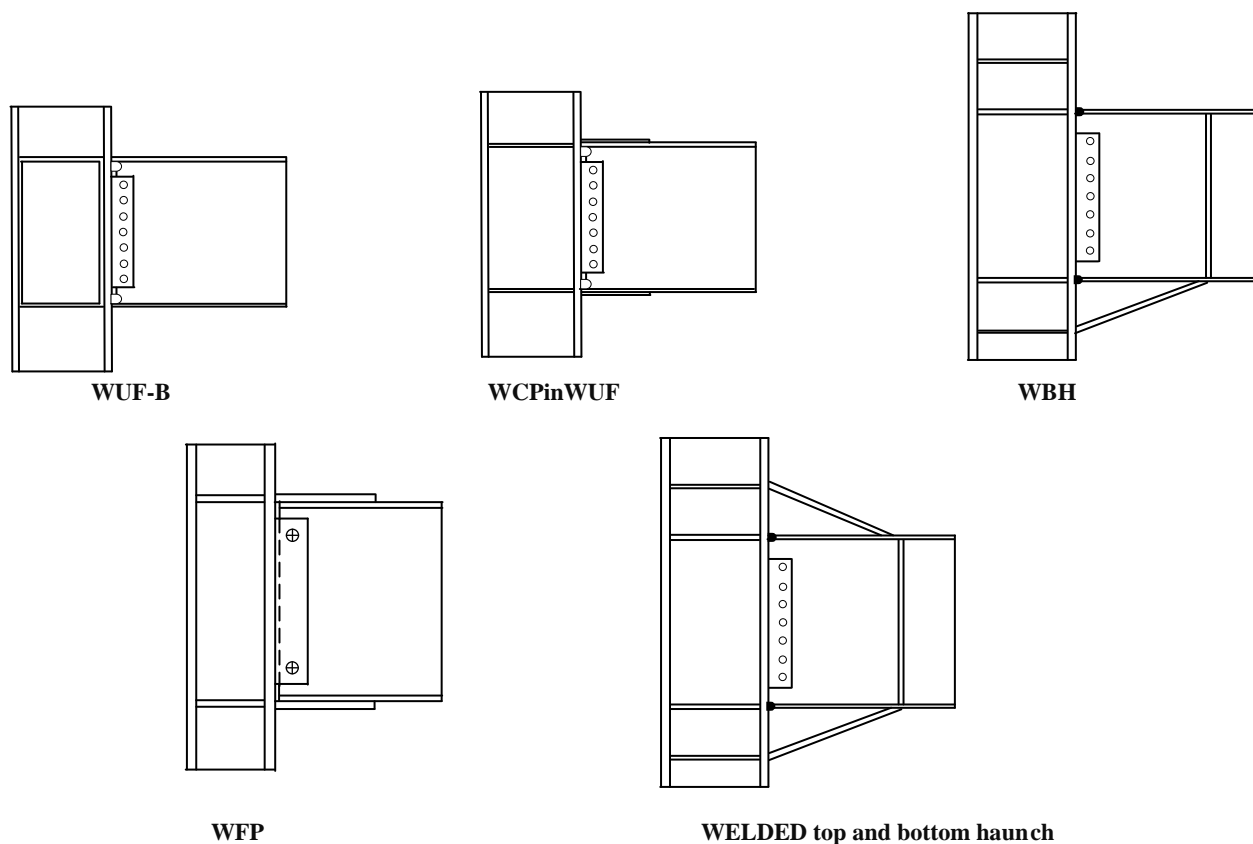


ب) پلان

الف) نما

شکل ۴: نمای ارتفاع و پلان ساختمان ۵ طبقه

در هر یک از مدل‌های سازه‌ای مذکور از پنج نوع اتصال صلب مختلف شامل WUF-B, WCPinWUF, WBH, WFP و Welded top and bottom haunch استفاده شده است که نمای شماتیک این اتصالات در شکل ۵ نشان داده شده است. در این مطالعه برای بارگذاری ثقلی و جانبی از آیین‌نامه ASCE7-10، برای طراحی اعضای فولادی از AISC360 [12] و AISC341 [13] استفاده گردیده است. بارهای مرده و زنده طراحی در تمامی طبقات به ترتیب ۵/۵ و ۲ کیلونیوتن بر مترمربع در نظر گرفته شده است. اعضای تیر و ستون برای ساختمان ۳ و ۵ طبقه به ترتیب مطابق جداول ۲ و ۳ می‌باشند.



شکل ۵: شکل شماتیک اتصالات

جدول ۲: مقاطع طراحی برای مدل تحلیلی ۳ طبقه

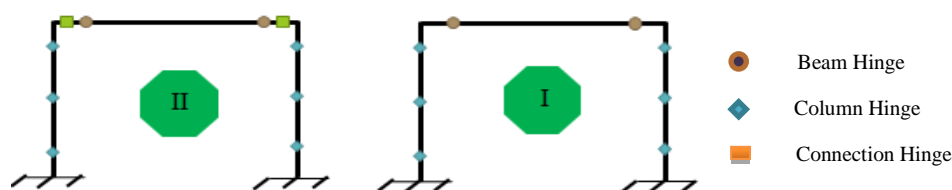
اعضا	تمامی طبقات
ستون	H37.5X37.5X1.0X1.5
تیر	H50.0X27.0X1.2 X1.4

جدول ۳: مقاطع طراحی برای مدل تحلیلی ۵ طبقه

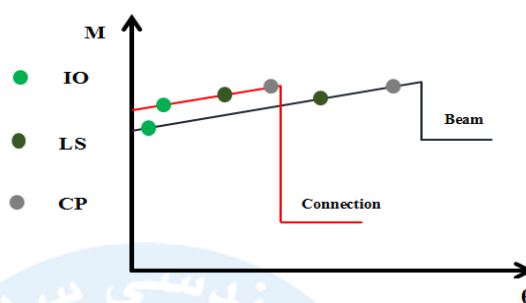
اعضا	طبقات ۱،۲،۳	طبقات ۴،۵
ستون	BOX35X35X1	BOX25X25X1
تیرهای داخلی	W14X26	W14X22
تیرهای خارجی	W12X19	W10X17

