



Assessment of Fire resistance for industrial steel structures

Mohammad Rasoul Kaffash Bazari^{1*}, Saeed Behravesh², Seyed Mohammad Adham Hashemi³

¹ PhD in Structural Engineering, Rahab Engineering Institute, Road and Urban Development Holding

² Master of Science in Structural Engineering, Rahab Engineering Institute, Road and Urban Development Holding

³ Technical and Engineering Manager, Mashhad Urban Train Line 2 Project, Rahab Engineering Institute, Road and Urban Development Holding

ARTICLE INFO

Article history:

Article Type: Research paper

Received: 2020 December 9

Accepted: 2021 July 10

** Correspondence Email Address:*

rasul.kaffash@stu.um.ac.ir

Keywords:

Fire resistance, Case study,
fire resistance,
industrial steel structures,
global behavior

ABSTRACT

This paper presents an evaluation of the performance of industrial steel structures under fire load. This evaluation was performed on the structure of Mashhad metro line 2 stabling building which is one of the largest sheds in the depot site of line 2 of Mashhad metro. For this purpose, numerical analysis using finite element method has been used. The main components of fire resistance include columns and rafters so elements with low fire resistance, such as purlin, have been removed to investigate the structural fire resistance. The results of the analysis showed that the structure of the stabling building, under the most critical fire scenario, has a minimum fire resistance of 110 minutes against the collapse caused by fire. Also, by examining two different fire scenarios, it was identified that uniform fire scenario creates a more critical situation than the non-uniform fire scenario. It is suggested that for the design of other similar structures, effective fire protection be provided for the rafters and panel zones to guarantee the stability of the structure.



ارزیابی مقاومت ساختمان‌های صنعتی فولادی در معرض آتش سوزی

محمد رسول کفاش^{۱*}، سعید بهروش^۲، سید محمد ادهم هاشمی^۳

۱- دکتری سازه، موسسه مهندسی رهاب، هلدینگ راه و شهرسازی، پروژه خط ۲ قطار شهری مشهد، موسسه مهندسی رهاب، هلدینگ راه و شهرسازی (دریافت: ۱۴۰۲/۱۱/۱۹، پذیرش: ۱۴۰۳/۰۳/۲۹)

چکیده

این مقاله یک ارزیابی از عملکرد ساختمان‌های صنعتی فولادی تحت بار آتش سوزی ارائه می‌دهد. این ارزیابی بر روی سازه ساختمان توقفگاه خط ۲ قطار شهری که یکی از بزرگ‌ترین سوله‌های موجود در مجموعه سوله‌های سایت دیو خط ۲ قطار شهری مشهد می‌باشد، انجام شده است. بدین منظور از تحلیل عددی به روش اجزای محدود استفاده شده است. اجزای اصلی مقاومت آتش شامل ستون‌ها و رفته‌ها می‌باشد و المان‌ها با مقاومت آتش ضعیف همچون لایه‌ها برای بررسی مقاومت آتش سازه حذف شده‌اند. نتایج تحلیل نشان داد که سازه سوله توقفگاه تحت بحرانی‌ترین سناریو آتش، حداقل زمان ۱۱۰ دقیقه در برابر فروپاشی ناشی از آتش مقاومت دارد. همچنین با بررسی دو سناریو آتش متفاوت مشخص شد، سناریو آتش سوزی متقارن در سرتاسر دهانه از سناریو آتش سوزی نامتقارن در بخشی از دهانه، وضعیت بحرانی‌تری ایجاد می‌کند. پیشنهاد شده است که برای طرح سازه‌های مشابه، حفاظت آتش مؤثر برای رفته‌ها و چشمه اتصال برای ضمانت پایداری سازه فراهم شود.

کلید واژه‌ها: مقاومت آتش، مطالعه موردی، مقاومت در برابر آتش، ساختمان‌های صنعتی فولادی، رفتار کلی

۱- مقدمه

نتایج این پژوهش نشان داد که خرابی ستون‌ها نقش کلیدی در خرابی سازه ایفا می‌کند. علی و همکاران [۴] مد خرابی و جابجایی جانبی ساختمان‌های قاب فولادی یک طبقه در معرض آتش را مطالعه کردند. نتایج نشان داد که جابجایی جانبی قاب‌ها با توسعه آتش و افزایش وزن سقف که متأثر از حداقل فاصله بین دیوارهای آتش و قاب‌ها است، افزایش می‌یابد. فیم و همکاران [۵] یک مدل واقع‌گرایانه از یک پارکینگ خودرو طبقاتی متشکل از قاب فولادی تحت سناریو آتش سوزی یک وسیله نقلیه انجام دادند. سه مد خرابی فروریزش تک دهانه، چنددهانه و شکست برشی پیشنهاد شده است [۷و۶]. لانگ و همکاران [۸] دو مکانیزم خرابی ساختمان بلندمرتبه فولادی در معرض آتش سوزی چندین طبقه، یعنی مکانیزم خرابی طبقه ضعیف و مکانیزم خرابی طبقه قوی را پیشنهاد دادند. در این پژوهش یک متدولوژی ارزیابی طراحی سازه پیشنهاد شده است. سان و همکاران [۹] آنالیز استاتیکی و دینامیکی خرابی پیش‌رونده سازه‌های فولادی تحت شرایط آتش با استفاده از نرم‌افزار VULVAN را انجام داده‌اند. اثر نسبت بار، سازه‌های المان‌ها و شرایط مرزی روی مکانیزم خرابی بحث شده است. پروسه مشابه سپس برای مطالعه مکانیزم خرابی قاب‌های فولادی مهاربند تحت شرایط آتش استفاده شده بود [۱۰]. بهنام [۱۱] یک سری تحلیل‌های حساسیت روی حریق سازه‌های فولادی انجام داد. در تحقیق

