



Ferdowsi
University of
Mashhad

Journal of Ferdowsi Civil Engineering

Page Journal: civil-ferdowsi.um.ac.ir



Iranian
Concrete
Institute



Pavement
Engineering
Association of
Iran

Investigating Progressive Collapse of Knee Braced Frame in Steel Structures under Fire Loading

Research Article

Marzieh Akbari¹, Ali Mohammad Roustaa² , Ali Alipour Mansourkhani³, Hamed Enayati⁴

DOI: [10.22067/jfcei.2023.80437.1207](https://doi.org/10.22067/jfcei.2023.80437.1207)

1. Introduction

Progressive collapse like a chain reaction with the spread of an initial local damage inside the structure causes partial or total damage of the structure. The high heat caused by the fire in steel structures increases the load capacity of the members to a large extent, the result of which is progressive destruction and collapse of the structure. Engineers and researchers have paid attention to this issue since part of the Ronan Point building in London was damaged in 1968. After the destruction of the World Towers in 2001 on September 11, several research institutes convened to correct this situation and achieve design methods against progressive collapse. Direct and indirect design methods can be used for designing the structure against progressive collapse. So far, many studies have been conducted on steel structures under fire load, but most of the studies on bracing structures with knee braces have been under earthquake load. Roudrigues et al. (2000) published the result of a series of 168 fire resistance tests on compression steel members with limited thermal tension. Crosti (2009) investigated the steel structure of a one-story steel-framed parking under fire load. Piers et al. (2010) at the University of Coimbra presented a comparison of fire behavior in H and CHS steel columns with limited thermal expansion. Parvini et al. (2016) investigated the behavior of the moment-resisting frame system with knee braces under the risk of progressive collapse because of gravity and seismic loads. Cao et al. (2023) investigated the progressive failure of steel structure under the influence of fire load and studied the impacts of load ratio and resistance of structural members on the behavior of the structure.

2. Method

The nonlinear analysis of 3, 6, and 9-story steel frame structures with knee braces under fire load was done using Abaqus software. The purpose of the analysis in Abaqus software is to determine the elements and a range of frames that have the most critical condition under fire loading. By identifying these elements, based on their prioritization, and using SAP2000 software, the critical load-bearing elements that are usually columns and braces in the braced frame system were removed to evaluate the behavior of the sample frames under the effect of progressive collapse caused by fire and to determine the critical condition for the frames with coaxial and off-axial knee braces. Column sections were of IPB or box type, beam sections were of single or double IPE type or plate grader, and brace sections were of double channel section type. Knee element would be also better to be chosen from thin sections with low number and hardness and high ductility. The steel material for the structures was ST37 type. The soil studied for the structures was type III, and the structure importance factor was also checked for buildings with medium importance of I=1.

3. Results and discussion

At first, the 3-story frame with coaxial knee brace was modeled in Abaqus software and analyzed under fire load. As Figure 1 shows, the middle column and two columns on both sides of the first floor have more thermal stresses.

In the SAP software, the focus was on the mentioned columns and they were removed one by one and the behavior of the frame was evaluated. Figure 2 shows the energy-time curve of the frame during the fire time.

*Manuscript received: January 6, 2023, Revised, November May 31, 2023, Accepted, June 23, 2023.

¹. MSc Student in Structural Engineering, Faculty of Engineering, Yasouj University, Yasouj, Iran.

².Corresponding author. Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Yasouj University, Yasouj, Iran.

Email: arousta@yu.ac.ir

³. Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Yasouj University, Yasouj, Iran.

⁴. Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Mazandaran University of Science and Technology, Mazandaran, Iran.

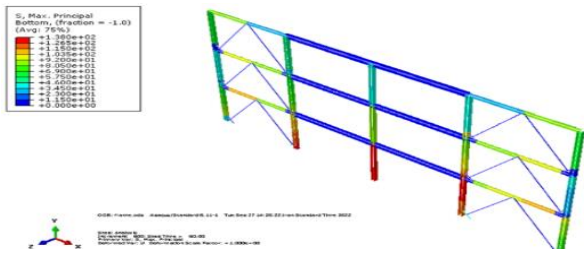


Figure 1. Thermal stress distribution in a 3-story frame with coaxial knee brace under fire load

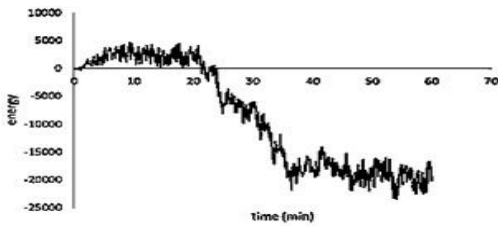


Figure 2. Energy-time curve of 3-story frame with coaxial knee brace under fire load

The results showed that for the frame with off-axial knee brace, only the middle column had critical conditions. It can be said that the steel frame with off-axial brace has high ductility. This problem, in combination with the knee element, leads to a significant increase in the plasticity of the frame. The thermal analysis for the 6-story frame with coaxial knee brace showed that the middle column and the columns on both sides in the first floor and the middle column in the second floor are in critical condition. According to the results obtained from the analysis of the 6-story frame with off-axial knee brace, the stresses generated in the middle column on the first floor and its right column and then the middle column on the second floor caused them to become more critical. Figure 3 shows the comparison of the energy of the 6-story frame with coaxial and off-axial knee bracing for different scenarios without and with column removal.

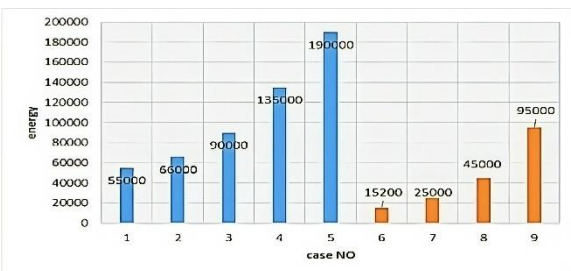


Figure 3. The comparison of the energy of the 6-story frame with coaxial and off-axial knee bracing for different scenarios

The analysis performed on the 9-story frame with coaxial and off-axial knee bracing showed that the off-axial bracing had a very significant impact on reducing the energy of the frame compared to the coaxial bracing system. The amount of energy in off-axis brace is reduced by 65%, which is very favorable. However, the 9-story frame itself has high ductility, which in combination with

the off-axis brace and knee element, results in a structural system with ductility and the ability to absorb and dissipate energy very well.

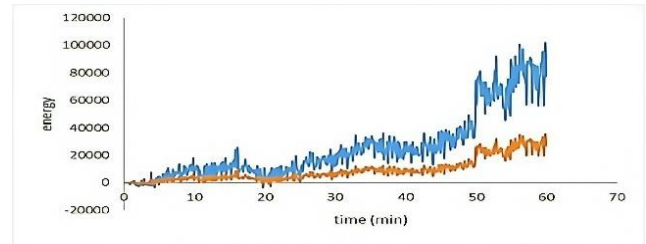


Figure 4. Energy-time curve of 9-story frame with coaxial and off-axial knee brace under fire load

The results of the 9-story frame with coaxial and off-axial knee braces showed that the middle column in the first and second floors has the most critical conditions.

4. Conclusion

1. The results obtained from the 3-story frame for the frame with off-axial knee brace showed that the amount of energy for the case where the middle column is removed has increased by about 10%. The energy of the frame with off-axial knee braces is more than the energy of the frame with coaxial knee braces, but the removal of the column in the frame with off-axial knee braces has only increased the energy by 10%. This is despite the fact that removing the column in the frame with the coaxial knee brace has increased the energy 2.3 times, and for this reason, the frame with the off-axial knee brace is much more desirable.
2. The results of the analysis of 6-story coaxial and off-axial knee brace frames showed that the energy in the frame with the off-axial knee brace was about 50% less than the frame with the coaxial knee brace during the fire and in the entire time period.
3. The results of the 9-story frame showed that in total, in the case of using the off-axial knee brace, energy for without removing the element, removing the middle column in the first floor, and removing the middle column in the first and second floors in comparison by using the coaxial knee brace, decreased 77%, 70%, and 79%, respectively, which is very significant.



بررسی فروریختگی پیش‌رونده قاب‌های مهاربندی شده با بادبند زانویی در سازه‌های فولادی تحت بار آتش‌سوزی*

مقاله پژوهشی

حامد عنایتی^(۴)علی‌پور منصورخانی^(۳)علی محمد روستا^(۲)مرضیه اکبری^(۱)

DOI: 10.22067/jfcej.2023.80437.1207

چکیده در این تحقیق به بررسی فروریختگی پیش‌رونده قاب‌های مهاربندی شده با بادبند زانویی در سازه‌های فولادی تحت بار آتش‌سوزی بر اساس روش مدل‌سازی نرم‌افزاری پرداخته شد. به منظور انجام تحقیق قاب‌های فولادی ۳ و ۶ و ۹ طبقه، با سیستم بادبندی زانویی هم‌محور و برون‌محور به شکل هشتی در نظر گرفته شد و با استفاده از روش نرم‌افزاری SAP و ABAQUS تحلیل و بررسی گردید. در این خصوص در ابتدا با مدل‌سازی قاب‌ها در نرم‌افزار SAP، قاب‌ها تحلیل و طراحی گردید و مقاطع قاب‌ها مشخص شد. در ادامه قاب در نرم‌افزار ABAQUS تحت بار آتش‌سوزی تحلیل شد. سپس بعد از مشخص شدن المان‌های بحرانی، مجدداً در نرم‌افزار SAP قاب بدون و با حذف المان‌های بحرانی به صورت پی‌درپی تحت بار حریق تحلیل شد تا میزان انرژی نمونه قاب‌ها در هر حالت بررسی و مقایسه شود. بر اساس مطالعه انجام شده بر روی قاب با بادبند زانویی برون‌محور و هم‌محور مشخص گردید که نوع بادبند برون‌محور تأثیر بسیار قابل توجهی را بر کاهش انرژی قاب در مقایسه با سیستم بادبندی هم‌محور داشته است. قاب‌های ۳ و ۶ و ۹ طبقه با بادبند برون‌محور زانویی، انرژی به ترتیب در حدود ۳۵ و ۵۰ و ۶۵ درصد کمتر از قاب با بادبند هم‌محور زانویی را در خلال وقوع حریق و در بازه زمانی کل آن داشته است.

واژه‌های کلیدی فروریختگی پیش‌رونده، سازه فولادی، بادبند زانویی، بار آتش‌سوزی، استهلاک انرژی.

Investigation of Progressive Collapse of Knee Braced Frame in Steel Structures under Fire Loading

Marzieh Akbari

Ali Mohammad Rosta

Ali Alipour Mansourkhani

Hamed Enayati

Abstract In this research, the progressive collapse of braced frames with knee braces in steel structures under fire load was investigated based on the software modeling method. In order to carry out the research 3, 6 and 9-story steel frames with coaxial and off-axis knee bracing systems were considered in the shape of inverted-V and were analyzed and analyzed using the software method and ABAQUS and SAP software. In this regard, at first, the frames were analyzed and designed by modeling the frames in SAP software, and the sections of the frames were determined. In the following, the frame was analyzed in ABAQUS software under the fire load. the frame without and with the removal of the critical elements was analyzed successively under the fire load in the SAP software to check and compare the energy of the frame samples in each case based on the results obtained from the analysis. Based on the study conducted on the frame with off-axis and coaxial knee bracing, it was determined that the bracing type of off-axis had a significant effect on reducing the energy of the frame compared to the coaxial bracing system. The 3, 6 and 9-story frames with off-axis knee bracing had 35%, 50% and 65% less energy than the frames with coaxial knee braces during the fire and in the entire time period.

Key Words Progressive Collapse, Steel Structure, Knee Brace, Fire Load, Energy Dissipation

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۱/۱۰/۱۶ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۲/۴/۳ می‌باشد.

(۱) دانشجوی کارشناسی ارشد سازه، دانشکده مهندسی، دانشگاه یاسوج.

(۲) نویسنده مسئول، استادیار گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه یاسوج.

(۳) استادیار گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه یاسوج.

(۴) استادیار گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه علم و فناوری مازندران.