۳- مدل سازی مفاصل پلاستیک اتصالات و اعضای مختلف سازه و نحوه تشکیل آنها

در این تحقیق مفاصل پلاستیک در دو حالت تعریف و مدل سازی شده است. در حالت اول طبق روش معمول مفاصل پلاستیک صرفاً برای اعضای تیر و ستون مدل سازی و تحلیل شده است و در حالت دوم طبق روش مورد بررسی در این مقاله مفاصل پلاستیک علاوه بر اعضای تیر و ستون برای اتصالات مورد بررسی در این تحقیق نیز مدل شده اند. شکل ۶ مدل سازی مفاصل پلاستیک را با توجه به حالات اول و دوم در نظر گرفته شده نمایش می دهد. همچنین ضریب افزایش دینامیکی علاوه بر تیر بر اساس ویژگی های اتصالات نیز محاسبه می شود. در این حالت مقدار بدست آمده برای Ω_N به نوع اتصال وابستگی خواهد داشت. برای مدل سازی مفصل پلاستیک اتصال از مقادیر جدول ۹-۶ آیین نامه ASCE41 [14] با عنوان پارامترهای مدل سازی و معیارهای پذیرش در روش های غیرخطی - اجزای سازه فولادی استفاده شده است. در این جدول ضرایب a, b, c پارامترهای مدل سازی و IO, LS, CP معیارهای پذیرش می باشند. که مقادیر a و b بیانگر زاویه چرخش خمیری و c بیانگر نسبت تنش پسماند می باشد که این مقادیر برای هر اتصال متفاوت می باشند. مفاصل پلاستیک انواع اتصال بکاررفته بر اساس جدول ۶-۹ در نرم افزار SAP2000 تعریف شده است. رفتار غیرخطی مصالح برای تیر با استفاده از تخصیص مفصل پلاستیک خمشی در 0.05 و 0.95 طول تیر و برای ستون با تخصیص مفاصل پلاستیک خمشی - محوری در 0.5 و 1 طول ستون از ابتدای آن تعریف می شود. برای مدل سازی رفتار غیرخطی اتصالات نیز از تخصیص مفصل پلاستیک خمشی استفاده شده است. محل تشکیل مفصل پلاستیک اتصالات به کمک مدل های آزمایشگاهی به دست می آید و برای هر اتصال مقداری متفاوت دارد. شکل ۷ منحنی لنگر- دوران مفاصل پلاستیک و معیارهای پذیرش اتصالات و تیر را برای نمونه به صورت مقایسه ای نشان می دهد.



شکل ۶: مدل سازی مفاصل پلاستیک تیر، ستون و اتصالات بر اساس حالت اول و دوم



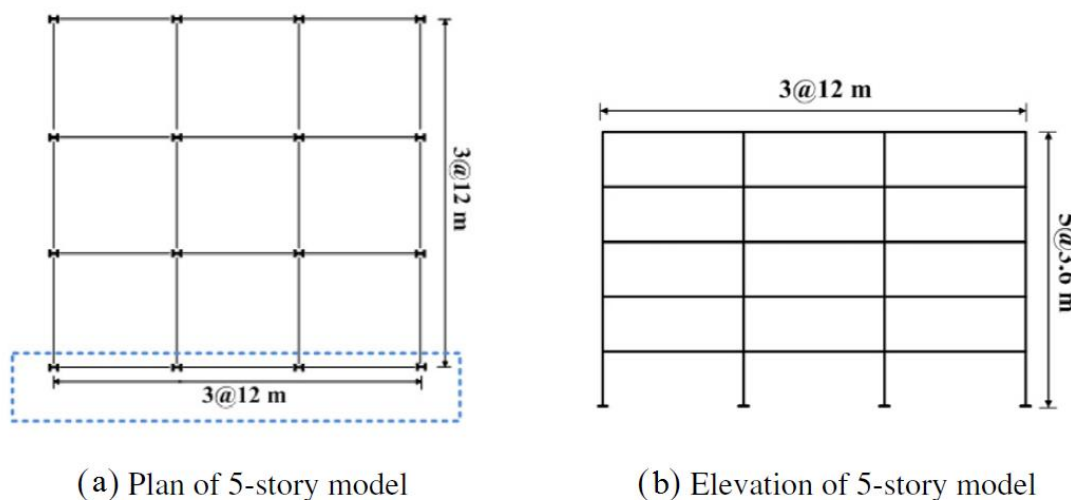
شکل ۷: مقایسه معیارهای پذیرش و نحوه تشکیل مفاصل پلاستیک اتصالات و تیر

در شکل ۷ منحنی مربوط به مفصل پلاستیک اتصال کمی بالاتر نسبت به منحنی مربوط به مفصل پلاستیک تیر قرار گرفته است که یکی از دلایل این امر ضریب CPR می باشد که این ضریب دربرگیرنده مشخصات خاصی برای اتصالات بوده و همچنین دلیل دیگر آن بزرگتر بودن لنگر طراحی اتصالات نسبت به تیرهاست لذا مفاصل پلاستیک اتصالات برای لنگر بزرگتری نسبت به تیرها فعال یا دچار خرابی می شوند، فلذا پس از مدل سازی هر دو مفصل پلاستیک اتصال و تیر در سازه، ابتدا مفصل پلاستیک تیر تشکیل شده و تا معیار پذیرش IO پیش می رود. سپس با افزایش مقدار لنگر مفصل پلاستیک اتصالات تشکیل شده و به علت کوچک بودن ظرفیت دوران پلاستیک و شکل-پذیری اتصال نسبت به تیر و همچنین سخت شوندگی کرنشی بیشتری که در اثر افزایش لنگر به اتصالات وارد می شود، مفصل اتصال به سرعت هر سه معیار پذیرش IO، LS و CP را گذرانده و سازه در دهانه های مرتبط با حذف ستون دچار خرابی می شود.

لازم به ذکر است که ظرفیت اتصالات مختلف نسبت به یک تیر خاص متفاوت می باشد لذا با استفاده از فرمول های آیین نامه ای میزان اختلاف ظرفیت هر اتصال نسبت به تیر عدد متفاوتی خواهد شد که در این تحقیق برای هر کدام از اتصالات در نظر گرفته شده مقادیر مورد نظر محاسبه شده و در مدل سازی مفاصل پلاستیک هر اتصال لحاظ شده است.