سازه‌های فولادی مقاومت ذاتی قابل توجهی در برابر آتش ندارند زیرا مقدار قابل توجهی از مقاومت فولاد با رسیدن به دمایی در حدود ۶۰۰ درجه و تداوم حریق از دست می‌رود. از زمان آتش سوزی پروژه برودگیت فاز ۸ لندن و آزمایش‌های آتش کاردینگتون، محققان شروع به بررسی و فهم رفتار انواع سازه‌های قابی فولادی در آتش نمودند. به ویژه پس از خرابی برج تجارت جهانی^۱ در حادثه ۱۱ سپتامبر، توجه ویژه‌ای به فهم رفتار انواع سازه‌های فولادی در آتش ایجاد شد. از سوی دیگر دستورالعمل‌های فعلی طراحی سازه‌های فولادی، اطلاعات کافی برای ارزیابی واقع بینانه واکنش سازه‌های فولادی در حوادث آتش سوزی را در اختیار قرار نمی‌دهند. بنابراین نیاز به درک رفتار ساختمان‌های با سازه فولادی، تحت شرایط واقعی آتش سوزی در سطوح موضعی و کلی، به وضوح دیده می‌شود. عثمانی و همکاران [۲-۱] اقدام به مدل‌سازی عددی از برج WTC در معرض بار آتش کردند و یک مکانیزم فروپاشی محتمل برای قاب‌های فولادی بلندمرتبه پیشنهاد دادند.

*رایانامه نویسنده مسئول: rasul.kaffash@stu.um.ac.ir

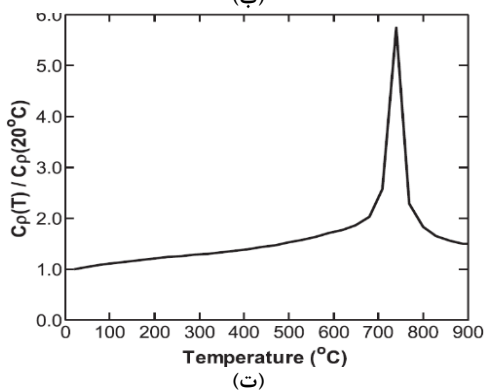
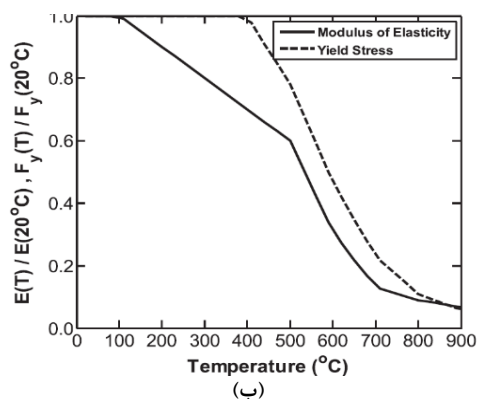
^۱ WTC

۲- شبیه‌سازی عددی

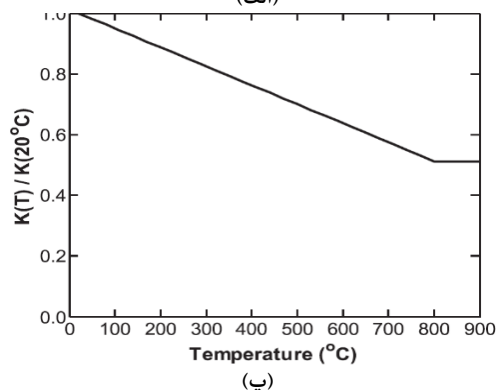
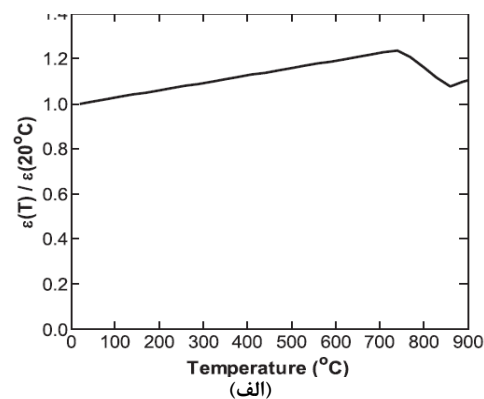
برای شبیه‌سازی سناریوهای آتش‌سوزی در سازه نیاز به استفاده از تحلیل‌های چندمرحله‌ای و متوالی است. در این تحقیق این مراحل تحلیل به روش اجزای محدود در نرم‌افزار آباکوس [۱۹] با مراحل تحلیل جداگانه زیر انجام شده است. اولین مرحله تجزیه و تحلیل، یک تحلیل غیرخطی استاتیکی است که سازه تحت بار ثقلی قرار می‌گیرد. مرحله دوم نیز یک تحلیل استاتیکی غیرخطی کوپله دما-جابجایی است که در آن سازه طبق سناریوهای تعریف شده و مطابق با نمودار ایزو ۸۳۴ [۲۰] تحت افزایش دما قرار می‌گیرد. بار ثقلی با استفاده از ترکیب بارگذاری برای حالت رخ داد آتش محاسبه می‌شود. آیین‌نامه ASCE7-10 ترکیب بار ثقلی هم‌زمان با آتش‌سوزی را ارائه نموده است [۲۱] در این آیین‌نامه پیشنهاد می‌گردد که ترکیب بار ثقلی به‌صورت رابطه (۱) برای شرایط آتش‌سوزی در نظر گرفته شود.