Email: arousta@yu.ac.ir

مقدمه

تخریب پیش‌رونده به مثابه یک واکنش زنجیره‌ای با گسترش یک آسیب موضعی اولیه در درون سازه، باعث از هم فروپاشیدن جزئی و یا کلی سازه می‌شود. در سال‌های اخیر، مطالعات زیادی در رابطه با خرابی سیستم‌های سازه‌ای صورت گرفته است. این مطالعات، اهمیت پدیده خرابی پیش‌رونده را، که از بارگذاری غیرعادی مانند ضربه ناشی از برخورد وسیله نقلیه با سازه، زمین‌لرزه، انفجار، آتش‌سوزی و... ناشی می‌شود مشخص می‌کند. در اسناد دولتی آمریکا راهبردهایی برای طراحی در مقابل گسیختگی پیش‌رونده، جهت کاهش و یا جلوگیری از وقوع خرابی پیش‌رونده ارائه شده است. در خرابی پیش‌رونده سازه فولادی، خرابی موضعی یک عضو منجر به تغییر شکل‌های قابل توجهی می‌شود که در نهایت انهدام سازه را به همراه دارد که یکی از نمونه‌های آن در کشور ساختمان پلاسکو است. حرارت بالای ناشی از آتش در سازه فولادی باعث می‌شود تا باربری اعضا به طور عمومی و تا حد زیادی کاهش یابد و در نتیجه به راحتی منجر به تخریب پیش‌رونده و فروریختن سازه شود. توجه مهندسان و پژوهشگران بعد از آسیب‌دیدگی بخشی از ساختمان رونان پوینت در لندن در سال ۱۹۶۸ به این موضوع جلب شد. بعد از حادثه تخریب برج‌های جهانی در سال (۲۰۰۱) چندین مؤسسه تحقیقاتی برای اصلاح این وضعیت و به دست آوردن روش‌های طراحی در برابر خرابی پیش‌رونده تشکیل جلسه دادند و توجه ویژه‌ای به موضوع خرابی پیش‌رونده در سازه‌های مهم صورت گرفت. مؤسسه‌های تحقیقاتی به این نتیجه رسیدند که ساختمان‌ها باید طوری طراحی شوند که بتوانند خرابی موضعی را با پخش کردن انرژی و توزیع در بقیه اعضا، یعنی همان پیدا کردن مسیر جایگزین کنترل کنند [1]. دو روش کلی طراحی مستقیم و غیرمستقیم برای طراحی سازه در برابر تخریب پیش‌رونده وجود دارند. روش‌های مقاوم‌سازی محلی ویژه و مسیر بار جایگزین، از انواع روش‌های طراحی مستقیم است و روش نیروی هم‌بند از روش‌های طراحی غیر مستقیم است [2]. در استانداردهای انگلیس برای جلوگیری از خرابی پیش‌رونده از سه روش طراحی نیروی هم‌بند، مسیر بار جایگزین و روش مقاوم‌سازی محلی ویژه استفاده می‌گردد [3].

پژوهش‌های پیشین

تا به امروز مطالعات زیادی در رابطه با سازه‌های فولادی تحت بار آتش‌سوزی صورت گرفته است. اما بیشتر مطالعات در مورد سازه مهاربندی با بادبند زانویی تحت بار زلزله بوده است. رودریگز و همکاران [4] نتایج مجموعه‌ای از ۱۶۸ آزمایش مقاومت در برابر آتش را روی عناصر فولادی فشرده با کشش حرارتی محدود منتشر کردند. علی و همکاران [5] حالت‌های سقوط در یک قاب یک طبقه را بررسی کردند. آنها دو مد فروپاشی درونی در اثر عمل زنجیره‌ای تیرهای گرما دیده و فروپاشی بیرونی ناشی از انبساط حرارتی تیرهای گرمادیده را معرفی کردند. رفتار شاه تیرها در برابر آتش نقش تعیین کننده‌ای در دو مدل خرابی دارد. کراستی [6]، سازه فولادی یک پارکینگ عرشه باز با قاب فولادی یک طبقه را زیر بار آتش مورد بررسی قرار داد. پیرز و همکاران [7] در دانشگاه کویمبرا مقایسه‌ای از رفتار در برابر آتش در ستون‌های فولادی H و CHS با افزایش حرارتی محدود ارائه دادند. اثرات سطح بار، لاغر بودن و شکل مقطع بررسی شد. بر اساس نتایج، سطح بار، تأثیر زیادی بر عملکرد آتش‌سوزی و مقاومت ستون دارد. افزایش سطح بار، منجر به کاهش دما و زمان بحرانی ستون می‌شود. لاغری ستونها نیز، تأثیر به‌سزایی دارد. با افزایش لاغری دمای بحرانی کاهش می‌یابد. نوع مقطع، تأثیر خیلی جزئی در عملکرد و مقاومت در برابر آتش در ستون‌ها داشت. برای ستون‌های با یک سطح بار و مقادیر لاغری مشابه، دما و زمان بحرانی عملاً یکسان بود. جلال و الساوی [8] در مورد استراتژی‌های مختلف در فروریختگی‌های پیش‌رونده در قاب‌های فلزی طراحی شده برای بار ثقلی را بررسی کردند. پاسخ آنالیز دینامیکی غیرخطی سه بعدی برای سازه‌های ۱۰ طبقه با طول دهانه‌های متفاوت با وضعیتی که ستون‌های متفاوت حذف شوند را مقایسه کردند. مشخص شد که نوع بارگذاری بر فروریختگی تأثیر به‌سزایی دارد. همچنین افزایش استحکام تیرها بسیار مؤثرتر از افزایش سختی است. حقایق، روحانی‌منش و مارنانی [9] به بررسی رفتار قاب فولادی با مهاربند زانویی در برابر زلزله و مقایسه آن با مهاربند ضربدری و شورون پرداختند. در محاسبه ضریب رفتار مدل‌های تحلیلی قاب‌های فولادی مهاربندی شده با مهاربند زانویی، ضربدری و شورون مشخص‌گردید که، علاوه بر اینکه سیستم سازه‌ای مؤثر بر

ارزیابی قرار دادند. با مقایسه مدل‌ها مشاهده گردید که سازه در حالت حذف ستون کناری نسبت به ستون گوشه بحرانیتر است. همچنین مشاهده گردید که تفاوت چندانی بین پاسخ سیستم‌های جانبی مختلف در برابر خرابی پیش‌رونده وجود ندارد. کردباغ و محمدی [16] به اثرات چشمه اتصال در مقاومت در برابر سقوط پیش‌رونده قاب‌های فولادی پرداختند. طبق مطالعات، ستون گوشه یا ستون میانی سازه، بلافاصله از مدل خارج شد و فروپاشی تدریجی قاب‌ها با تجزیه و تحلیل دینامیکی غیرخطی ارزیابی شد. نتایج به دست آمده به طور خلاصه نشان داد که در نظر گرفتن اثرات چشمه اتصال، باعث افزایش دوران عضو در اتصالات شده و چرخش پلاستیک عناصر و جابه‌جایی عمودی در بالای ستون حذف شده در سازه را افزایش می‌دهد و در نتیجه احتمال سقوط پیش‌رونده را افزایش خواهد داد. محمد و همکاران [17]، یک شاخص از درجه نامعینی سازه را برای ارزیابی توانایی سازه برای حفظ پایداری آن در طول بارگذاری غیرعادی پیشنهاد دادند. اورتن و همکاران [18]، پلیمرهای تقویت شده با الیاف کربن (CFRP) را در بهبود تداوم تیرهای بتن مسلح، برای توزیع مجدد بار تحمیل شده، توسط ستون آسیب‌دیده به یک منطقه سالم، برای کنترل انتشار فروپاشی پیش‌رونده پیشنهاد دادند. آنها در تیرهای دارای آرماتورهای ناپیوسته، بهبودی در حدود ۵۵٪ - ۶۰٪ را ثبت کردند. کفاش، کرم‌الدین و مقیمان [19] رفتار قاب‌های مهاربندی همگرای ویژه فولادی تحت بار آتش پس از زلزله را بررسی کردند. با مقایسه نتایج مقاومت آتش‌سوزی پس از زلزله سازه تحت رکوردهای مختلف نشان داد که در اثر موارد اعمال رکوردهای مختلف، اختلاف قابل توجهی در مقاومت آتش‌سوزی پس از زلزله ایجاد نکرده است. محمدی و همکاران [20] تخریب پیش‌رونده در سازه‌های قاب خمشی فولادی در مطالعه چند پارامتری بررسی کردند. با مطالعه سازه‌های ۴ و ۸ و ۱۲ طبقه قاب خمشی در OPEN SEES به این نتیجه رسیدند که با کاهش طبقات آسیب‌پذیری بیشتر می‌شود. کائو و همکاران [21] خرابی پیش‌رونده در سازه فولادی تحت تأثیر بار آتش را بررسی کردند و تأثیر نسبت بار و مقاومت اعضای سازه بر رفتار سازه مطالعه کردند. سه حالت فروپاشی جانبی و فروپاشی رو به پایین و فروپاشی ترکیبی جانبی-پایین را تحقیق کردند.

ضریب رفتار سازه می‌باشد؛ هندسه سازه، ابعاد سازه، تعداد طبقات و همچنین نحوه طراحی اعضا بر این پارامتر مؤثر می‌باشند. هرشاد دی‌محال [10] روش مطالعه تأثیر آتش بر روی سازه فولادی را ارائه کرد. براساس نتایج با بروز آتش‌سوزی در زیر ستون‌ها به علت رخداد پدیده کمانش در ستون یک وضعیت بحرانی در سازه ایجاد می‌شود و ستون تحمل بار ایجاد شده را ندارد و به سرعت افت می‌کند. پارامترهایی مانند لاغری، خارج از مرکز بودن بار و سختی سازه، مورد آزمایش قرار گرفتند. نشان داده شد که در مورد عناصر با بارگذاری متمرکز، هر چه سختی ساختار اطراف بیشتر باشد، دمای بحرانی پایینتر است. پروینی و سعادت‌مند [11] با هدف بررسی رفتار سیستم قاب خمشی با استفاده از مهاربند زانویی، در معرض خطر فروریختگی پیش‌رونده تحت بارهای ثقلی و لرزه‌ای تحقیقی را ارائه کردند. نتایج تجزیه و تحلیل پوش‌داون نشان می‌دهد که ظرفیت سقوط پیش‌رونده تحت بار جاذبه، در قاب‌های مهاربند زانویی ظرفیت بیشتری نسبت به قاب‌های مهاربند هم مرکز دارد. با توجه به نتایج تجزیه و تحلیل دینامیک تاریخیچه زمانی، سازه‌های دارای قاب با مهاربند همگرا و مهاربند زانویی، از پتانسیل زیادی در سناریوی سقوط پیش‌رونده لرزه‌ای برخوردار هستند. کیم و همکاران [12] تأثیر عملکرد زنجیره‌ای بر پتانسیل فروریختگی پیش‌رونده در ساختمان‌های قاب خمشی فولادی را مورد بررسی قرار دادند. لو و همکاران [13]، رفتار ساختمان با سازه بتن مسلح را بررسی کردند و مشاهده کردند که وجود هسته مرکزی میزان نامعینی سازه را افزایش می‌دهد و مسیرهای مختلفی را فراهم می‌کند که می‌تواند بارهای بر روی ستون‌های آسیب‌دیده را به مناطق سالم انتقال دهد. عبدالله زاده و شالیکار [14] اثر مقاوم‌سازی یک قاب مقاوم خمشی فولادی (MRF) با مهاربند ضربدیری و V معکوس را بررسی کردند. مقایسه عملکرد بین مهاربند V معکوس و قاب با سیستم مهاربندی ضربدیری، نشان می‌دهد که سیستم‌های مهاربندی V معکوس حدود ۱۰٪ شکل‌پذیری بالاتری را نشان می‌دهند. روح‌اله راه‌نورد و نوید سیاه‌پلو [15] با استفاده از روش اجزای محدود و با به‌کارگیری نرم‌افزار ABAQUS ساختمان ۲۰ طبقه فولادی، با دو نوع سیستم سازه‌ای قاب خمشی و قاب خمشی به همراه مهاربند همگرا و دو نوع سناریوی حذف ستون گوشه و کنار را مورد

ضرورت تحقیق

هدف اصلی این پژوهش ارزیابی رفتار قاب‌های فولادی مهاربندی شده با سیستم بادبند زانویی تحت اثر گسیختگی پیش‌رونده ناشی از بار آتش‌سوزی یا حریق می‌باشد که بالطبع رفتار قاب‌های فولادی به پارامترهای مختلفی مانند ارتفاع سازه، زمان تداوم حریق و... بستگی داشته که مسئله را از حالت کلی به صورت مطالعات پارامتری تبدیل می‌سازد.