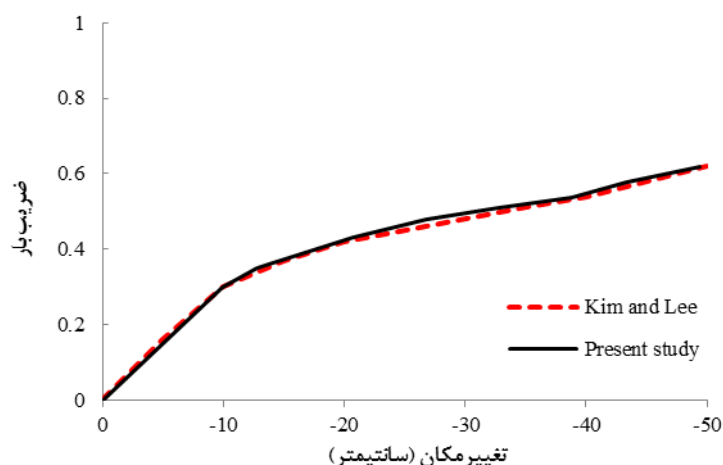
۴- صحت سنجی

Kim و Lee [15] ظرفیت قاب های خمشی فولادی متعارف و تقویت شده به وسیله ورق های میانقاب فولادی را در برابر خرابی پیشرونده مورد بررسی قرار دادند. در تحقیق ایشان ساختمان های دو، سه و پنج طبقه با ارتفاع طبقات ۳٫۶ متر و بارهای مرده و زنده به ترتیب ۴ و ۲٫۵ کیلونیوتن بر متر مربع طراحی گشته و در برابر خرابی پیشرونده مورد ارزیابی قرار گرفته است. در این تحقیق جهت صحت سنجی نتایج حاصل از شبیه سازی ها، ساختمان نمونه ۵ طبقه آقایان Kim و Lee با طول دهانه ۱۲ متر با جزئیات کامل مدل سازی گشته و رفتار این سازه به ازای حذف ناگهانی ستون میانی به روش مسیر جایگزین استاتیکی غیرخطی مجدداً بررسی شده است. شکل ۸ پلان و نمای ساختمان مورد بررسی در مقاله حاضر را نشان می دهد.



شکل ۸: پلان و نمای مدل های سازه ای مطالعه منتخب برای صحت سنجی

در شکل ۹ نمودار ضریب بار - تغییر مکان نقطه فوقانی ستون حذف شده در سازه بررسی شده توسط آقایان Kim و Lee و در مدلی که جهت صحت سنجی مجدداً توسط نگارنده مدل سازی شده است، نشان داده شده است. با توجه به شکل ۹ نتایج بدست آمده از تحلیل های انجام گرفته مطابقت مناسبی با نتایج موجود در این مقاله دارد.



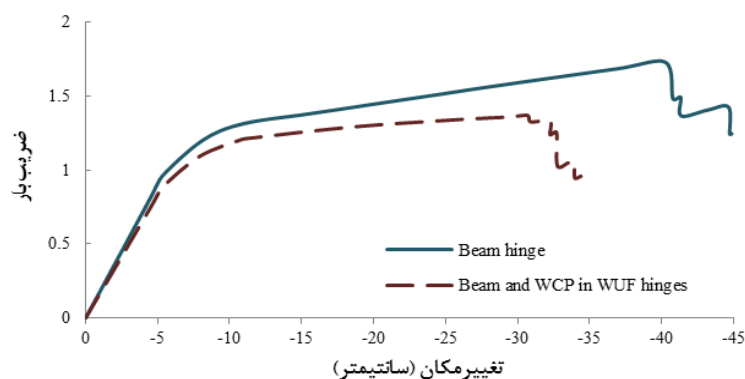
شکل ۹: نمودار ضریب بار - تغییر مکان سازه نمونه ۵ طبقه بر اثر حذف ستون (مدل سازی شده توسط Kim and Lee و نگارنده مقاله)

۵- نتایج تحلیل مسیر جایگزین استاتیکی غیرخطی (PUSH-DOWN)

در این تحقیق به منظور بررسی تاثیر مدل سازی مفاصل پلاستیک اتصالات در ظرفیت قاب های خمشی در برابر خرابی پیشرونده دو حالت مختلف برای تعریف مفاصل پلاستیک در سازه ها در نظر گرفته شد. در حالت اول طبق روش معمول مفاصل پلاستیک صرفاً برای اعضای تیر و ستون تعریف و مدل سازی شد و در حالت دوم طبق روش مورد بررسی در این مقاله مفاصل پلاستیک علاوه بر اعضای تیر و ستون، برای اتصالات مورد بررسی در این تحقیق نیز مدل سازی شدند. در ادامه، با انجام تحلیل مسیر جایگزین استاتیکی غیرخطی بر روی تمام مدل های نمونه، منحنی ضریب بار- تغییر مکان مربوطه استخراج شده است. منظور از تغییر مکان در این نمودارها، تغییر مکان قائم نقطه فوقانی ستون حذف شده می باشد. به نسبت بار وارده در هر گام از تحلیل استاتیکی غیرخطی به مقدار کل بار ثقلی سرویس خرابی پیشرونده، اصطلاحاً ضریب بار گفته می شود. در واقع اگر منحنی ضریب بار- تغییر مکان مربوطه به سازه ای تحت بار ثقلی خرابی پیشرونده، بتواند تا ضریب بار ۱ به صورت صعودی پیش رود و در عین حال به ازای ضریب بار واحد، ضوابط پذیرش آیین نامه UFC ارضا گردد آن سازه قادر به تحمل کل بار خرابی بوده و در برابر خرابی پیشرونده مقاوم محسوب می گردد. در غیر این صورت دارای مقاومت کافی برای مقابله با بار خرابی پیشرونده نمی باشد.