$$w = 1.2DL + 0.5LL \quad (1)$$

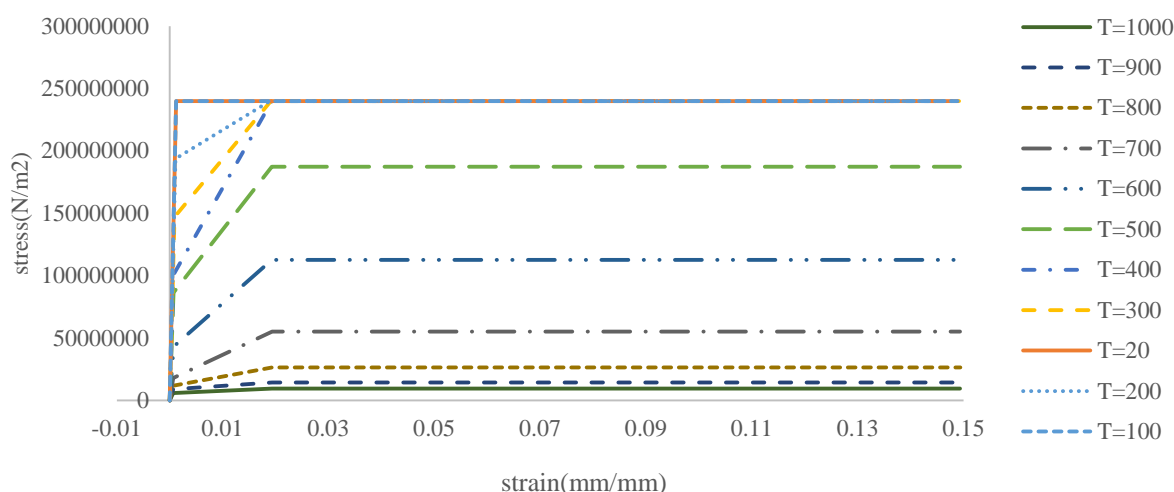
به‌منظور مدل‌سازی رفتار مواد از مدل الاستوپلاستیک کامل برای فولاد در دمای استاندارد استفاده شده است. همچنین تنزل سختی و مقاومت و تغییرات سایر خواص فولاد در اثر افزایش دما بر اساس استاندارد اروپا [۲۲] مطابق شکل (۱) در نظر گرفته می‌شود. منحنی‌های تنش کرنش فولاد در دماهای مختلف در شکل (۲) نشان داده شده است.



دیگر بهنام [۱۲] پاسخ سازه ساختمان ۱۶ طبقه پلاسکو در شهر تهران را تحت حریق بررسی کرده و چگونگی ناپایداری شدن سازه را بدست آورد. معماری و همکاران [۱۳] قاب‌های فولادی با اتصالات مقطع کاهش یافته را با مدل‌سازی چند دقتی مورد ارزیابی قرار دادند. لو و همکاران [۱۴] یک بررسی آزمایشگاهی روی رفتار فروریزش قاب پرتال فولادی در معرض آتش طبیعی انجام دادند. جینگ و همکاران اثر نسبت بار، سناریوهای آتش، شکل‌بندی مهاربندها و نسبت سختی تیر به ستون را روی مقاومت آتش سازه‌ها بررسی کرده‌اند. توزیع افقی چند محفظه آتش، خطرناک‌ترین سناریو آتش‌سوزی تشخیص داده شده است [۱۵]. همچنین جینگ و همکاران به کمک شبیه‌سازی‌های عددی، خرابی پیش‌رونده و پایداری کلی سازه‌های قاب فولادی در معرض بارگذاری حریق را مورد بررسی قرار دادند [۱۶-۱۸]. به‌طور خلاصه، تحلیل‌های گسترده عددی برای شبیه‌سازی و بررسی رفتار اعضا سازه‌های فولادی و رفتار کلی سازه‌های فولادی در شرایط آتش‌سوزی انجام شده که اکثریت قریب به اتفاق آن‌ها مربوط به قاب‌های خمشی فولادی بوده است. در این مقاله، مجموعه‌ای از مدل‌های عددی برای ارزیابی عملکرد یک نمونه ساختمان صنعتی فولادی در معرض آتش‌سوزی متقارن و نامتقارن مورد بررسی قرار می‌گیرد. نتایج این مطالعه بینش ارزشمندی را در مورد رفتار سوله‌ها در معرض آتش ارائه می‌دهد که می‌تواند به طراحی مبتنی بر عملکرد ساختمان‌های صنعتی فولادی در برابر آتش کمک کند.