بر این اساس می‌توان هدف اصلی تحقیق را در چند بخش مختلف خلاصه نمود: (۱) آنکه مشخص گردد که تحت بار آتش‌سوزی چه محدوده و المان‌هایی از قاب تسلیم شده (بر اساس تحلیل حرارتی نمونه‌ها)، (۲) در ادامه حذف المان‌های قاب انجام شود (المان‌هایی که براساس تحلیل انجام شده تسلیم گردیده) تا رفتار قاب تحت اثر گسیختگی پیش‌رونده تحقیق گردد. در نتیجه حالت بحرانی حذف المان (المان‌ها) تحت اثر بار حریق محقق شود. (۳) سپس به بررسی تأثیر زمان تداوم حریق بر رفتار قاب تحت اثر گسیختگی پیش‌رونده (حالت بحرانی نتیجه شده از بررسی حالت دوم) پرداخته می‌شود که مرحله سوم کار می‌باشد. (۴) در نهایت و در مرحله آخر مقایسه‌ای بین قاب‌های فولادی تحت اثر گسیختگی پیش‌رونده (حالت بحرانی نتیجه شده از بررسی حالت دوم) با مهاربندهای هم‌محور و برون‌محور بدون المان زانویی و با المان زانویی انجام می‌گردد و تأثیر المان زانویی بر نتایج تحقیق می‌شود. این چهار بخش بدنه و اساس کار تحقیق را تشکیل می‌دهد که با استفاده از مدل‌سازی نرم‌افزاری انجام می‌گردد. برخی اهداف فرعی و مهم این تحقیق نیز عبارتند از:

(الف) نحوه استخراج و معرفی تابع حریق و اعمال بار آتش‌سوزی در نرم‌افزارهای مورد استفاده.

(ب) بررسی چگونگی تأثیر زمان دوام آتش‌سوزی بر نتایج به عنوان یکی از پارامترهای مهم و تأثیرگذار بر نتایج.

(پ) بررسی نکات و ملزومات مدل‌سازی نمونه‌ها و تحلیل آنها به خصوص مدل‌سازی در نرم‌افزار آباکوس، نوع المان‌ها و تقسیم‌بندی آنها و سایر شرایط مرزی تأثیرگذار بر نتایج.

نتایج این تحقیق می‌تواند مورد توجه و استفاده بخش‌های مختلف و فعال در صنایع مختلف اعم از صنایع نظامی، مراکز مطالعاتی، تحقیقاتی، آکادمیک، دانشگاهی و سازمان‌های دولتی و خصوصی فعال در ساخت و ساز سازه‌های مختلف و از

جمله پروژه‌های عمرانی و دانشجویان و اساتید و محققان قرار گیرد. از جمله مهمترین کاربردهای نتایج این تحقیق را می‌توان در خصوص طراحی و مقاوم‌سازی ساختمان‌ها در برابر بار آتش‌سوزی دانست که در کشور ما شاید تا به امروز کمتر به آن توجه شده است. لیکن وقوع حوادثی از جمله آتش‌سوزی در ساختمان پلاسکو و... را باید به عنوان نمونه و زنگ خطری دانست که توجه به کنترل و طراحی سازه‌ها در برابر بار آتش‌سوزی را مانند طراحی لرزه‌ای آنها با اهمیت سازد.

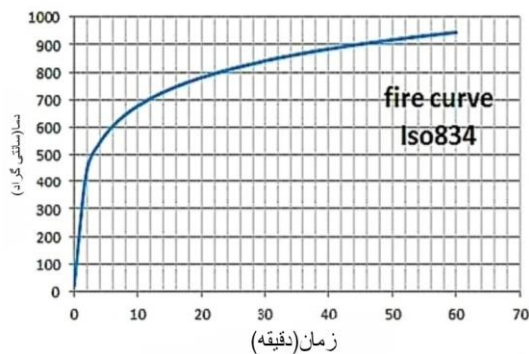
شبیه‌سازی

در این پژوهش به تحلیل سازه‌های فولادی قابی شکل با مهاربند زانویی تحت بار آتش در نرم‌افزار اجزای محدود ABAQUS [22] پرداخته می‌شود که در این خصوص از آنالیز غیرخطی برای تحلیل استفاده می‌گردد. هدف از تحلیل در نرم‌افزار ABAQUS تعیین المان‌ها و محدوده‌ای از قاب بوده که دارای بحرانیترین شرایط تحت بارگذاری حریق می‌باشد.

به این ترتیب با شناسایی این المان‌ها و براساس اولویت‌بندی آنها در ادامه و در نرم‌افزار SAP2000 اقدام به حذف المان‌های برابر بحرانی که به طور معمول در سیستم قاب مهاربندی شده ستون‌ها و بادبندها می‌باشند می‌گردد تا به این ترتیب رفتار نمونه قاب‌ها تحت اثر خرابی پیش‌رونده ناشی از آتش‌سوزی ارزیابی شود و وضعیت بحرانی برای قاب‌ها با بادبند زانویی هم‌محور و برون‌محور مشخص گردد. این طرح شامل قاب با سیستم مهاربندی زانویی به شکل مناسب به نحوی است که دارای کمترین میزان تغییر شکل و تنش و انرژی تحت خرابی پیش‌رونده ناشی از بار حریق باشد. همچنین طراحی بادبند زانویی هم‌محور و برون‌محور با طراحی بادبندهای هم‌محور و برون‌محور متعارف معمولی نیز مقایسه می‌گردد. اثرات زمان تداوم آتش نیز از جمله پارامترهای مؤثر بر نتایج بوده که در این تحقیق بررسی می‌شود. قاب‌های فولادی ۳ و ۶ و ۹ طبقه در این تحقیق مورد توجه بوده و اثر بار آتش بر روی المان‌های آنها بررسی می‌شود. مقاطع ستونها از نوع بال‌پهن و یا باکس، مقاطع تیرها از نوع IPE تک یا دوپل و یا تیورورق و مقاطع مهاربندها از نوع دوپل ناودانی بوده تا با عرف شرایط اجرایی کشور مطابقت داشته باشد. المان زانویی نیز بهتر است

آتش سوزی مشخص شود. همچنین مقادیر تنش تسلیم و تنش نهایی و مدول الاستیسیته نیز به عنوان تابعی از دما بوده که در ادامه هر یک از این موارد مشخص می گردند. در این تحقیق بار مرده طبقات $6/7 \text{KN/m}^2$ و بار زنده طبقات $1/96 \text{KN/m}^2$ و بار مرده بام $6/03 \text{KN/m}^2$ و بار زنده بام $1/47 \text{KN/m}^2$ تعریف شده است. مدول الاستیسیته 210000Kg/cm^2 و وزن واحد حجم 7850Kg/m^3 و تنش تسلیم 2400Kg/cm^2 و تنش نهایی 3700Kg/cm^2 در نظر گرفته شده است.

در ابتدا تابع دما-زمان بایستی مشخص گردد. در این خصوص از تابع دما-زمان به فرم نمودار شکل (۱) استفاده می گردد. نمودارهای تنش-کرنش فولاد ساختمانی در دماهای بالا نیز در شکل (۲) نشان داده شده است که بر این اساس لازم است تا اصلاحات لازم بر روی منحنی و مقادیر تنش کرنش فولاد ساختمانی به منظور تحلیل آتش سوزی در مقایسه با شرایط عادی انجام گیرد [23].



شکل ۱ منحنی زمان-دما استاندارد ایزو ۸۳۴ [23]

در نهایت بایستی مقادیر تنش تسلیم و تنش نهایی و مدول الاستیسیته مصالح فولادی بر اساس دما اصلاح گردد تا از این مقادیر به منظور تحلیل حرارتی استفاده شود. در این خصوص از منحنی های شکل (۳) استفاده می شود.

از مقاطع ظریف و با نمره و سختی کم و با شکل پذیری بالا (نسبت به المان بادبندی) بوده تا به عنوان فیوز ارتباطی عملکرد مناسبی را داشته و خرابی و گسیختگی در این ناحیه ایجاد گردد که در این صورت می توان به راحتی آن را تعویض و بهسازی نمود. جنس فولاد برای سازه ها از نوع ST37 می باشد و بارگذاری ثقلی براساس مبحث ششم مقررات ملی صورت می پذیرد. نوع خاک مورد مطالعه برای سازه ها، خاک نوع III می باشد و ضریب اهمیت ساختمان نیز برای ساختمان های با اهمیت متوسط $I=1$ بررسی خواهد شد. بارگذاری لرزه ای نیز براساس آیین نامه ۲۸۰۰ ویرایش جدید انجام می گیرد.

مراحل گام به گام به منظور مطالعه بر روی قاب های فولادی ۳ و ۶ و ۹ طبقه به صورت زیر قابل بیان است:

(۱) در ابتدا و برای هر یک از قاب های نام برده برای دو حالت سیستم بادبند زانویی از نوع هم محور و برون محور هشتی با استفاده از نرم افزار ABAQUS، تحلیل حرارتی بر روی قاب ها انجام می گردد تا در ابتدا محل های بحرانی المان های قاب ها، برای هر حالت بادبند زانویی اعم از هم محور و برون محور تحت بار حریق مشخص گردند. در این مرحله هیچ المانی از مدل حذف نمی شود چون طبیعتاً مشخص نیست که تحت اثر آتش سوزی چه محدوده و چند المان و کدام المان های قاب تسلیم می گردند و همچنین اولویت تسلیم المان های بحرانی نیز مشخص نیست و با انجام تحلیل حرارتی این مسئله مشخص می شود. همچنین زمان شروع خرابی پیش رونده براساس نتایج به دست آمده و منحنی های انرژی-زمان مشخص می گردد.

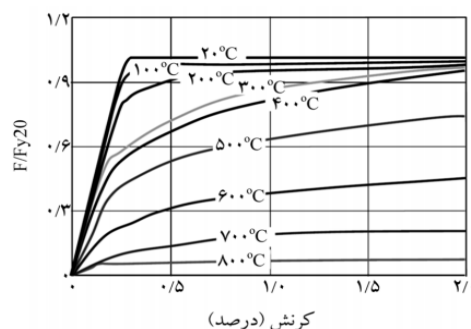
۲- در ادامه قاب های بررسی شده در نرم افزار SAP مجدداً مدل شده و بر اساس نتایج قسمت قبل المان یا المان های بحرانی بر اساس سناریوهای مختلف حذف می گردند و قاب ها بررسی می شوند تا بحرانیترین حالت حذف المان برای آنها مشخص گردد.

(۳) در مرحله سوم زمان تداوم آتش و تأثیر آن بر بحرانیترین حالت مشخص شده قاب ها در حالت قبل بررسی می شود.

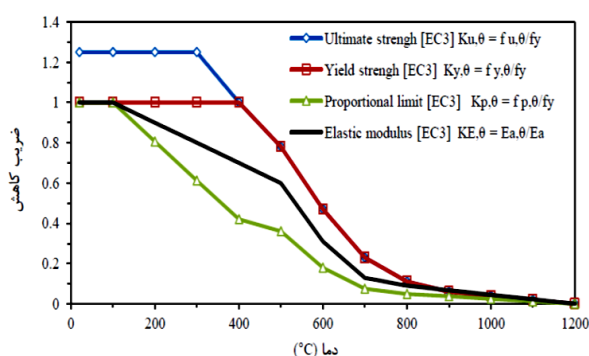
(۴) در نهایت مقایسه ای بین رفتار قاب های فولادی با المان زانویی و بدون المان زانویی تحت اثر خرابی پیش رونده انجام می شود تا در شرایط مشابه تأثیر المان زانویی بررسی گردد. به منظور انجام تحلیل بایستی تابع دما-زمان

در ادامه قطعات مختلف مدل اسمبل می‌شوند. در این تحقیق مدل تنها شامل قاب بوده که در یک پارت ترسیم می‌گردد لذا در این بخش اسمبلی برای یک جز تنها یعنی قاب می‌باشد. همچنین به منظور هماهنگی بین نتایج تحلیل در نرم‌افزارها از تحلیل دینامیکی استفاده می‌شود.

در ادامه شرایط مرزی تعریف می‌گردد. این شرایط مرزی شامل شرایط مرزی تکیه‌گاهی و بارگذاری می‌باشند. پای ستون‌ها به صورت گیردار کامل در نظر گرفته می‌شوند. بارگذاری نیز شامل بارگذاری آتش در نرم‌افزار ABAQUS می‌باشد (بارهای ثقیلی شامل وزن المان‌های قاب و بارهای مرده و زنده کف‌ها و بار جانبی زلزله بوده که در نرم‌افزار SAP به منظور طراحی لرزه‌ای قاب در نظر گرفته می‌شود و نتایج طراحی حاصل و مقاطع نهایی در نرم‌افزار SAP به منظور تحلیل آتش‌سوزی در نرم‌افزار ABAQUS در نظر گرفته می‌شود). در نهایت المان‌بندی اعضای قاب انجام می‌گیرد که تعداد تقسیمات المان‌های قاب بایستی براساس میزان شکل‌پذیری قاب در نظر گرفته شود. نوع المان برای تیر و ستون از نوع BEAM برای بادبندها از نوع TRUSS می‌باشد. BEAM منطقی و مناسب است و توصیه می‌شود. در نرم‌افزار SAP2000 نیز، هندسه مدل ایجاد گردیده و مقاطع و مشخصات مصالح تعریف می‌شود. نوع تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی فرض می‌شود و در این صورت بایستی تابع حریق مطابق با نمودار شکل (۴) در نرم‌افزار تعریف و ترسیم گردد. سایر مراحل تحلیل به مانند تحلیل سازه‌ها در نرم‌افزار انجام می‌شود. خروجی‌ها نیز همان‌طور که در قبل بیان گردید شامل توزیع، مقدار حداکثر تنش حرارتی، کرنش حرارتی، تغییر مکان ناشی از آتش‌سوزی، انرژی سازه در حین آتش‌سوزی و در نهایت نیروهای داخلی المان‌های قاب ناشی از اثرات حرارت بر سازه به ازای دماهای مختلف بوده که از نرم‌افزار به صورت عددی و نموداری قابل استخراج است. همچنین در این نرم‌افزار با حذف المان‌های باربر اصلی سازه (که ترتیب حذف آنها بر اساس تحلیل و نتایج آن در نرم‌افزار ABAQUS حاصل شده) رفتار سازه تحت اثر خرابی پیش‌رونده در اثر آتش‌سوزی ارزیابی خواهد شد.