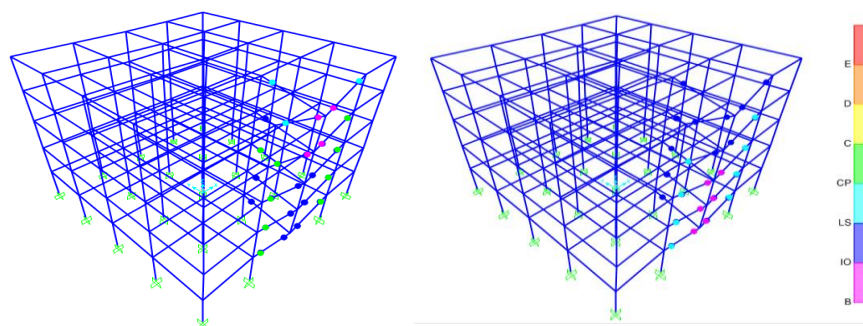
۵-۱- نتایج مدل قاب خمشی متوسط با و بدون مدل سازی مفصل پلاستیک اتصالات

در شکل ۱۰ رفتار خرابی پیشرونده مدل قاب خمشی متوسط به ازای حذف ستون داخلی در مدل سازه ای پنج طبقه مورد مطالعه قرار گرفته است. در مدل اول سازه ای، مفاصل پلاستیک صرفاً برای اعضای تیر و ستون مدل سازی شده و در مدل دوم، مفاصل پلاستیک علاوه بر اعضای مختلف برای اتصالات WCPinWUF نیز به صورت همزمان مدل سازی شده است. حالت دوم منطقی و واقع گرایانه تر است زیرا در سازه ها علاوه بر اعضای تیر و ستون مقاومت و عملکرد و نقش اتصالات نیز در رفتار خرابی پیشرونده سازه تاثیرگذار است. با توجه به ظرفیت دوران پلاستیک کمتر اتصالات نسبت به تیرها و نتایج تجزیه و تحلیل ها به وضوح در شکل ۱۰ قابل مشاهده است که مدل با مفاصل پلاستیک معرفی شده برای اتصالات و اعضا، زودتر از مدل با مفاصل پلاستیک معرفی شده صرفاً برای اعضا به خرابی رسیده و به بیان دیگر به حالت صحیح و واقعی خود نزدیک تر می شود. همانطور که در شکل ۱۰ مشاهده می شود ضریب بار برای حالت اول که مفاصل پلاستیک برای اعضای تیر و ستون مدل سازی شده است تا ۱.۷۲۸ پیش رفته و تغییر مکان در این حالت ۴۰.۲۳ سانتی متر می باشد. این در حالی است که حداکثر ضریب افزایش دینامیکی در حالت دوم ۱.۳۵ بوده و تغییر مکان در این حالت ۳۲.۲۷ سانتی متر می باشد. مقدار اضافه مقاومت نسبت به توصیه دستورالعمل UFC در حالت اول ۷۲.۸٪ بوده در صورتی که در حالت دوم این مقدار ۳۵٪ می باشد.



شکل ۱۰: منحنی ضریب بار - تغییر مکان سازه در برابر خرابی پیشرونده به ازای دو حالت مختلف مدل سازی مفاصل پلاستیک

در شکل ۱۱ نحوه تغییر شکل و مفاصل پلاستیک تشکیل شده در دهانه مرتبط با ستون حذف شده به ازای مدل سازی همزمان مفاصل پلاستیک اعضای مختلف و اتصالات قابل مشاهده است و جدول ۴ نتایج کلی تحلیل استاتیکی غیرخطی سازه ۵ طبقه به ازای حذف ستون پیرامونی را به همراه تعداد مفاصل پلاستیک تشکیل شده نشان می دهد. شایان ذکر است که در شکل ۱۱ با توجه به فاصله بسیار نزدیک مفاصل پلاستیک اتصال و تیر فقط یک مفصل قابل مشاهده است. با توجه به نتایج ارائه شده در جدول ۴ سازه در ضریب بار ۱.۳۵ بسیار ظرفیت باربری خود را از دست داده و دچار خرابی کلی می شود. ضریب بار سازه در تراز بار خرابی پیشرونده (کمترین مقدار ضریب بار متناظر با عدم ارضای ضوابط پذیرش UFC) برابر ۱.۳۳۰ می باشد. بنابراین مطابق معیارهای آیین نامه UFC می توان نتیجه گرفت که سازه در برابر خرابی پیشرونده مقاوم است.



ب) تراز بار فروریزش

الف) تراز بار متناظر با معیار پذیرش UFC

شکل ۱۱: تغییر شکل سازه و نحوه توزیع مفاصل پلاستیک در تراز بار UFC در سازه ۵ طبقه به ازای حذف ستون پیرامونی

جدول ۴: نتایج تحلیل استاتیکی غیرخطی در سازه ۵ طبقه به ازای حذف ستون پیرامونی در حالت دوم

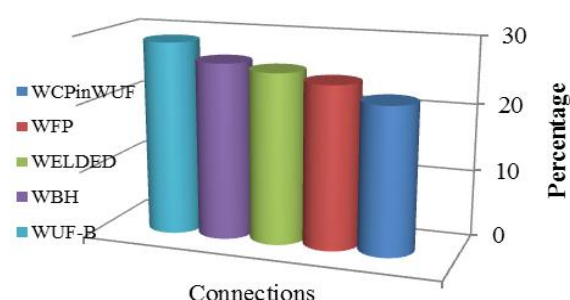
ستون	تعداد و محدوده مفاصل پلاستیک		تغییر مکان قائم گره فوقانی ستون حذف شده (سانتیمتر)	ضریب بار	تراز بار
	اتصالات	تیر			
-	B-IO (6) IO-LS (7) LS-CP(8)	B-IO (25)	25.45	1.33	بار متناظر با معیار پذیرش UFC
-	B-IO (5) IO-LS (9) LS-CP (3) CP-C(9)	B-IO(25)	29.40	1.35	بار فروریزش

جدول ۵ و شکل‌های ۱۲ و ۱۳ میزان کاهش مقاومت سازه و نزدیک شدن به میزان واقعی آن را به ازای مدل‌سازی همزمان مفاصل پلاستیک برای اتصالات و اعضا را نسبت به حالتی که مفاصل پلاستیک صرفاً برای اعضا تعریف و مدل‌سازی می‌شدند را نشان می‌دهند.