شکل (۱). مشخصات مکانیکی، حرارتی و تغییر شکل‌پذیری فولاد سازه‌ای: (الف) تغییرات ضریب انبساط حرارتی با دما؛ (ب) تغییرات مدول الاستیسیته و تنش جاری‌شدگی با دما؛ (پ) تغییرات رسانش حرارتی با دما؛ (ت) تغییرات گرمای ویژه با دما [۲۲].

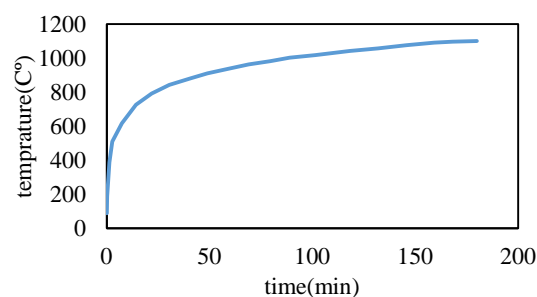


شکل (۲). منحنی تنش کرنش فولاد سازه‌ای در دماهای مختلف

آتش با توجه به آنچه در استاندارد اروپا^۱ [۲۲] شرح داده شده، بر اساس فرض توزیع یکنواخت دما در مقطع در نظر گرفته شده است.

۳- بار آتش

برای شبیه‌سازی رویداد آتش سوزی واقعی در تجزیه و تحلیل عددی از منحنی‌های دما-زمان استفاده می‌شود. ادبیات فنی شامل طیف گسترده‌ای از منحنی‌های دما-زمان، مانند ASTM-ISO 834-1، E119 و منحنی آتش پارامتریک استاندارد اروپا EC3 است. در این مطالعه منحنی آتش ISO 834-1 چنانکه در شکل ۳ نشان داده شده است، مورد استفاده قرار گرفته است. منحنی‌های استاندارد ISO 834-1 و ASTM-E119 تنها فاز گرم شونده را نشان می‌دهند که در آن فرض شده منبع سوخت پایان‌ناپذیر است.



شکل (۳). منحنی آتش ISO 834-1 [۲۰].

پس از تصمیم‌گیری در مورد روش محاسبه درجه حرارت تولیدشده توسط منبع آتش (T_{gas})، مسئله انتقال حرارت به معادلات دیفرانسیل با شرایط مرزی خاصی که اجازه محاسبه دما در سطح عناصر سازه‌ای (T_s) را می‌دهد و سپس انتقال گرما از طریق المان، تقلیل می‌یابد. در حالیکه فرضیه $T_{gas} = T_s$ ممکن است منجر به نتایج نادرست در سازه‌های بتنی شود، اما برای سازه‌های فولادی پذیرفته شده است. این بیشتر مربوط به هدایت حرارتی بالای فولاد است که اجازه انتقال سریع گرما از یک نقطه به نقطه دیگر را می‌دهد. درجه حرارت عناصر فولادی در معرض

۴- صحت سنجی مدل‌های عددی

برای اعتبار سنجی تحلیل حرارتی- مکانیکی، از یک نمونه قاب فولادی یک طبقه و یک دهانه که توسط یحیایی و رضائیان [۲۳] تحت بار حرارتی آزمایش شده، استفاده شده است. در پژوهش مذکور، ۶ نمونه مورد بررسی قرار گرفته که در این مطالعه، نمونه S-3 به منظور اعتبارسنجی انتخاب گردیده است. در این آزمایش صرفاً تیر با استفاده از منحنی استاندارد ISO 834-1 تحت حرارت قرار گرفته است. در مدل اعتبار سنجی خواص وابسته به دما برای فولاد بر اساس استاندارد اروپا EC3 [۲۲] به کار گرفته شده است. نتایج جابجایی‌های وسط دهانه در مقابل دما در یک گره قاب با نتایج تجربی قبلی مقایسه شده است. چنانچه در شکل ۴ نشان داده شده میزان جابجایی گره میانی قاب در ابتدای اعمال بار حرارتی در حدود ۱ سانتی‌متر و در انتهای اعمال بار حرارتی و در دمای ۷۸۵ درجه سانتی‌گراد در حدود ۲۱ سانتی‌متر بوده است. همچنین تصویری از نمای تغییر شکل یافته مدل شبیه‌سازی عددی و نمونه آزمایشگاهی پس از قرار گرفتن در معرض حریق در شکل ۵ ارائه شده است.