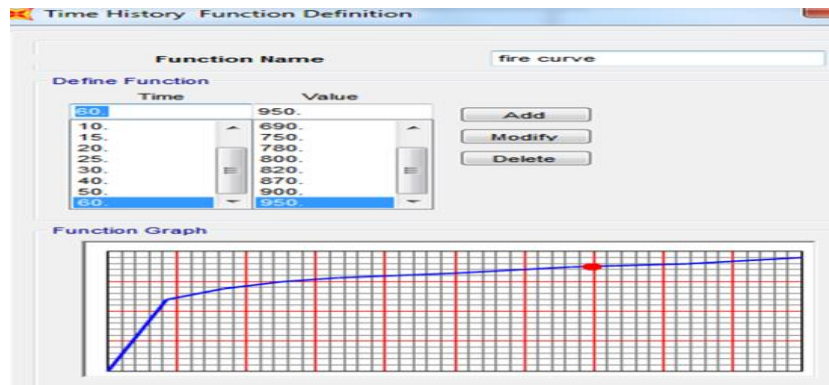
شکل ۲ نمودارهای تنش-کرنش فولاد ساختمانی در دماهای بالا [23]



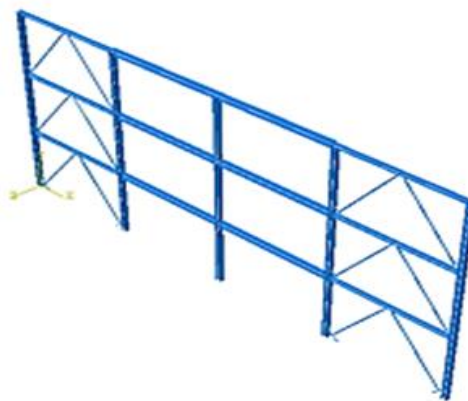
شکل ۳ ضرایب کاهش روابط تنش-کرنش در دمای بالا برای فولاد ساختمانی [23]

روند مدل‌سازی و تحلیل نمونه‌ها

ترسیم هندسه مدل: به منظور ترسیم هندسه مدل در نرم‌افزار ABAQUS نیازی به مدل‌سازی قاب بر اساس استفاده از المان‌های حجمی نبوده و تنها زمان تحلیل و مدل پیچیده می‌گردد. لذا با استفاده از المان‌های خطی قاب در نرم‌افزار مدل می‌گردد. در گام بعدی مشخصات مصالح تعریف می‌شود. این بخش از کار دارای اهمیت بسیار زیادی بوده و در حقیقت نتایج به دست آمده کاملاً به این بخش وابسته است. به منظور انجام تحلیل که می‌تواند از نوع استاتیکی غیرخطی و با در نظر گرفتن تغییرشکل‌های بزرگ و یا دینامیکی باشد مشخصات الاستیک و پلاستیک مصالح فولادی، وزن مخصوص، ضریب انبساط حرارتی، مدول الاستیسیته، تنش تسلیم و نهایی وابسته به دما و... برای فولاد بایستی در این بخش به دقت معرفی گردند که این داده‌ها براساس منحنی‌های ارائه شده در شکل (۱ و ۲ و ۳) و توضیحات مربوطه استخراج شده و در نرم‌افزار وارد می‌گردند. در بخش بعدی مشخصات مقاطع تیرها و ستون‌ها که در نرم‌افزار براساس شکل مقطع قابل تعریف است معرفی می‌شوند و این مقاطع به تیر و ستون و بادبند تخصیص می‌یابد.



شکل ۴ تعریف تابع دما- زمان در نرم افزار SAP2000



شکل ۵ نمونه قاب ۳ طبقه با بادبند هم محور زانویی

جدول ۱ مشخصات اعضای سازه‌ای ساختمان‌های مورد نظر

ناودانی	تیر دهانه های میانی	تیر دهانه اول و آخر	ستون	ساختمان
۲UNP۱۰۰	PG۲۲۰×۱۰F۱۲۰×۱۵	IPE۲۰۰	IPB۲۴۰	طبقه ۳
۲UNP۱۴۰	PG۳۰۰×۱۰F۱۵۰×۱۵	IPE۲۷۰	Box۳۵۰×۳۵۰	طبقه ۶
۲UNP۲۰۰	PG۳۰۰×۱۰F۲۰۰×۱۵	IPE۲۷۰	BOX۴۰۰×۴۰۰	طبقه ۹

سازه‌های نمونه

نوع سازه: تمامی سازه‌ها فولادی و به شکل دو بعدی طراحی و تحلیل می‌گردند.

-ارتفاع قاب‌های فولادی: به این منظور سه تیپ قاب به قرار ۳ و ۶ و ۹ طبقه فولادی در نظر گرفته می‌شوند (با ارتفاع هر طبقه برابر با ۳ متر).

-طول دهانه‌های قاب و دهانه‌های دارای بادبندی: به طور معمول مقدار متعارف در محدوده ۴ تا ۶ متر بوده که در این تحقیق پارامتری، ثابت برابر با ۵ متر برای تمامی دهانه‌های قاب‌های مورد مطالعه فرض می‌گردد.

-نوع سیستم باربر جانبی: در این تحقیق هدف بررسی سیستم

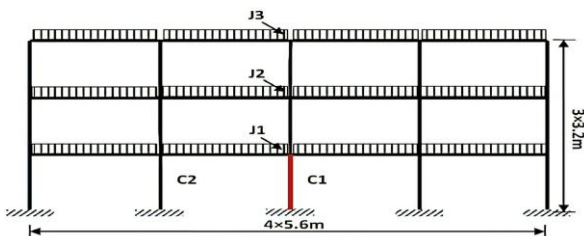
بادبندی زانویی از نوع هم محور و برون محور به شکل هشتی و مقایسه رفتار آنها با مهاربندهای هشتی هم محور و برون محور معمولی مشابه بدون المان زانویی می‌باشد.

به منظور بررسی بر روی قاب ۳ طبقه در ابتدا قاب با مهاربند زانویی هم محور هشتی و در ادامه قاب با مهاربندی برون محور بررسی می‌گردد. در گام اول قاب در نرم افزار SAP تحلیل و طراحی شده است (طراحی لرزه‌ای). در سازه ۳ طبقه مقاطع ستون‌ها از نوع تیر آهن نیم پهن بوده است. ارتفاع طبقات ۳ متر و طول دهانه‌ها ۵ متر در نظر گرفته شده است (شکل ۵). ابعاد مقاطع سازه‌های بررسی شده در جدول (۱) آمده است.

حال با مشخص شدن طراحی قاب نمونه، در ادامه تحلیل قاب تحت اثر بار آتش‌سوزی بدون در نظر گرفتن اثرات خرابی پیش‌رونده در نرم‌افزار ABAQUS بررسی می‌شود. به منظور ترسیم هندسه قاب از حالت ترسیم Wire2d استفاده می‌شود. این حالت به معنی استفاده از المان خطی در فضای دو بعدی می‌باشد که برای مدل‌سازی قاب (به صورت دو بعدی) مناسب است. در ادامه مشخصات مصالح فولادی که یکی از مهمترین بخش‌ها به منظور تحلیل می‌باشد تعریف می‌شود. مشخصات الاستیسیته و پلاستیسیته فولاد در این حالت تابعی از دما و تغییرات آن در حین آتش‌سوزی است که بنا بر آنچه که بیان شد در این قسمت در نرم‌افزار وارد می‌گردد.

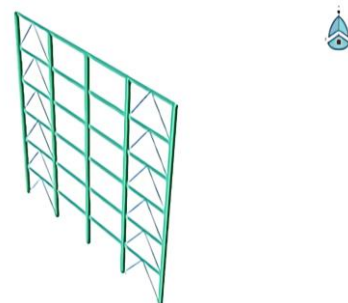
صحت‌سنجی

به منظور اعتبارسنجی مطالعه‌ای تحت عنوان تحلیل خرابی پیش‌رونده ساختمان فولادی تحت بار حریق [24] مورد توجه و مبنای کار قرار گرفت. سازه مورد نظر یک قاب فولادی ۳ طبقه ۴ دهانه بوده که تحت اثر بار حریق و گسیختگی پیش‌رونده ناشی از آن ستون میانی آن تسلیم شده (حذف می‌گردد) و رفتار قاب پس از حذف ستون ارزیابی می‌شود. در شکل (۷) هندسه و ابعاد قاب نشان داده شده است. در تحقیق انجام شده از روش‌های تحلیلی و مدل‌سازی عددی با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS به منظور مطالعه روی چند نمونه قاب استفاده گردید. هدف از بررسی قاب مورد نظر ارزیابی نیروی محوری ستون C2 پس از حذف ستون C1 بوده که به این منظور مجدداً با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS نتایج ارزیابی گردیده و با نتایج تحقیق انجام شده مقایسه می‌گردد.



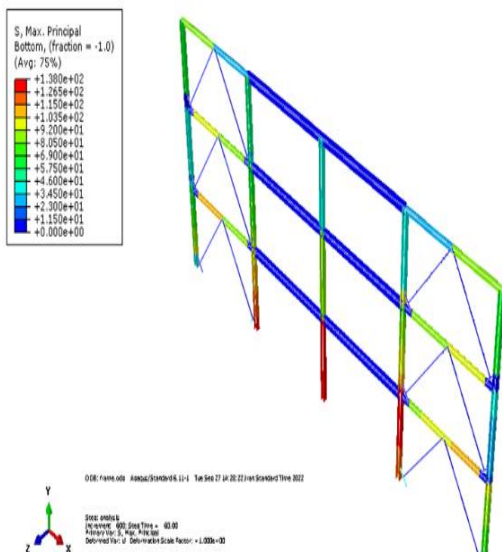
شکل ۷ هندسه و ابعاد قاب فولادی ۳ طبقه و موقعیت ستون حذف شده تحت اثر پدیده خرابی ناشی از بار حریق [24]

با توجه به اینکه ضریب رفتار قاب با سیستم بادبند زانویی در آیین نامه ۲۸۰۰ تعریف نشده لذا بایستی از روش تحلیل دینامیکی به جای روش تحلیل استاتیکی استفاده نمود. لیکن در این بررسی فرض می‌گردد که المان زانویی به طور کامل تسلیم شده و لذا می‌توان این فرض را نمود که قاب با سیستم مهاربندی از نوع بادبند هم‌محور متداول بوده و ضریب رفتار سیستم بادبندی هشتی معمولی را برای آن در نظر گرفته می‌شود. المان زانویی شکل‌پذیری قاب را افزایش داده که این موضوع ضریب رفتار بالاتری را برای قاب در پی داشته که نتیجه آن ضریب زلزله کمتر و در نتیجه کاهش نیروی برش پایه ناشی از زلزله می‌باشد. لذا طراحی قاب با سیستم بادبند زانویی که براساس سیستم بادبند معمولی مشابه طراحی می‌شود را می‌توان دست بالا دانست که در جهت اطمینان است. در طراحی سازه ۶ طبقه، مقاطع ستون‌ها به شکل باکس و مقاطع تیرها از نوع تیورق یا IPE استاندارد و مقاطع بادبندها نیز از دوپل ناودانی و در نهایت مقاطع لینک‌های ارتباطی بادبند نیز از پروفیل نبشی یا IPE ضعیف در نظر گرفته می‌شوند. نوع بادبند نیز به صورت هشتی در نظر گرفته می‌شود. قاب دارای چهار دهانه ۵ متری بوده که دهانه‌های اول و آخر دارای سیستم مهاربندی از نوع بادبند زانویی می‌باشد. ارتفاع طبقات نیز ۳ متر فرض شده و فولاد مصرفی از نوع نرمه ساختمانی معادل با ST37 در نظر گرفته می‌شود. در ابتدا قاب بر اساس روش استاتیکی تحلیل و در ادامه طراحی شده و در ادامه، تحلیل حرارتی بر روی آن انجام می‌گردد و در نهایت امر رفتار آن تحت خرابی پیش‌رونده ناشی از بار آتش‌سوزی بررسی می‌گردد (شکل ۶).