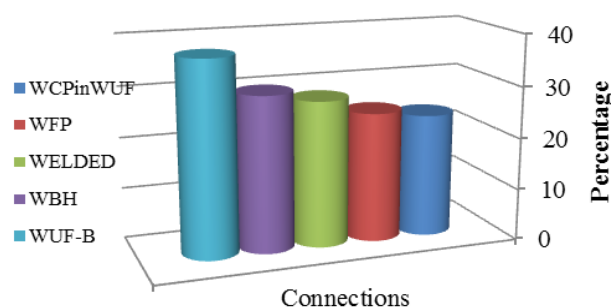
با توجه به نتایج این جدول و اشکال فوق الذکر استنباط می‌شود که در مدل‌های سازه‌ای مورد مطالعه حذف ستون داخلی بسیار مخاطره آمیزتر از حذف ستون پیرامونی می‌باشد چراکه در حالت حذف ستون داخلی تعداد اعضای مرتبط با محل حذف ستون یا به عبارت دیگر تعداد اعضای اصلی افزایش می‌یابد و اعضای اصلی بار بیشتری را تحمل 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، این اعضا سریع تر تسلیم شده و سازه سریع تر دچار خرابی می‌شود.

جدول ۵: درصد کاهش مقاومت سازه به ازای مدل‌سازی مفصل پلاستیک برای اعضا و اتصالات

حذف ستون داخلی (I)		حذف ستون پیرامونی (E)		محل حذف ستون
ساختمان ۵ طبقه	ساختمان ۳ طبقه	ساختمان ۵ طبقه	ساختمان ۳ طبقه	نام اتصالات
%21.60	%20.73	%21.87	%23.88	WCPinWUF
%23.31	%21.41	%24.18	%25.11	WFP
%23.94	%26.06	%25.34	%28.25	WELDED
%26.75	%27.50	%26.21	%30.10	WBH
%29.30	%34.14	%28.81	%37.50	WUF-B

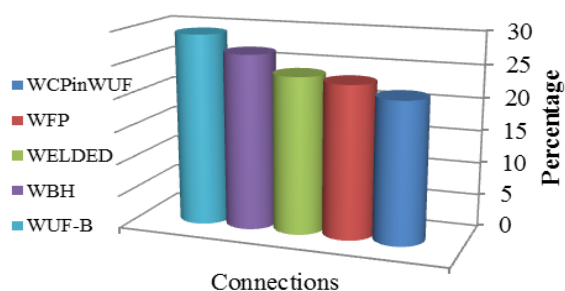


(ب) نمودار کاهش مقاومت ساختمان ۵ طبقه

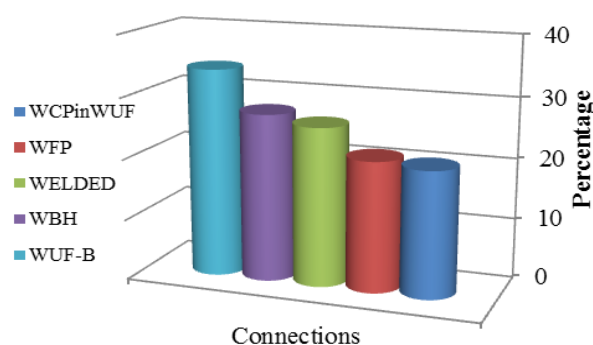


(الف) نمودار کاهش مقاومت ساختمان ۳ طبقه

شکل ۱۲: نمودار کاهش مقاومت به ازای حذف ستون پیرامونی در سازه‌های ۳ و ۵ طبقه



(ب) نمودار کاهش مقاومت ساختمان ۵ طبقه



(الف) نمودار کاهش مقاومت ساختمان ۳ طبقه

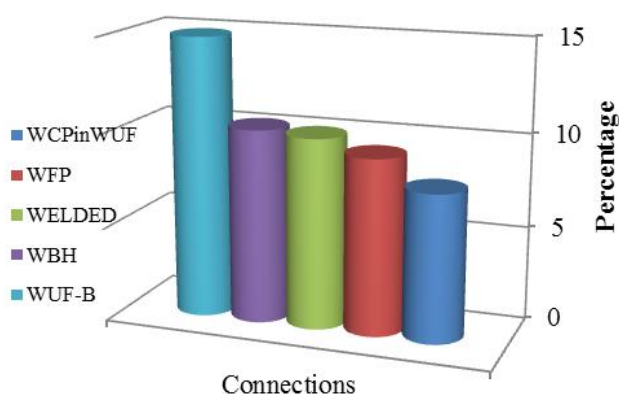
شکل ۱۳: نمودار کاهش مقاومت به ازای حذف ستون پیرامونی در سازه‌های ۳ و ۵ طبقه

همانطور که در جدول ۵ و اشکال ۱۲ و ۱۳ مشاهده می شود به ازای مدل سازی همزمان مفاصل پلاستیک برای اعضا و اتصالات در هر دو سازه مقاومت سازه در برابر خرابی پیشرونده کاهش یافته و به میزان عملی و واقعی خود نزدیک تر می شود. این بدین معناست که باید مفاصل پلاستیک اتصالات نیز در مرحله تحلیل و طراحی مدل سازی شود چرا که علاوه بر اعضای تیر و ستون مشخصات اتصالات نیز برای مقاومت سازه در برابر خرابی پیشرونده بسیار مهم و تاثیر گزار است. طبق مفاد جدول ۷ در کمترین حالت 20% و در بیشترین حالت 37% مقاومت سازه کاهش می یابد.

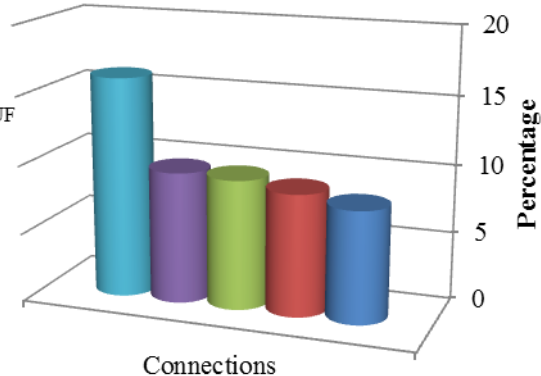
با توجه به تحلیل های انجام گرفته مقدار Ω_N محاسبه شده برای اتصالات همواره از حالتی که ضریب افزایش دینامیکی صرفاً با در نظر گیری مشخصات تیر محاسبه می گردید بزرگتر بوده و در نتیجه حالت اول حاکم خواهد بود. به عنوان نمونه در ساختمان پنج طبقه ضریب افزایش دینامیکی با در نظر گیری مشخصات اتصال WCPinWUF برابر 1.265 محاسبه شده است، در حالی که این عدد اگر صرفاً بر مبنای مشخصات تیرها محاسبه می شد برابر با 1.166 بود. همانطور که مشاهده می شود ضریب افزایش دینامیکی محاسبه شده با در نظر گیری مشخصات اتصالات بزرگتر از ضریب افزایش دینامیکی محاسبه شده با در نظر گیری مشخصات تیرها است، لذا همانطور که اشاره شد این ضریب در بارهای ثقیلی دهانه مرتبط با محل حذف ستون ضرب می شود و همین عامل سبب می شود که دهانه های مرتبط با محل حذف ستون تحت خمشی بیشتری قرار گرفته و زودتر خراب شوند. در جدول ۶ و شکل ۱۴ میزان افزایش ضریب افزایش دینامیکی به ازای محاسبه آن با در نظر گیری مشخصات اتصالات آورده شده است. با توجه به نتایج جدول ۶ ضریب افزایش دینامیکی باید بر اساس مشخصات اتصالات محاسبه شده و در بارگذاری ثقیلی اعضای مرتبط با محل حذف ستون ضرب شود. در بیشترین مقدار 16% و در کمترین مقدار 8% افزایش در میزان ضریب افزایش دینامیکی مشاهده می شود.