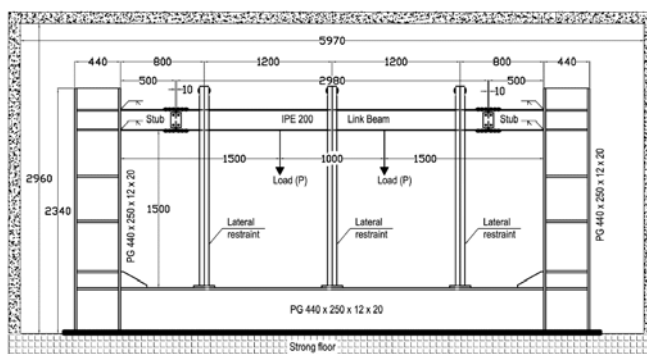
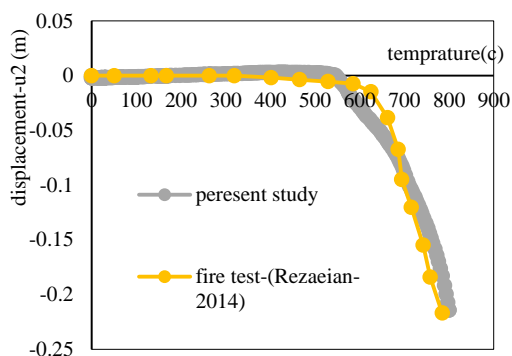
همچنین شبیه‌سازی منحنی در بازه‌های مختلف تغییرات دما در هر دو منحنی مربوط به آزمایش و تحلیل عددی منطبق است و تطابق خوبی بین نتایج آزمایشگاهی و مدل‌سازی عددی حاصل شده که روش مطالعه برای شبیه‌سازی رفتار حرارتی- مکانیکی قاب‌های فولادی مورد استفاده قرار گرفته را تأیید نموده است.

¹ EURO Code (EC)

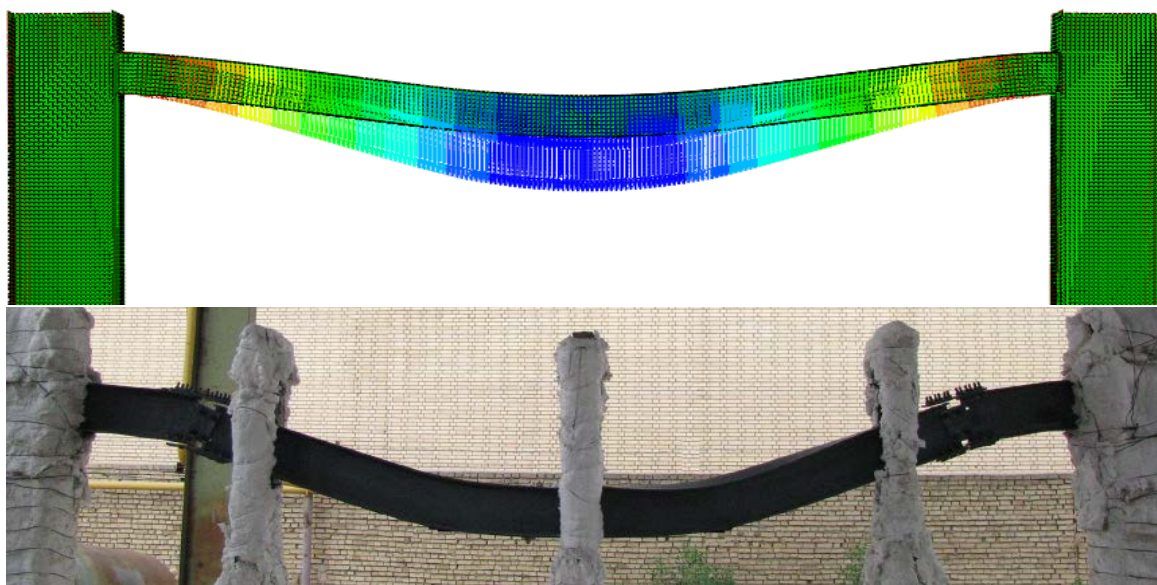
۵- معرفی سازه مورد مطالعه

در مقاطع قاب فولادی از ورق‌هایی با ضخامت ۸، ۱۵ و ۳۰ میلی‌متر برای جان، بال و قطعات اتصال استفاده شده است. استانداردهای مورداستفاده در طراحی اعضا و اتصالات سازه از مراجع [۲۴-۲۵] انتخاب شده است. بارهای طراحی نیز بر اساس ASCE 7-10 [۲۱] تعیین شده است. بار مرده شامل وزن سقف برابر ۲۰۰۰ نیوتن بر مترمربع است در حالی که بار زنده طراحی ۱۵۰۰ نیوتن بر مترمربع در نظر گرفته شده است. سیستم سازه‌ای ساختمان متشکل از مجموعه‌ای از قاب‌های خمشی است که رفته‌رفته و ستون‌ها از طریق اتصالات صلب با استفاده از پیچ‌های مقاومت بالا به یکدیگر متصل شده است. رفته‌رفته و ستون‌ها از مقاطع فولادی با فولاد نوع ST37 انتخاب شده است.

در این پژوهش به منظور ارزیابی عملکرد ساختمان‌های صنعتی فولادی در معرض آتش‌سوزی، مطالعه موردی روی سازه ساختمان توقفگاه خط ۲ قطار شهری مشهد انجام شده است. سازه مذکور، یکی از بزرگ‌ترین سوله‌های موجود در مجموعه سوله‌های سایت دپو خط ۲ مترو مشهد می‌باشد که متشکل از ۶۰ قاب یک طبقه و یک دهانه با ارتفاع ۶ متر و طول دهانه ۲۱ متر می‌باشد. شکل (۶) پلان و مقطع و نمای جانبی سازه ساختمان توقفگاه را نمایش می‌دهد. مقطع عرضی از سازه ساختمان توقفگاه در شکل (۷) نشان داده شده است.