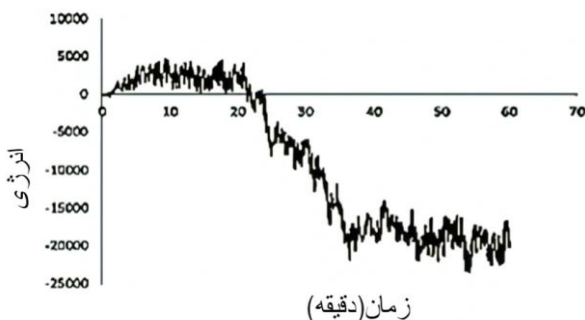


شکل ۶ قاب ۶ طبقه با مقاطع آن در نرم‌افزار ABAQUS

در بازه زمانی نام برده اتفاق افتاده است. لذا تا ۲۰ دقیقه از زمان شروع حریق هنوز تسلیم المان‌ها آغاز نشده و پس از دقیقه ۳۵ نیز المان‌ها تسلیم شده و وارد فاز انهدام شده‌اند و تسلیم اعضا از دقیقه ۳۵ به بعد نمی‌تواند منجر به انهدام اعضا گردد چرا که باز توزیع نیروها و تنش‌های ناشی از بار حریق انجام شده و نیروها از المان‌های آسیب دیده به سایر اعضای سازه انتقال یافته‌اند.



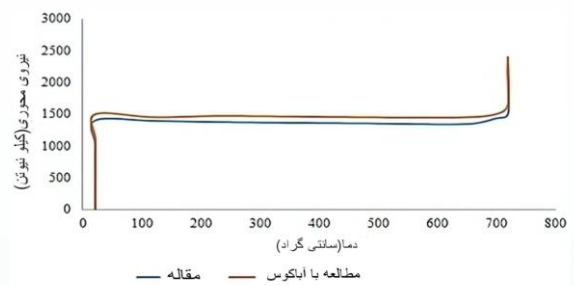
شکل ۹ توزیع تنش حرارتی در قاب ۳ طبقه با بادبند زانویی هم‌محور ناشی از بار حریق



شکل ۱۰ منحنی انرژی-زمان قاب ۳ طبقه با بادبند زانویی هم‌محور ناشی از بار حریق

در ادامه منحنی‌های انرژی‌های زمان برای سه حالت حذف المان‌ها به قرار: (۱) حذف ستون میانی قاب، (۲) حذف ستون میانی و ستون سمت راست و (۳) حذف ستون‌های میانی و طرفین آن بررسی و مقایسه می‌گردد.

بر اساس نتایج حاصل از مدل‌سازی و تحلیل انجام شده مشخص گردید که اختلاف خطای نسبی حداکثر ۱۰ درصدی بین نتایج به دست آمده برای نیروی محوری ستون C2 حاصل از مطالعه انجام شده در قبل (نتایج مقاله) و مطالعه حاضر وجود دارد. لذا دقت نتایج مناسب بوده و به منظور کاهش مقدار خطای نسبی می‌توان تعداد تقسیمات المان‌های قاب (مش‌بندی) را افزایش داد. لازم به ذکر است که با افزایش تعداد تقسیمات المان‌های قاب (تیر و ستون) دقت تحلیل و زمان آن افزایش می‌یابد (شکل ۸).



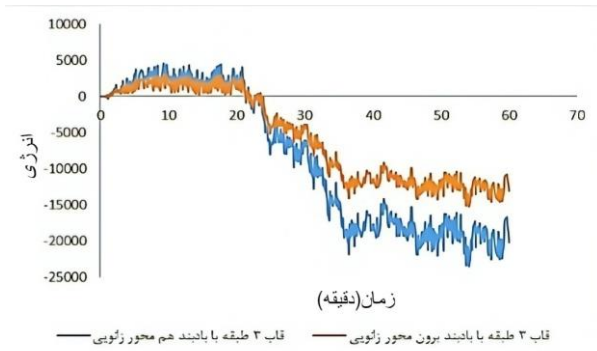
شکل ۸ مقایسه تغییرات نیروی محوری ستون C2 در دماهای مختلف بر اساس نتایج تحقیق انجام شده (مقاله) و تحقیق حاضر (به ترتیب منحنی‌های آبی و قرمز رنگ)

نتایج تحلیل‌ها

در ابتدا قاب ۳ طبقه در نرم‌افزار ABAQUS مدل گردیده و تحت بار حریق تحلیل می‌شود. همان‌طور که در شکل (۹) مشخص است ستون میانی و دو ستون اطراف آن و همچنین تیرهای طبقات اول و دوم در کناره‌های قاب دارای تنش‌های حرارتی بیشتری بوده است. بر این اساس در ادامه تمرکز بر روی ستون‌های نام برده بوده و یک‌به‌یک حذف شده و رفتار قاب ارزیابی می‌گردد. در این خصوص ابتدا ستون میانی و در ادامه ستون‌های طرفین آن حذف می‌شود و با استفاده از نرم‌افزار SAP اقدام به ارزیابی قاب می‌گردد.

در شکل (۱۰) نیز منحنی انرژی-زمان قاب در طول زمان حریق نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است در بازه زمانی ۲۰ تا ۳۵ دقیقه منحنی انرژی دارای شیب بسیار شدید و ناگهانی را داشته و این موضوع نشان می‌دهد که زمان شروع تسلیم اولین المان از دقیقه ۲۰ بوده و تسلیم شدن المان‌ها

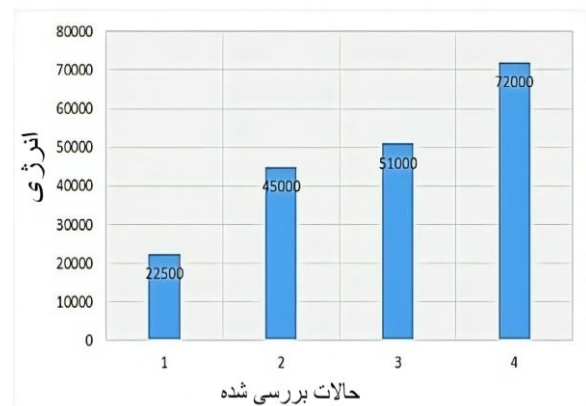
شکل‌پذیری بالای بادبند برون‌محور بوده که در خلال وقوع حریق بر اثر قابلیت پذیرش تغییرشکل‌ها بازتوزیع نیروها و جذب و استهلاک انرژی را مرتباً در پی داشته که نتیجه آن کاهش قابل ملاحظه انرژی است (شکل ۱۲).



شکل ۱۲ مقایسه منحنی‌های انرژی-زمان قاب ۳ طبقه با بادبند هم‌محور زانوئی و برون‌محور ناشی از بار حریق

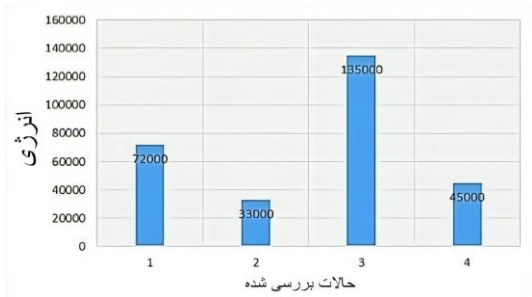
براساس نتایج به دست آمده از تحلیل مشخص شد که برای قاب با بادبند زانوئی برون‌محور، فقط ستون میانی دارای شرایط بحرانی بوده‌است. در توجیه نتیجه حاصل شده می‌توان چنین بیان نمود که قاب فولادی با مهاربند برون‌محور دارای شکل‌پذیری بالایی می‌باشد. این مسئله در ترکیب با المان زانوئی منجر به افزایش قابل توجه شکل‌پذیری قاب می‌گردد. قاب ۳ طبقه فولادی به عنوان قاب صلب بوده که در صورت استفاده از بادبند هم‌محور، باعث صلبیت و سختی بسیار بیشتری می‌گردد. لیکن در صورت استفاده از بادبند برون‌محور که همراه با المان زانوئی است، شکل‌پذیری بسیار قابل توجهی را داشته و رفتار لرزه‌ای و رفتار آن در مقابل سایر بارها از جمله بار حریق را بهبود می‌بخشد. لذا در ادامه تنها سناریوی حذف ستون میانی برای قاب مورد نظر بررسی می‌گردد. براساس نتایج به دست آمده (شکل ۱۳) مقدار انرژی برای حالتی که ستون میانی حذف گردیده برای قاب ۳ طبقه با بادبند برون‌محور زانوئی، در حدود ۱۰ درصد انرژی افزایش یافته‌است. هر چند انرژی قاب با بادبند برون‌محور زانوئی بیش از انرژی برای قاب با بادبند هم‌محور زانوئی بوده (در حدود ۳۳ درصد بیشتر) اما حذف ستون در قاب با بادبند برون‌محور زانوئی تنها باعث افزایش انرژی به میزان ۱۰ درصد شده‌است.

همان‌طور که در شکل (۱۱) مشخص است در حالت حذف تک ستون میانی مقدار انرژی تا ۲ برابر و برای حالت حذف دو ستون انرژی تا ۲/۳ برابر و برای حالت حذف سه ستون انرژی تا ۳/۲ برابر در مقایسه با حالتی که المانی حذف نشده افزایش یافته‌است. لذا نرخ افزایش برای حالت حذف تک ستون میانی نسبت به سایر حالات (به صورت نسبی) بیشتر بوده‌است و این به معنای آن است که حذف ستون میانی قاب بر اثر حریق بیشترین تأثیر را بر افزایش خسارات وارده بر سازه را دارد. لذا توجه ویژه بر مقاوم‌سازی المان‌های باربر اصلی و به خصوص ستون‌های میانی سازه که بخش بیشتری از بارهای وارده بر سازه را حمل می‌کنند، شود.

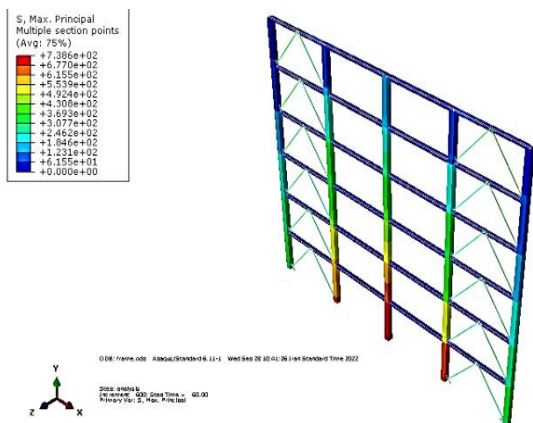


شکل ۱۱ مقایسه انرژی قاب ۳ طبقه با مهاربند هم‌محور زانوئی به ترتیب برای حالات: (۱) بدون حذف المان، (۲) حذف ستون میانی، (۳) حذف ستون میانی و ستون سمت راست و (۴) حذف ستون میانی و ستون‌های طرفین

با توجه به نتایج برای قاب ۳ طبقه با سیستم بادبند هم‌محور زانوئی بحرانیترین حالت را می‌توان حذف ستون میانی سازه تحت اثر حریق دانست. سپس به بررسی قاب ۳ طبقه فولادی با سیستم بادبند برون‌محور زانوئی پرداخته می‌شود و در ابتدا طراحی قاب برای سیستم بادبند برون‌محور کنترل شده تا در ادامه به آنالیز حرارتی آن پرداخته شود. لازم به ذکر است که طول تیر پیوند بر اساس طراحی معمول و بهینه آن (بر اساس رفتار برشی تیر پیوند) برابر با ۱ متر (۰/۲ طول دهانه تیر) در نظر گرفته شده‌است. براساس نتایج از تحلیل قاب‌های ۳ طبقه هم‌محور و برون‌محور زانوئی مشخص گردید که در مجموع قاب با بادبند برون‌محور زانوئی انرژی در حدود ۳۵ درصد کمتر از قاب بادبند هم‌محور زانوئی را در خلال وقوع حریق و در بازه زمانی کل آن داشته‌است. این موضوع به دلیل



شکل ۱۴ مقایسه انرژی قاب ۳ طبقه با مهاربندهای مختلف در برابر خرابی پیش‌رونده به ترتیب برای حالات: (۱) قاب با بادبند هم‌محور زانویی، (۲) قاب با بادبند برون‌محور زانویی، (۳) قاب با بادبند هم‌محور معمولی و (۴) قاب با بادبند برون‌محور معمولی