جدول ۶: درصد افزایش ضریب افزایش دینامیکی محاسبه شده با مشخصات اتصالات

نام اتصالات	درصد افزایش ضریب افزایش دینامیکی برای ساختمان ۳ طبقه	درصد افزایش ضریب افزایش دینامیکی برای ساختمان ۵ طبقه
WCPinWUF	8.18%	7.82%
WFP	8.90%	9.33%
WELDE	9.47%	10.10%
WBH	9.41%	10.30%
WUF-B	16.11%	14.90%



شکل ۱۴: نمودار افزایش ضریب افزایش دینامیکی به ازای محاسبه بر اساس مشخصات اتصالات



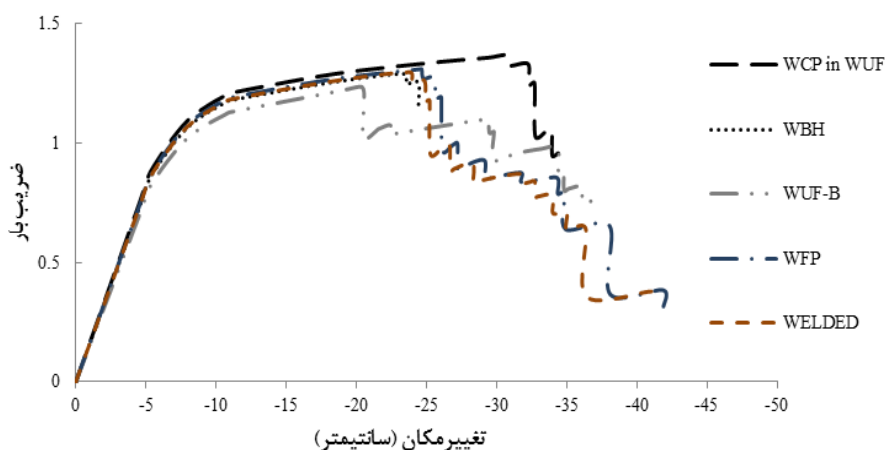
شکل ۱۴: نمودار افزایش ضریب افزایش دینامیکی به ازای محاسبه بر اساس مشخصات اتصالات

با توجه به نتایج ذکر شده به سهولت استنباط می گردد که با مدل سازی مفاصل پلاستیک اعضای مختلف و اتصالات بصورت همزمان، ظرفیت سازه در برابر خرابی پیشرونده بصورت منطقی و واقع گرایانه تر محاسبه گشته و به مقدار واقعی نزدیک تر است. با توجه به واقع گرایانه تر بودن نتایج در حالتی که مفاصل پلاستیک اتصالات و اعضای مختلف بصورت همزمان در سازه مدل سازی می شوند، از این رو

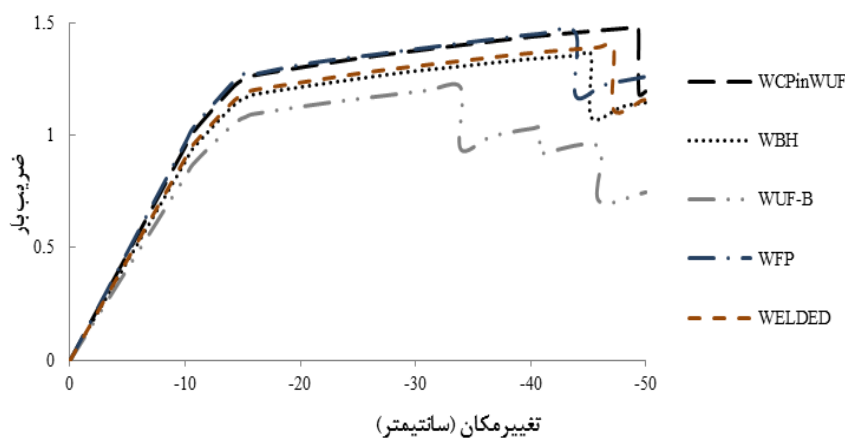
در ادامه صرفاً به مطالعه نتایج حالتی که مفاصل پلاستیک اتصالات و اعضای مختلف بصورت همزمان در سازه مدل سازی می شوند پرداخته می شود و از بیان و بررسی نتایج حالتی که مفاصل پلاستیک صرفاً برای اعضا تعریف و مدل سازی می شود اجتناب می شود.