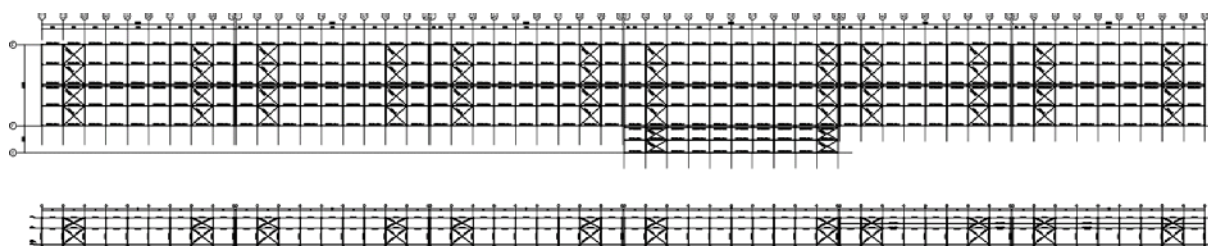
شکل (۴). قاب فولادی استفاده‌شده در صحت سنجی آنالیز مکانیکی - حرارتی [۲۳] و نتایج صحت سنجی.



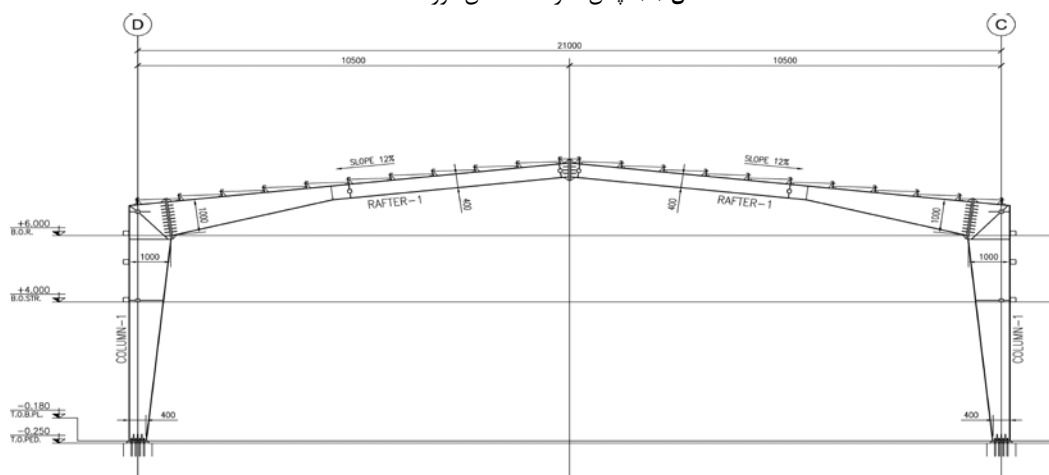
شکل (۵). نمای تغییر شکل یافته مدل صحت سنجی عددی و نمونه آزمایشگاهی [۲۳] پس از قرار گرفتن در معرض حریق

که به صورت نیروهای ثقلی روی المان‌های سازه قاب اعمال می‌شود. بخش دوم بارهای ثقلی مربوط به سقف در هر ناحیه وابسته است که به صورت بارهای خطی به رفتارها اعمال می‌شوند. با در نظر گرفتن مقادیر بار مرده و زنده مشخص شده در بالا و ترکیب مورد نظر برای بار آتش مقادیر بار ثقلی محاسبه و با فرض فاصله خارج از صفحه ۶ متر بین قاب‌ها، بار توزیع شده روی رفتارها اعمال شده است.

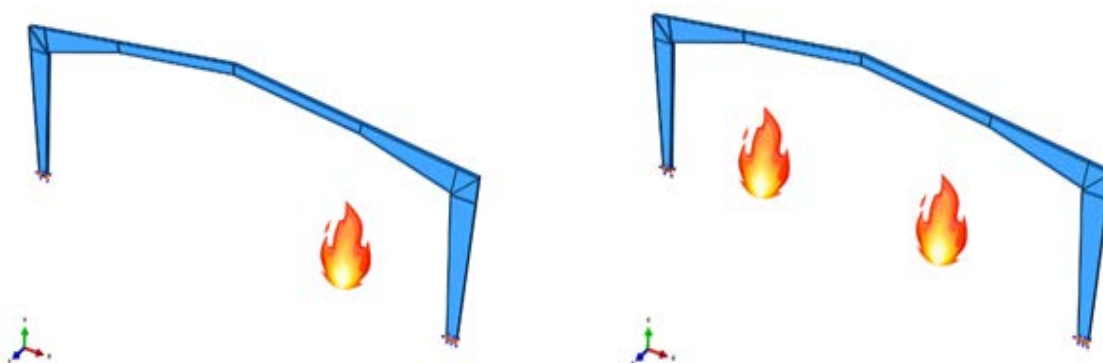
برای شبیه‌سازی تنها یکی از قاب‌های سازه مورد استفاده قرار گرفته است. جهت مدل‌سازی مقاطع تیرها و ستون‌ها، از المان‌های پوسته‌ای استفاده شده است. جهت ساده سازی مدل، فرض شده شکست در قطعات اتصال تیر به ستون صورت نمی‌گیرد. همچنین المان‌ها با مقاومت آتش ضعیف همچون لایه‌ها برای مطالعه مقاومت آتش سازه حذف شده‌اند. بارهای ثقلی به دو بخش تقسیم می‌شوند. بخش اول بارهای مرتبط با وزن قاب‌ها



شکل (۶). پلان سازه ساختمان مورد مطالعه.