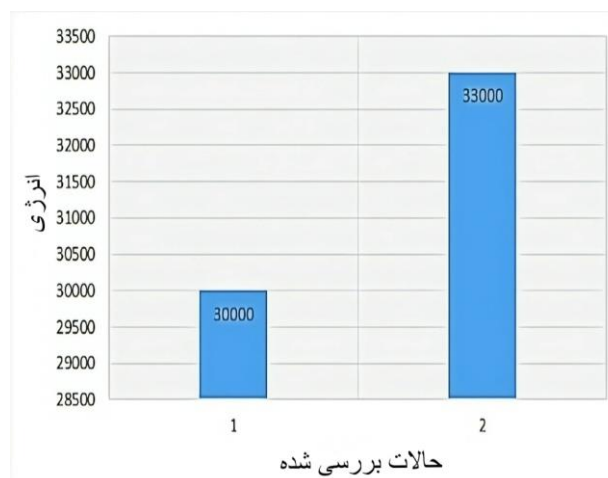


شکل ۱۵ توزیع تنش ناشی از بار حریق در قاب ۶ طبقه با بادبند زانویی هم‌محور در نرم‌افزار ABAQUS

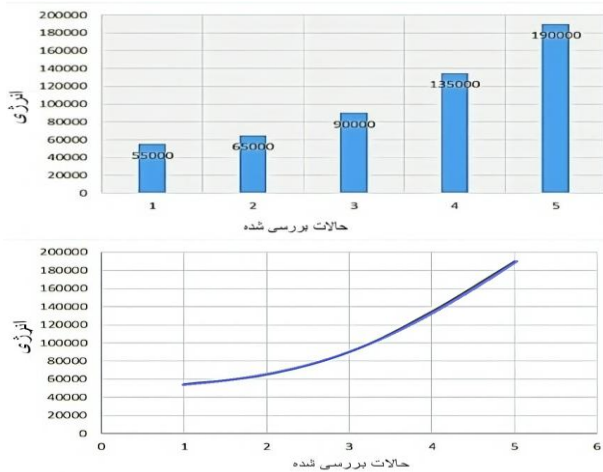
نکته دوم در خصوص زمان شروع تسلیم شدن المان‌ها بر اثر خرابی پیش‌رونده ناشی از حریق است. برای قاب ۶ طبقه برخلاف قاب ۳ طبقه شرایط خرابی به صورت پیوسته طی دو مرحله رخ داده است. با توجه به شکل (۱۶) در ابتدا و تا دقیقه ۲۰ حریق در سازه گسترش یافته و شرایط تسلیم شدن المان از حدود دقیقه ۲۰ تا حدود دقیقه ۳۵ اتفاق افتاده است و از دقیقه ۳۵ تا حدود دقیقه ۴۵ سازه شرایط تقریباً ثابتی را تجربه کرده و مجدداً از دقیقه ۴۵ تا ۵۰ شیب منحنی صعودی شده و المان‌های بعدی تسلیم شده‌اند. براساس نتایج تحلیل مرحله‌ای مشاهده گردید که روال تسلیم المان‌ها به مانند قاب ۳ طبقه بود که در ابتدا ستون میانی و بعد به ترتیب ستون‌های سمت راست و چپ در طبقه اول تسلیم شدند و در ادامه ستون میانی در طبقه دوم تسلیم گردید. بالطبع با افزایش زمان حریق پیش‌بینی

این در حالی است که حذف ستون در قاب با بادبند هم‌محور زانویی باعث افزایش ۳/۲ برابری انرژی شده است و از این منظر قاب با بادبند زانویی برون‌محور مطلوبتر است. مضاف بر اینکه برای قاب با بادبند برون‌محور تنها یک ستون شرایط بحرانی را داشته و این در حالی است که برای قاب با بادبند هم‌محور زانویی تعداد ۳ ستون وضعیت بحرانی دارد که در مجموع این مسئله مطلوب بودن رفتار بادبند برون‌محور زانویی در برابر خرابی پیش‌رونده ناشی از حریق را نشان می‌دهد (شکل ۱۴). نتایج دو مسئله این را نشان می‌دهد اولاً آنکه استفاده از بادبند برون‌محور به سبب شکل‌پذیری بالای آن و تأثیر بسیار قابل توجه آن بر قاب‌های کوتاه، علاوه بر رفتار لرزه‌ای مناسب، سبب رفتار و عملکرد بسیار عالی در برابر خرابی پیش‌رونده شده است. ثانیاً استفاده از المان زانویی تأثیر بسیاری بر رفتار و عملکرد سازه‌های کوتاه با سیستم مهاربندی زانویی در برابر خرابی پیش‌رونده ناشی از بار حریق دارد.

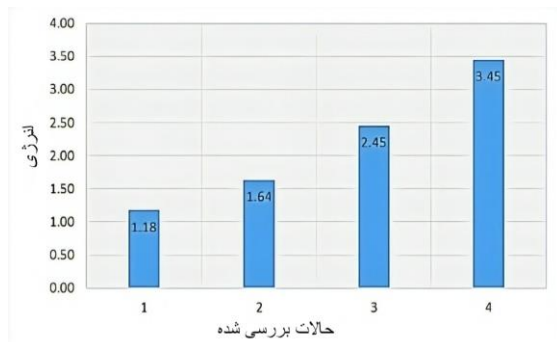
برای قاب ۶ طبقه با بادبند هم‌محور زانویی براساس تحلیل حرارتی مشخص شد که ستون میانی و ستون‌های دو طرف آن در طبقه اول و ستون میانی در طبقه دوم شرایط بحرانی را دارند. لذا سناریوی حذف ستون شامل حذف ستون میانی در طبقه اول و سپس حذف ستون میانی در طبقه دوم و در گام سوم و چهارم حذف ستون‌های طرفین ستون میانی طبقه اول به ترتیب و اولویت بحرانی بودن آنها می‌باشد (شکل ۱۵).



شکل ۱۳ مقایسه انرژی قاب ۳ طبقه با مهاربند برون‌محور زانویی به ترتیب برای حالات: (۱) بدون حذف المان و (۲) حذف ستون میانی



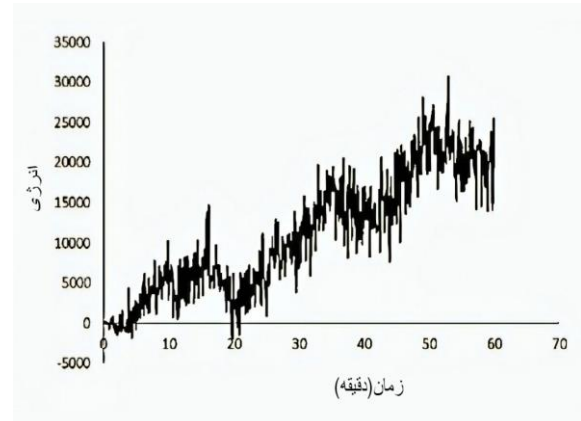
شکل ۱۷ مقایسه انرژی قاب ۶ طبقه با مهاربند هم‌محور زانویی به ترتیب برای: (۱) بدون حذف المان، (۲) حذف ستون میانی در طبقه اول، (۳) حذف ستون میانی و ستون سمت راست آن در طبقه اول، (۴) حذف ستون میانی و ستون‌های طرفین آن در طبقه اول و (۵) حذف ستون میانی در طبقه اول و ستون‌های طرفین آن و ستون میانی طبقه دوم



شکل ۱۸ مقایسه نسبت انرژی قاب ۶ طبقه با مهاربند هم‌محور زانویی به ترتیب برای حالات ۲ تا ۵ نسبت به حالت ۱ (بدون حذف المان)

براساس نتایج تحلیل قاب‌های ۶ طبقه هم‌محور و برون‌محور زانویی مشخص شد که در قاب با بادبند برون‌محور زانویی انرژی در حدود ۵۰ درصد کمتر از قاب با بادبند هم‌محور زانویی را در خلال وقوع حریق و در کل بازه زمانی داشته است. در این حالت علاوه بر شکل‌پذیری و قابلیت جذب و استهلاک انرژی بالای المان زانویی، خود قاب و همچنین مهاربندهای برون‌محور دارای شکل‌پذیری بالایی بوده است. قاب جزو قاب‌های با ارتفاع متوسط و نسبتاً بلند بوده و دارای شکل‌پذیری نسبتاً مناسب و بالایی می‌باشد (شکل ۱۹).

می‌گردد تا حدود ۹۰ تا ۱۲۰ دقیقه پس از شروع حریق ستون‌های هم‌جوار ستون میانی در طبقه دوم و در ادامه ستون میانی در طبقه سوم و ستون‌های هم‌جوار آن ... نیز تسلیم گردند. لذا وضعیت خرابی پیش‌رونده در قاب به طور کلی مشخص گردید که در حالت کلی در ابتدا ستون میانی در هر طبقه و بعد ستون‌های دو طرف آن و به همین منوال برای طبقات بالا پی‌درپی تسلیم می‌گردند.

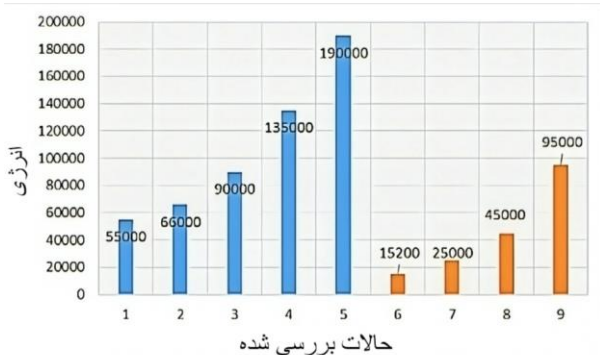


شکل ۱۶ منحنی انرژی زمان قاب ۶ طبقه با بادبند زانویی هم‌محور ناشی از بار حریق

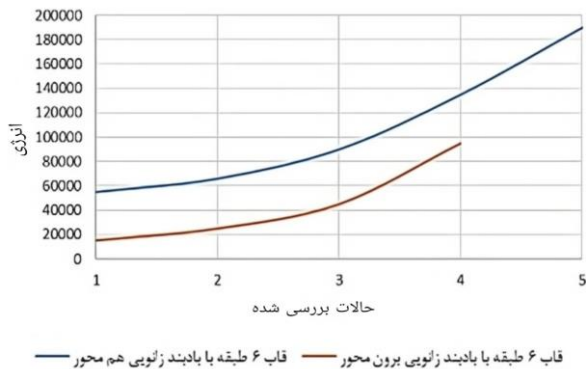
حال و در ادامه براساس سناریوهای مطرح شده که در زیر آورده شده المان‌ها حذف و رفتار قاب بررسی می‌گردد: (۱) حذف ستون میانی در طبقه اول، (۲) حذف ستون سمت راست و ستون میانی در طبقه اول، (۳) حذف ستون‌های طرفین و ستون میانی در طبقه اول و (۴) حذف ستون میانی در طبقه دوم (شکل ۱۷ و ۱۸)

برای قاب ۶ طبقه با مهاربند هم‌محور زانویی مشاهده گردید که نسبت افزایش انرژی برای هر حالت حذف المان پی‌درپی با افزایش تعداد المان‌های حذف شده نه تنها به صورت صعودی و قابل توجهی افزایش یافته بلکه ارتباط بین تعداد المان‌های حذف شده و انرژی به صورت غیرخطی است (شکل ۱۷) که این نکته بسیار جالب توجه است. این موضوع بسیار مهم است که حذف هر المان تحت اثر بار آتش‌سوزی منجر به افزایش قابل توجه انرژی می‌گردد که در بخش‌های قبل بررسی گردید لیکن موضوع بسیار پر اهمیتتر از موقعیت المان حذف شده است.

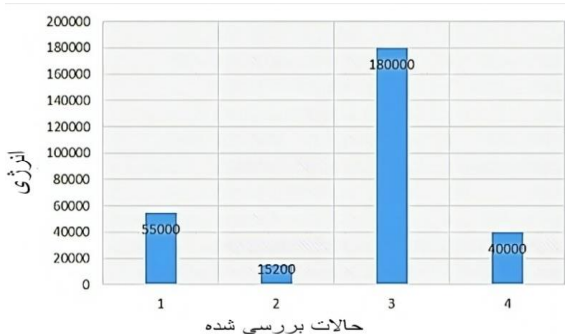
سازه را به میزان قابل توجهی افزایش داده و این موضوع منجر به رفتار بسیار مطلوب قاب تحت اثر خرابی پیش‌رونده ناشی از بار آتش‌سوزی می‌گردد (شکل ۲۱-۲۳).