۲-۵- مقایسه نتایج تحلیل خرابی پیشرونده استاتیکی غیرخطی تمامی نمونه ها

در شکل های ۱۵ و ۱۶ منحنی های ضریب بار- تغییر مکان اتصالات مختلف به ازای حذف ستون در دو موقعیت پیرامونی و داخلی در دو ساختمان سه و پنج طبقه با انواع مختلف اتصالات ارائه شده است. در جدول ۷ خلاصه ای از نتایج تحلیل خرابی پیشرونده نمونه ها به ازای حذف ستون پیرامونی (E) آورده شده است. با توجه به منحنی های نمودار شکل ۱۵- (الف) و (ب) به ازای حذف ستون پیرامونی در سازه های پنج و سه طبقه مطلوب ترین و نامطلوب ترین عملکرد در مقابل خرابی پیشرونده مربوط به حالتی است که به ترتیب از اتصال های WCPinWUF و WUF-B در سازه استفاده شده است. در این صورت در سازه ۵ طبقه ضریب بار ماکزیمم در مطلوب ترین حالت 1.35 و در نامطلوب ترین حالت 1.230 می باشد. در جدول ۷ خلاصه ای از نتایج تحلیل خرابی پیشرونده نمونه ها به ازای حذف ستون پیرامونی (E) آورده شده است. با توجه به هم پوشانی مناسب نمودارها این موضوع قابل استنباط است که با افزایش طبقات و تغییر طول دهانه ظرفیت سازه در برابر خرابی پیشرونده به ازای استفاده از اتصالات مختلف تغییر می کند ولی مطلوب ترین و نامطلوب ترین عملکرد اتصالات مختلف در تمامی بررسی های انجام گرفته ثابت است و می توان با اطمینان در سازه های در معرض خرابی پیشرونده از اتصال تیر به ستون WCPinWUF در قاب های خمشی استفاده کرد.



شکل ۱۵: منحنی ضریب بار- تغییر مکان به ازای حذف ستون پیرامونی طبقه اول ساختمان پنج طبقه



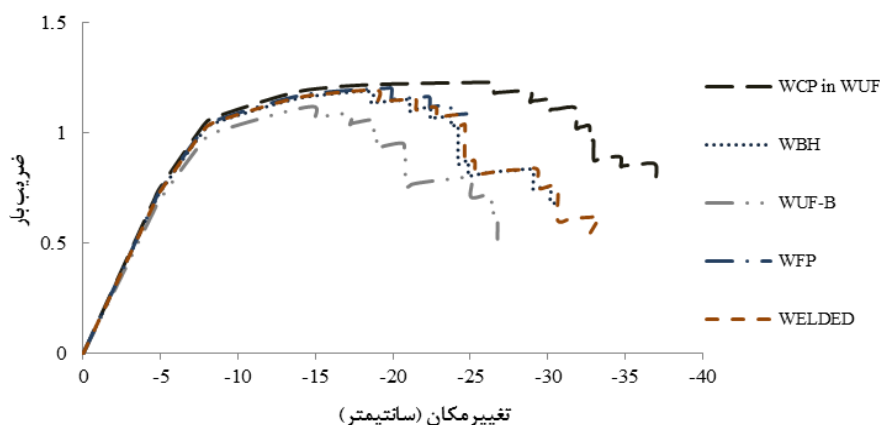
شکل ۱۵: منحنی ضریب بار- تغییر مکان به ازای حذف ستون پیرامونی طبقه اول ساختمان سه طبقه

شکل ۱۵: منحنی ضریب بار- تغییر مکان پنج مدل اتصال مذکور به ازای حذف ستون پیرامونی در دو سازه ۳ و ۵ طبقه

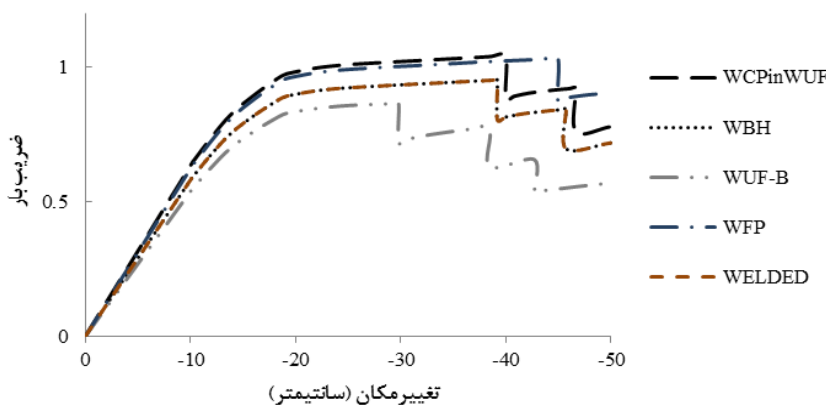
جدول ۷: مقادیر ضریب افزایش دینامیکی، حداکثر ضریب بار و حداکثر تغییر مکان به ازای حذف ستون پیرامونی

ساختمان ۵ طبقه			ساختمان ۳ طبقه			نوع عضو
حداکثر تغییر مکان (cm)	حداکثر ضریب بار	ضریب افزایش دینامیکی	حداکثر تغییر مکان (cm)	حداکثر ضریب بار	ضریب افزایش دینامیکی	
40.260	1.728	1.166	79.38	1.943	1.166	Beam
29.400	1.350	1.265	49.34	1.479	1.27	WCPinWUF
24.650	1.310	1.286	43.87	1.455	1.28	WFP
25.560	1.290	1.297	47.17	1.394	1.288	WELDED
23.410	1.275	1.30	45.23	1.358	1.29	WBH
20.410	1.230	1.370	33.89	1.213	1.39	WUF-B

با توجه به منحنی‌های نمودار شکل ۱۶-الف) نیز می‌توان مشاهده کرد که مطلوب‌ترین حالت در ساختمان پنج طبقه به ازای حذف ستون داخلی مربوط به حالتی است که از اتصال WCPinWUF در سازه استفاده شده است و بدترین رفتار مربوط به استفاده از اتصال WUF-B در سازه است. ضرایب بار در مطلوب‌ترین و بدترین حالات به ترتیب برابر با 1.231 و 1.110 می‌باشند. با توجه به منحنی‌های نمودار شکل ۱۶-ب) مشاهده می‌شود که مطلوب‌ترین و نامطلوب‌ترین حالات در سازه سه طبقه مشابه نتایج سازه پنج طبقه می‌باشد با این تفاوت که ضرایب بار در مطلوب‌ترین و نامطلوب‌ترین حالات به ترتیب برابر با 1.040 و 0.864 می‌باشند. در جدول ۸ خلاصه‌ای از نتایج تحلیل خرابی پیش‌رونده نمونه‌ها به ازای حذف ستون داخلی (I) ارائه شده است.