شکل (۷). نمای قاب سازه ساختمان مورد مطالعه.

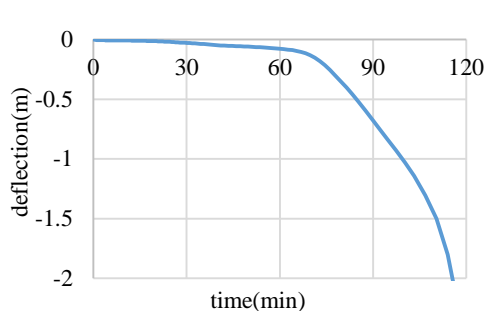


شکل (۸). سناریوهای آتش.

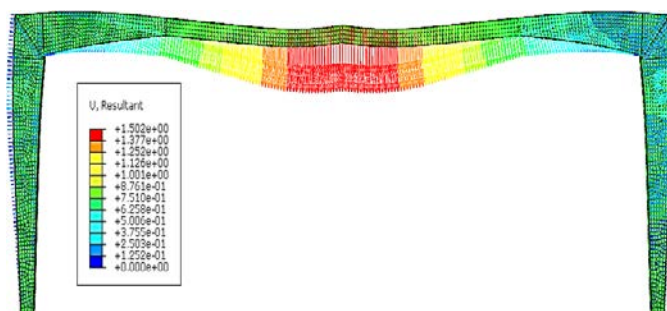
در هر مورد سناریو آتش‌سوزی، رفتارها و ستون‌ها تحت حریق در معرض بارگذاری آتش قرار می‌گیرند. علاوه بر این، در این مطالعه اعضای سازه‌ای محافظت نشده در نظر گرفته شده است، زیرا اعضای سازه‌ای فاقد پوشش حفاظت در برابر آتش است.

۶- سناریوهای آتش‌سوزی

از آنجاکه امکان پیش‌بینی آتش‌سوزی وجود ندارد، دو سناریو آتش‌سوزی فرضی با هدف بررسی اثر رخ داد سناریو حریق در موقعیت‌های مختلف بر مقاومت آتش سازه در نظر گرفته شده است: الف) آتش‌سوزی در سرتاسر دهانه، ب) آتش‌سوزی در نیمی از دهانه، همان‌طور که در شکل (۸) نشان داده شده است.

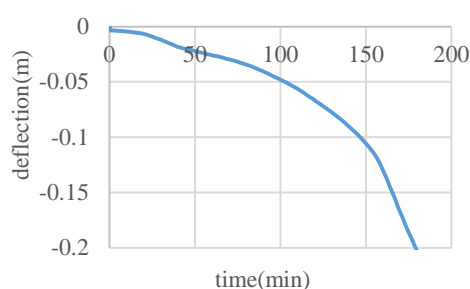


تغییر مکان وسط دهانه قاب

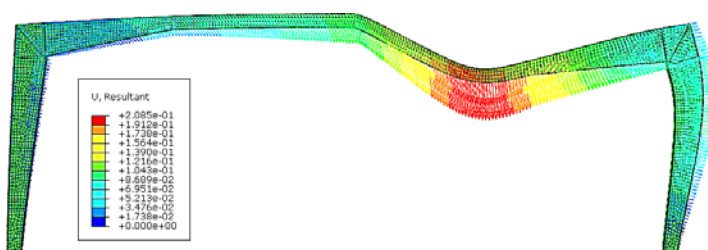


میزان تغییر مکان‌ها در زمان ۱۱۰ دقیقه

شکل (۹). مقاومت در برابر حریق سوله بر اساس سناریو ۱

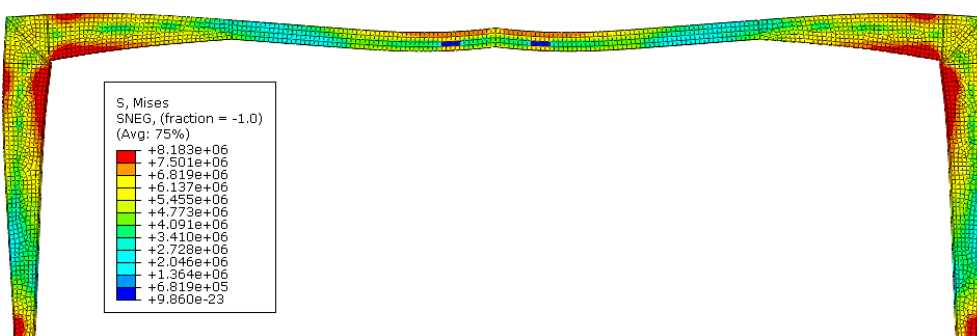
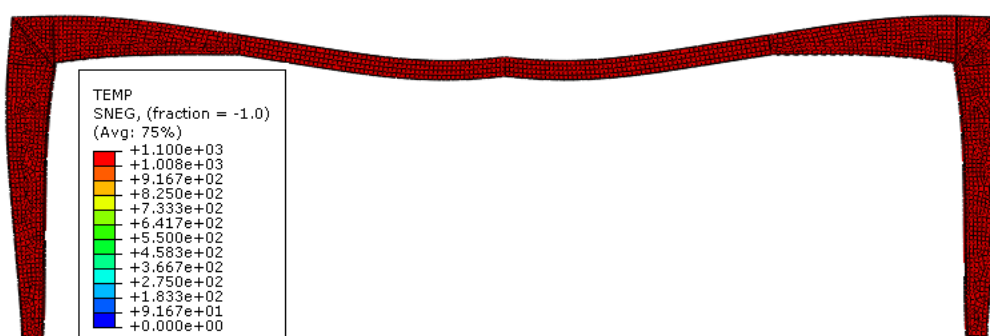