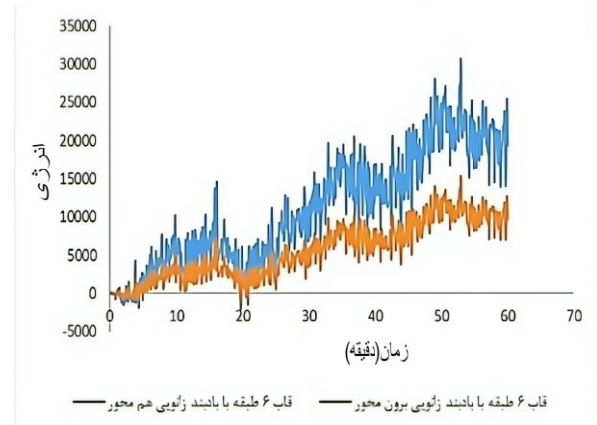
شکل ۲۱ مقایسه انرژی قاب ۶ طبقه با مهاربند هم‌محور و برون‌محور زانویی برای سناریوهای مختلف بدون و با حذف المان (۵ حالت برای بادبند هم‌محور و ۴ حالت برای بادبند برون‌محور)



شکل ۲۲ مقایسه تغییرات انرژی قاب ۶ طبقه با مهاربند هم‌محور و برون‌محور زانویی برای سناریوهای مختلف حذف المان (۵ حالت برای بادبند هم‌محور و ۴ حالت برای بادبند برون‌محور زانویی)

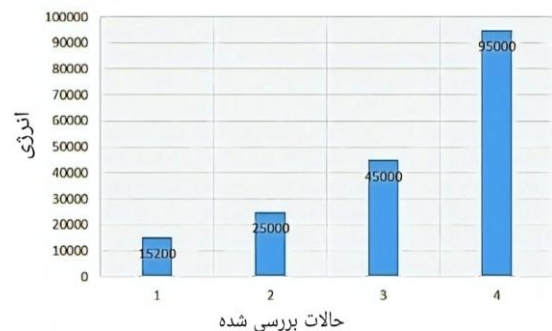


شکل ۲۳ مقایسه انرژی قاب ۶ طبقه با مهاربند‌های مختلف در برابر خرابی پیش‌رونده به ترتیب برای حالات: (۱) قاب با بادبند هم‌محور زانویی، (۲) قاب با بادبند برون‌محور زانویی، (۳) قاب با بادبند هم‌محور معمولی و (۴) قاب با بادبند برون‌محور معمولی



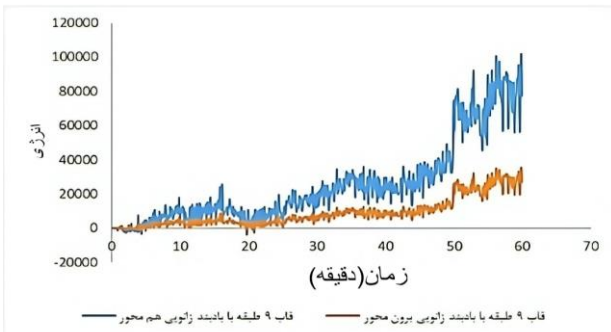
شکل ۱۹ مقایسه منحنی‌های انرژی- زمان قاب ۶ طبقه با بادبند زانویی هم‌محور و برون‌محور ناشی از بار حریق

بر اساس نتایج به دست آمده از تحلیل قاب ۶ طبقه برون‌محور به ترتیب تنش‌های ایجاد شده در ستون میانی در طبقه اول و ستون سمت راست آن و در ادامه ستون میانی در طبقه دوم باعث بحرانیتر شدن آنها گردیدند. لذا ۳ سناریوی حذف ستون در این حالت مورد توجه است که در ادامه نتایج حاصل از حذف آنها بررسی می‌گردد (شکل ۲۰).



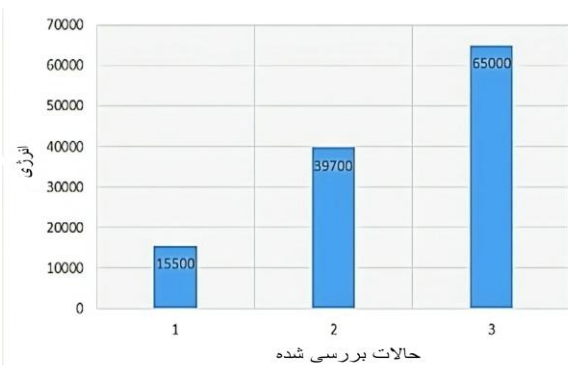
شکل ۲۰ مقایسه انرژی قاب ۶ طبقه با مهاربند برون‌محور زانویی به ترتیب برای حالات: (۱) بدون حذف المان، (۲) حذف ستون میانی در طبقه اول، (۳) حذف ستون میانی و ستون سمت راست آن در طبقه اول و (۴) حذف ستون میانی در طبقه دوم

همچنین بر اساس مقایسه نتایج انرژی مشخص شد که استفاده از بادبند برون‌محور زانویی برای قاب ۶ طبقه نیز کارایی و شرایط مطلوبتری را در مقایسه با بادبند هم‌محور زانویی دارد که در این حالت علاوه بر شکل‌پذیری بادبند برون‌محور و المان زانویی، شکل‌پذیری بالای قاب نیز در مشارکت با شکل‌پذیری بادبندی و المان زانویی در مجموع شکل‌پذیری

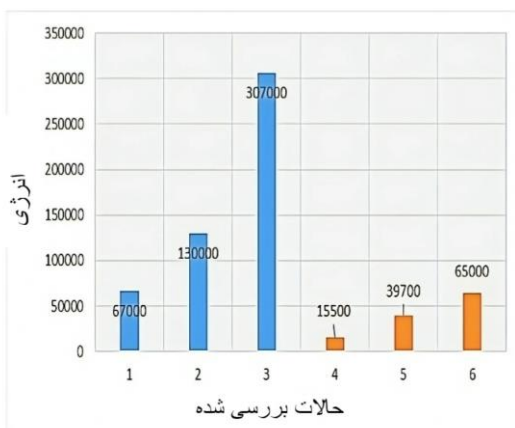


شکل ۲۵ مقایسه منحنی‌های انرژی-زمان قاب ۹ طبقه با بادبند زانویی هم‌محور و برون‌محور ناشی از بار حریق

براساس نتایج به دست آمده مشخص گردید که حذف ستون میانی در طبقات اول و دوم بحرانیترین شرایط را در پی دارد. لذا در ادامه براساس دو سناریوی حذف ستون در طبقه اول و در ادامه در طبقه دوم بررسی می‌گردد (شکل ۲۶).



شکل ۲۶ مقایسه انرژی قاب ۹ طبقه با مهاربند برون‌محور زانویی به ترتیب برای حالات: (۱) بدون حذف المان، (۲) حذف ستون میانی در طبقه اول و (۳) حذف ستون میانی در طبقات اول و دوم

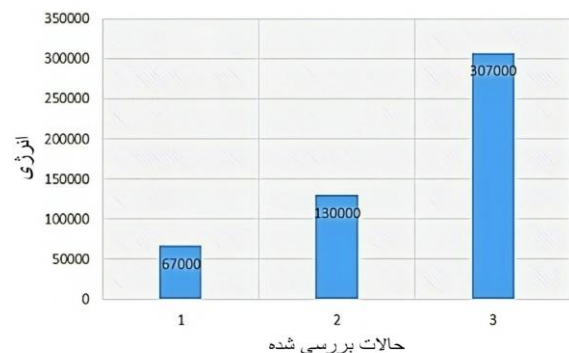


شکل ۲۷ مقایسه انرژی قاب ۹ طبقه با مهاربند هم‌محور و برون‌محور زانویی برای سناریوهای مختلف بدون و با حذف المان (۳) حالت برای بادبند هم‌محور و (۳) حالت برای بادبند برون‌محور

براساس مطالعات مشخص شد که در قاب ۹ طبقه با بادبند زانویی هم‌محور، حذف ستون میانی در طبقه اول قاب منجر به افزایش ۱/۴۹ برابری انرژی قاب ۹ طبقه با بادبند زانویی هم‌محور و حذف ستون میانی در طبقات اول و دوم باعث افزایش ۴/۶ برابری انرژی نسبت به حالتی که هیچ المانی حذف نمی‌گردد، شده است که نتیجه قابل توجه است (شکل ۲۴).

براساس تحلیل انجام شده بر روی قاب ۹ طبقه با بادبند زانویی برون‌محور مشخص گردید که نوع بادبند تأثیر بسیار قابل توجه را بر کاهش انرژی قاب در مقایسه با سیستم بادبندی هم‌محور داشته است. شکل (۲۵) براین اساس مقدار انرژی در حالت نام‌برده تا ۶۵ درصد کاهش یافته که بسیار مطلوب است. لازم به ذکر است که قاب ۹ طبقه خود شکل‌پذیری بالایی را داشته که در ترکیب با بادبند برون‌محور و دارای المان زانویی یک سیستم سازه‌ای با شکل‌پذیری و قابلیت جذب و استهلاک انرژی بسیار مناسب را در پی دارد.

نتایج به دست آمده نشان داد که در حالت استفاده از بادبند زانویی برون‌محور به ترتیب میزان انرژی برای (۱) بدون حذف المان، (۲) حذف ستون میانی در طبقه اول و (۳) حذف ستون میانی در طبقات اول و دوم در مقایسه با استفاده از بادبند زانویی هم‌محور ۷۷ و ۷۰ و ۷۹ درصد کاهش داشته که بسیار قابل توجه است. در حقیقت ترکیبی از شکل‌پذیری بالای بادبند برون‌محور و المان زانویی بادبند منجر به جذب و کاهش انرژی تا حد بسیار قابل توجهی گردیده است. قابلیت شکل‌پذیری و پذیرش تغییرشکل‌های زیاد و رفتار غیرخطی هر دو المان یعنی بادبند برون‌محور و المان زانویی متصل به آن باعث این نتیجه مطلوب گردیده است (شکل ۲۷ و ۲۸).



شکل ۲۴ مقایسه انرژی قاب ۹ طبقه با مهاربند هم‌محور زانویی به ترتیب برای حالات: (۱) بدون حذف المان، (۲) حذف ستون میانی در طبقه اول و (۳) حذف ستون میانی در طبقات اول و دوم

است و از این جهت بالطبع قاب با بادبند زانویی برون محور بسیار مطلوب است.

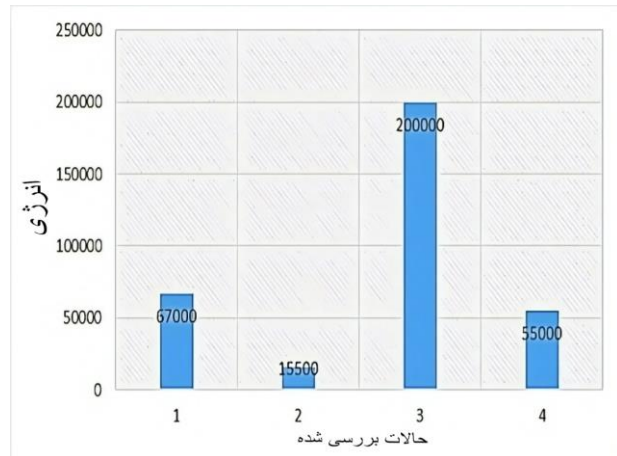
۳. با توجه به نتایج به دست آمده برای قاب ۳ طبقه با سیستم بادبند هم محور زانویی بحرانیترین حالت را می توان حذف ستون میانی سازه تحت اثر حریق دانست.

۴. برای قاب با بادبند برون محور تنها یک ستون شرایط بحرانی را داشته و این در حالی است که برای قاب با بادبند هم محور زانویی تعداد ۳ ستون وضعیت بحرانی را داشته است. در مجموع این مسئله مطلوب بودن رفتار بادبند برون محور زانویی را در برابر خرابی پیش رونده ناشی از حریق نشان می دهد.

۵. بر اساس نتایج به دست آمده از مقایسه بادبندهای هم محور و برون محور زانویی و معمولی مشخص گردید که استفاده از بادبند هم محور معمولی مقدار انرژی در حدود ۸۸ درصد بیش از بادبند هم محور زانویی را در بر داشته و برای قاب با بادبند برون محور معمولی این مقدار در حدود ۳۶ درصد بیش از مقدار انرژی برای قاب با بادبند برون محور زانویی بوده است.