الف) منحنی ضریب بار - تغییر مکان به ازای حذف ستون داخلی طبقه اول ساختمان ۵ طبقه



ب) منحنی ضریب بار - تغییر مکان به ازای حذف ستون داخلی طبقه اول ساختمان ۳ طبقه

شکل ۱۶: منحنی ضریب بار - تغییر مکان پنج مدل اتصال مذکور به ازای حذف ستون داخلی در دو سازه ۳ و ۵ طبقه

جدول ۸: مقادیر ضریب افزایش دینامیکی، حداکثر ضریب بار و حداکثر تغییر مکان به ازای حذف ستون داخلی

ساختمان ۵ طبقه			ساختمان ۳ طبقه			نوع عضو
حداکثر تغییر مکان (cm)	حداکثر ضریب بار	ضریب افزایش دینامیکی	حداکثر تغییر مکان (cm)	حداکثر ضریب بار	ضریب افزایش دینامیکی	
40.260	1.57	1.166	76.96	1.312	1.166	Beam
26.530	1.231	1.265	40.00	1.040	1.27	WCPinWUF
19.090	1.204	1.286	44.96	1.031	1.28	WFP
19.020	1.194	1.297	41.56	0.970	1.288	WELDED
23.410	1.150	1.30	39.19	0.951	1.29	WBH
14.950	1.110	1.370	29.80	0.864	1.39	WUF-B

۶- نتیجه گیری

در این تحقیق ظرفیت قاب های خمشی فولادی با مدل سازی مفاصل پلاستیک اتصالات همراه با اعضای تیر و ستون به روش مسیر جایگزین استاتیکی غیرخطی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این تحقیق نشان داد که با در نظرگیری و تعریف مفاصل پلاستیک برای اتصالات، سازه مقاومت کمتری در برابر خرابی پیشرونده از خود نشان داده و به مقدار واقعی یا عملی خود نزدیک می شود. چراکه هنگام مقاومت در برابر خرابی پیشرونده علاوه بر اعضای تیر و ستون مشخصات و ویژگی های اتصالات نیز مهم و تاثیرگذار است. اهم نتایج این تحقیق در محدوده مدل های مورد مطالعه عبارتند از:

- مدل سازی همزمان مفاصل پلاستیک برای اتصالات و تیرها در کمترین حالت 20% و در بیشترین حالت 37% بر روی کاهش مقاومت سازه در برابر خرابی پیشرونده تاثیر دارد. لذا مدل سازی مفاصل پلاستیک اتصالات در برابر اعضا باید به عنوان یک اصل بسیار مهم پذیرفته و در نظر گرفته شود.
- طی تحلیل مسیر جایگزین استاتیکی غیرخطی در هر دو سازه، مفاصل پلاستیک ابتدا در تیرها تشکیل شده و به محدوده B-IO می رسند، سپس با افزایش تدریجی لنگر در سازه مفاصل پلاستیک در محل اتصالات فعال می شود و به علت کمتر بودن ظرفیت دوران پلاستیک اتصالات نسبت به تیرها، اتصالات خراب شده و به سرعت معیارهای پذیرش را نقض می کند.
- همچنین مقدار ضریب افزایش دینامیکی Ω_N محاسبه شده با در نظرگیری مشخصات اتصالات همواره از حالتی که ضریب افزایش دینامیکی صرفاً با در نظرگیری مشخصات تیرها محاسبه می گردد بزرگتر بوده و در نتیجه حالت اول حاکم خواهد بود. به عنوان نمونه در ساختمان پنج طبقه ضریب افزایش دینامیکی با در نظرگیری مفاصل پلاستیک روی تیر و اتصال WCPinWUF برابر 1.265 محاسبه گردید در حالی که این عدد اگر مفاصل پلاستیک صرفاً برای تیر تعریف شوند برابر با 1.166 خواهد بود. از این رو در بیشترین مقدار 16% و در کمترین مقدار 8% افزایش در میزان ضریب افزایش دینامیکی قابل مشاهده است.
- در بین انواع اتصالات مورد مطالعه اتصال WCPinWUF دارای مطلوب ترین عملکرد و اتصال WUF-B دارای نامطلوب ترین عملکرد به ازای حذف ستون پیرامونی و داخلی در برابر خرابی پیشرونده می باشند.
- حذف ستون داخلی به علت افزایش بارگذاری اعضای اصلی و به دنبال آن خرابی بیشتر در هر دو سازه به مراتب مخرب تر از حذف ستون پیرامونی می باشد

مراجع

- [1] ASCE 7. (2010). Minimum design loads for buildings and other structures. American Society of Civil Engineers, Reston, Virginia.
- [2] Rezazadeh, P., Sheidaii, M.R. and Salmasi, A. (2019). Assessment of progressive collapse behaviour of moment frames strengthened with knee elements. *International Journal of Steel Structures*, 19, 517–529.
- [3] UFC. (2016). Design of building to resist progressive collapse. Unified facility criteria, Washington, D.C.
- [4] GSA. (2005). Progressive collapse analysis and design guidelines for new federal office buildings and major modernization projects. General Services Administration, Washington, D.C.
- [5] Cortes, G. and Liu, J. (2017). Behavior of conventional and enhanced gravity connections subjected to column loss. *Journal of Constructional Steel Research*, 133, 475-484.
- [6] Wang, W., Fang, Ch., Qin, X., Chen, Y. and Li, L. (2016). Performance of practical beam-to-SHS column connections against progressive collapse. *Engineering Structures*, 106, 332-347.
- [7] Yang, B. and Haitan, K. (2016). Experimental tests of different types of bolted steel beam–column joints under a central–column–removal scenario. *Engineering Structures*, 54, 112-130.
- [8] Jalali, A. and Yasrebinia, I. (2014). Investigate the change of welded connection performance due to column removal. *Engineering Structures*, 25, 315-330.
- [9] 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.
- [10] Kim, J. and Hee Park, J. (2011). Sensitivity analysis of steel buildings subjected to column loss. *Engineering Structures*, 33, 421–432.
- [11] SAP2000 version 16.0.0. (2014). Integrated structural analysis and design Inc. Computers and Structures, Berkeley, US.
- [12] ANSI/AISC 360. (2016). Specifications for structural steel buildings. American institute of steel construction Inc, Chicago, US.
- [13] ANSI/AISC 341. (2016). Seismic provisions for structural steel buildings. American Institute of Steel Construction Inc, Chicago, US.
- [14] ASCE 41. (2013). Seismic evaluation and retrofit of existing building. American society of civil engineers, New York, US.
- [15] 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.