نتایج به دست آمده برای قاب ۶ طبقه به قرار موارد زیر است:

۱. برای قاب ۶ طبقه با بادبند هم محور زانویی براساس تحلیل حرارتی انجام شده به وضوح مشخص گردید که ستون میانی و ستون های دو طرف آن در طبقه اول و ستون میانی در طبقه دوم شرایط بحرانی را دارند.
۲. بر اساس نتایج به دست آمده به ترتیب میزان انرژی برای حالات حذف ستون میانی در طبقه اول، حذف ستون میانی و ستون سمت راست طبقه اول، حذف ستون های نام برده در طبقه اول و ستون میانی در طبقه دوم به میزان $1/65$ و $1/8$ برابر افزایش یافته است. همچنین براساس مقایسه نتایج انرژی مجددا مشخص شد که استفاده از بادبند برون محور زانویی برای قاب ۶ طبقه نیز کارایی و شرایط بسیار مطلوبتری را در مقایسه با بادبند هم محور زانویی دارد. در این حالت علاوه بر شکل پذیری بادبند برون محور و المان زانویی، شکل پذیری بالای قاب نیز در مشارکت با شکل پذیری بادبند و المان زانویی در مجموع شکل پذیری سازه را به میزان قابل توجهی افزایش می دهد که این



شکل ۲۸ مقایسه انرژی قاب ۹ طبقه با مهاربندهای مختلف در برابر خرابی پیش رونده به ترتیب برای حالات: (۱) قاب با بادبند هم محور زانویی، (۲) قاب با بادبند برون محور زانویی، (۳) قاب با بادبند هم محور معمولی و (۴) قاب با بادبند برون محور معمولی

نتایج

نتایج به دست آمده برای قاب ۳ طبقه به قرار موارد زیر است:

۱. برای قاب ۳ طبقه با بادبند زانویی هم محور مشخص گردید که ستون میانی و دو ستون اطراف آن در طبقه اول و همچنین تیرهای طبقات اول و دوم در کناره های قاب دارای تنش های حرارتی بیشتری بوده اند. با توجه به اینکه عناصر لرزه بر اصلی قاب، شامل ستون ها و بادبندها می باشند؛ لذا خرابی پیش رونده برای ستون ها در موقعیت های نام برده دارای اهمیت بوده و خرابی پیش رونده با حذف این المان ها تحت بار حریق بایستی بررسی شود. همچنین مقاومت سازی این ستون ها به منظور کنترل و جلوگیری از پیشروی آسیب دیدگی در سایر اعضا مهم بوده و توصیه می گردد.

۲. براساس نتایج به دست آمده برای قاب با بادبند زانویی برون محور مشخص گردید که مقدار انرژی برای حالتی که ستون میانی حذف گردیده در حدود ۱۰ درصد افزایش یافته است. هر چند انرژی قاب با بادبند برون محور زانویی بیش از انرژی برای قاب با بادبند هم محور زانویی بوده است اما حذف ستون در قاب با بادبند برون محور زانویی تنها باعث افزایش انرژی به میزان ۱۰ درصد شده است و این در حالی است که حذف ستون در قاب با بادبند هم محور زانویی باعث افزایش $3/2$ برابری انرژی شده

۹ طبقه با بادبند زانویی برون‌محور شده است. همچنین حذف ستون میانی در طبقات اول و دوم منجر به افزایش $4/2$ برابری انرژی نسبت به حالتی که هیچ المانی حذف نمی‌گردد، شده است که نتیجه اخیر قابل توجه است.

۴. براساس مطالعه انجام شده بر روی قاب ۹ طبقه با بادبند زانویی برون‌محور مشخص گردید که نوع بادبند تأثیر بسیار قابل توجه را بر کاهش انرژی قاب در مقایسه با سیستم بادبند هم‌محور داشته است. بر این اساس مقدار انرژی در حالت نام‌برده تا ۶۵ درصد کاهش یافته که بسیار مطلوب است. لازم به ذکر است که قاب ۹ طبقه خود شکل‌پذیری بالایی را داشته که در ترکیب با بادبند برون‌محور و دارای المان زانویی، یک سیستم سازه‌ای با شکل‌پذیری و قابلیت جذب و استهلاک انرژی بسیار مناسب را در پی دارد. بر اساس نتایج به دست آمده مشخص گردید که حذف ستون میانی در طبقات اول و دوم بحرانیترین شرایط را در پی دارد.

۵. در مجموع در حالت استفاده از بادبند زانویی برون‌محور به ترتیب انرژی برای (۱) بدون حذف المان، (۲) حذف ستون میانی در طبقه اول و (۳) حذف ستون میانی در طبقات اول و دوم در مقایسه با استفاده از بادبند زانویی هم‌محور ۷۷ و ۷۰ و ۷۹ درصد کاهش داشته که بسیار قابل توجه است. در حقیقت ترکیبی از شکل‌پذیری بالای بادبند برون‌محور و المان زانویی بادبند منجر به جذب و کاهش انرژی تا حد بسیار قابل توجهی گردیده است. در حقیقت قابلیت شکل‌پذیری و پذیرش تغییرشکل‌های زیاد و رفتار غیرخطی هر دو المان یعنی بادبند برون‌محور و المان زانویی متصل به آن سبب این نتیجه مطلوب شده است. استفاده از بادبند هم‌محور معمولی مقدار انرژی در حدود ۷۰ درصد بیش از بادبند هم‌محور زانویی را داشته و برای قاب با بادبند برون‌محور معمولی، این مقدار در حدود ۶۲ درصد بیش از مقدار انرژی برای قاب با بادبند برون‌محور زانویی بوده است.

سپاسگزاری

موضوع منجر به رفتار بسیار مطلوب قاب تحت اثر خرابی پیش‌رونده ناشی از بار آتش‌سوزی خواهد شد.

۳. براساس نتایج به دست آمده از شکل (۲۳) مقایسه بادبندهای هم‌محور و برون‌محور زانویی و معمولی در ساختمان ۶ طبقه مشخص شد که استفاده از بادبند هم‌محور معمولی مقدار انرژی در حدود ۷۰ درصد بیش از بادبند هم‌محور زانویی را داشته و برای قاب با بادبند برون‌محور معمولی، این مقدار در حدود ۶۲ درصد بیش از مقدار انرژی برای قاب با بادبند برون‌محور زانویی بوده است.

نتایج به دست آمده برای قاب ۹ طبقه به قرار موارد زیر است:

۱. منحنی انرژی برای قاب ۹ طبقه با بادبند زانویی هم‌محور روند یکنواختی را برای بازه زمانی از شروع حریق تا حدود ۳۰ دقیقه اول نشان می‌دهد. این به معنای آن نیست که سازه در این بازه زمانی شرایط مطلوبی را داشته و اعضا و المان‌های سازه در معرض تسلیم و انهدام نیستند؛ بلکه سازه به سبب شکل‌پذیری بالا، سعی بر حفظ شرایط اولیه و تعادل و بازتوزیع نیروها دارد. اما از دقیقه ۳۰ به بعد با یک خیز نسبتاً ملایم و در ادامه مجدداً شرایط بازتوزیع و حفظ تعادل در نهایت تا دقیقه ۴۵ سازه با شکل‌پذیری بالایی که دارد شرایط را حفظ می‌کند. اما از دقیقه ۴۵ به بعد تسلیم اعضا و المان‌ها و به صورت پی‌درپی منجر به افزایش انرژی می‌گردد و در بازه زمانی اخیر افزایش انرژی با نرخ صعودی بسیار بالایی می‌باشد.

۲. بر اساس مطالعه انجام شده بر روی قاب ۹ طبقه با بادبند زانویی هم‌محور مشخص شد که حذف ستون میانی در طبقه اول قاب منجر به افزایش $1/94$ برابری انرژی قاب ۹ طبقه با بادبند زانویی هم‌محور و حذف ستون میانی در طبقات اول و دوم منجر به افزایش $4/6$ برابری انرژی نسبت به حالتی که هیچ المانی حذف نمی‌گردد، شده است که نتیجه اخیر بسیار قابل توجه است.

۳. براساس مطالعه انجام شده بر روی قاب ۹ طبقه با بادبند زانویی برون‌محور مشخص گردید که حذف ستون میانی در طبقه اول قاب منجر به افزایش $2/6$ برابری انرژی قاب

مراجع

1. ASCE/SEI 7-10, "Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures", American Society of Civil Engineers, ASCE, Structural Engineering Institute, SEI, October, 2013.
2. J. Jiang, G.Q. Li, A. Usmani, "Progressive Collapse Mechanisms of Steel Frames Exposed to Fire," *Advances in Structural Engineering*, vol. 17, issue. 3, pp. 381-398, 2014.
3. British Standard Institute, "Loading for building, Part 6: Code of practice for dead and imposed loads", London, United Kingdom, 6991, 2011.
4. J.P.C. Rodrigues, I.C. Neves, J.C. Valente, "Experimental Research on the Critical Temperature of Compressed Steel Elements with Restrained Thermal Elongation," *Fire Safety Journal*, vol. 35, Issue. 2, pp. 77-98, 2000.
5. H.M. Ali, P.E. Senseny, R.L. Alpert, "Lateral Displacement and Collapse of Single-Story Steel Frames in Uncontrolled Fire," *Engineering Structures*, vol. 26, Issue. 5, pp. 593-607, 2004.
6. S. Orton, J.O. Jirsa, O. Bayrak, "Carbon Fiber Reinforced Polymer for Continuity in Existing Reinforced Concrete Buildings Vulnerable to Collapse," *ACI Structural Journal*, vol. 107, issue. 4, 2009.
7. C. Crosti, "Structural Analysis of Steel Structures under Fire Loading," *Acta Polytechnica*, vol. 49, no. 1, 2009.
8. A.M. Correia, T.A.C. Pires, J.P.C. Rodrigues, "Behaviour of Steel Columns Subjected to Fire," *Proc. of the Sixth International Seminar on Fire & Explosion Hazards (FEH6)*, (ISBN-13:978-981-08-7724-8 e), 2010.
9. K. Galal, T. El-Sawy, "Effect of Retrofit Strategies on Mitigating Progressive Collapse of Steel Frame Structures," *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 66, Issue. 4, pp. 520-531, 2011.
10. M. Haghaeigh, J. Asghari Marenani, M. Rohani Manesh, "Assessment of Sismic Behavior Knee Brace Compared with X and Chevron Bracing in Steel Frame," *journal of structural engineering*, vol.12, issue.3, pp. 59-67, 2015. (In Persian)
11. H.D. Mahale, "Behaviour of Steel Structure under the Effect of Fire Loading," *International Journal of Engineering Research and Applications*, ISSN: 2248-9622, vol. 6, no. 5, pp. 42-46, 2016.
12. A. Parvini, A.H. Saadatmand Bahri, "Evaluation of Progressive Collapse Scenario in Steel Framed Structures with Knee Brace under Gravity and Seismic Load," *The Turkish Online Journal of Design, Art and Communication, TOJDAC*. Special Edition, DOI NO: 10.7456/1060AGSE/078, 2016.
13. J. Kim, A. Dawoon, "Evaluation of Progressive Collapse Potential of Steel Moment Frames Considering Catenary Action," *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, vol.18, issue.4, pp.455-465, 2016.
14. X. Lu, Y. L. Hung Guan, M. Ying, "Progressive Collapse Analysis of a Typical Super-Tall Reinforced Concrete Frame-Core Tube Building Exposed to Extreme Fires," *FireTechnology*, vol. 53, no. 1, pp. 107-133, 2017.
15. G. Abdollahzadeh, R. Shalakar, "Retrofitting of Steel Moment-Resisting Frames under Fire Loading against Progressive Collapse," *International Journal of Steel Structures*, vol. 17, no. 4, pp.1597-1611, 2017.
16. R. Rahnavard, N. Siahpolo, "Function Comparison between Moment Frame and Moment Frame with Centrally Braces in High-Rise Structures under effect of Progressive Collapse," *Iranian Structural Engineering Assosiation*

- ,*Scientific Research Journal (Structural and Construction Engineering)*, vol.4, Issue.4, no.14, PP.42-57, 2017.(In Persian)
17. B. Kordbagh, M. Mohammadi, "Influence of Panel Zone on Progressive Collapse Resistance of Steel Structures," *American Society of Civil Engineers*, vol. 32, issue. 3, 2018.
 18. M.R., Ameri, A. Massumi, H. Masoomi, "Effect of Structural Redundancy on Progressive Collapse Resistance Enhancement in RC Frame Structures," *Journal of Performance of Constructed Facilities*, vol. 33, no. 1, 2018.
 19. M.R. Kafash, A. Karamodin, M. Moghiman, "Investigatin of the Behavior of Special Steel Concentrically Braced Frames under Post Earthquake Fire Loading," *Ferdowsi Civil Engineering Journal*, vol. 33, no. 29, PP. 31-48, 2020. (In Persian)
 20. E. Mohammadi Dehcheshmeh, M. Kamalizad, V. Broujerdian, G. Ghodrati Amiri, "Progressive Collapse in Steel Moment Frame Structures: Multi Parameter Study," *journal of structural and construction engineering*, vol. 9, no. 58, pp. 20-38, 2022. (In Persian)
 21. Y. Cao, J. Jiang, Y. Lu, W. Chen, J. Ye, "Progressive Collapse of Steel Structures Exposed to Fire: A Critical Review," *journal of constructional steel research*, vol.207, 107985, 2023.
 22. ABAQUS 6.14 Documentation, Dassault Systèmes Simulia Corp, 2014.
 23. M. Yahyai, A. Rezaeian, M. Safaeian, "Response of Steel Box Culmn in Fire Conditions," *Journal of Structural and Constrtuction Engineering*, vol. 4, Issue. 1, no.10, pp. 101-112, 2017. (In Persian)
 24. R. Sun,, Z. Huang, L. Burgess, "Progressive Collapse Analysis of Steel Structures under Fire Conditions," *Engineering structures*, vol.34, pp. 400-413, 2012.