تغییر مکان چهارک سمت راست دهانه قاب



میزان تغییر مکان‌ها در زمان ۱۸۰ دقیقه

شکل (۱۰). مقاومت در برابر حریق سوله بر اساس سناریو ۲



شکل (۱۱). توزیع تنش فون میسز و توزیع دما در زمان از دست رفتن مقاومت سازه بر اساس سناریو ۱ بر حسب (t=110 min, T=1030 °C) N/m2

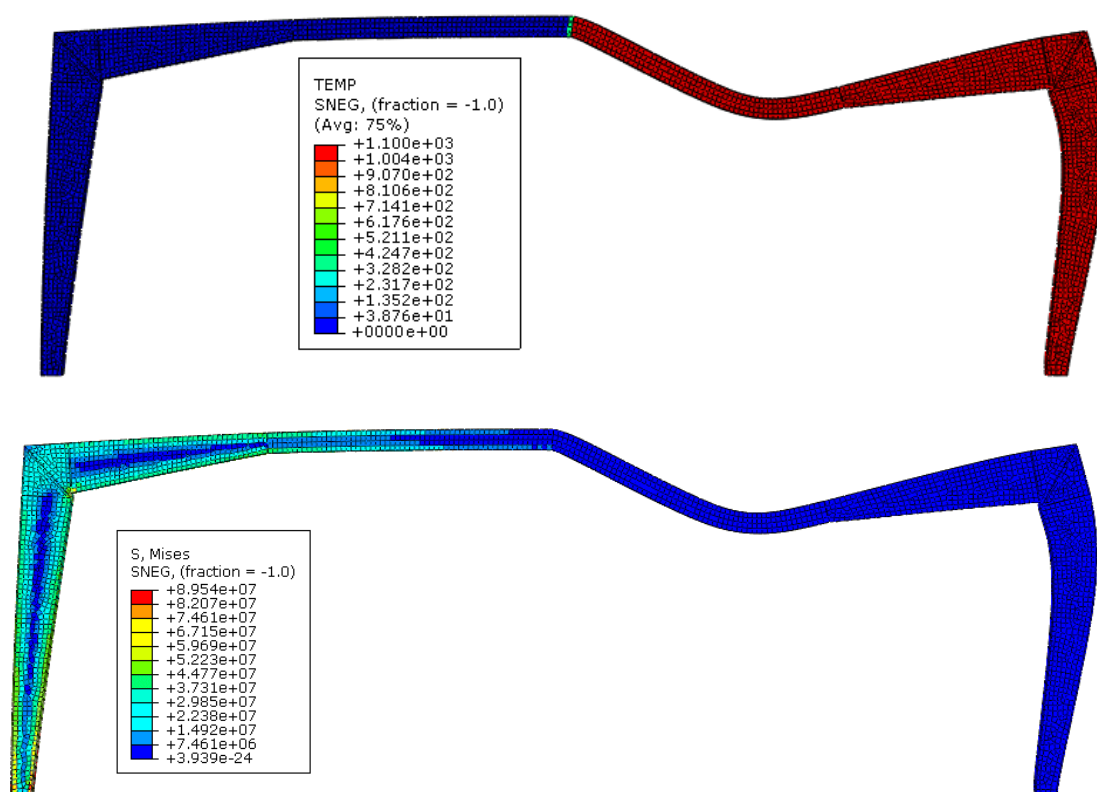
تحت حریق بر اساس سناریو ۱، در هنگام اعمال آتش به صورت یکنواخت نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که نرخ جابجایی در سطح کلی سازه (تغییر مکان وسط دهانه) در زمانی در حدود ۱۱۰ دقیقه، تسریع می‌یابد که به صورت ضمنی بیانگر زمانی است که سازه قادر نیست در برابر بارهای ثقیلی اولیه مقاومت کند

۷- نتایج تحلیل‌ها

از مهم‌ترین مشاهدات نتایج تحلیل صورت گرفته در این پژوهش، تخمین زمان از دست رفتن مقاومت و یکپارچگی سازه در برابر حریق است. شکل (۹) تاریخچه تغییر مکان وسط دهانه رفته‌ها

شکل (۱۱) نواحی تنش‌های فون میسز و توزیع دما در پایان زمان مقاومت آتش را برای سناریو ۱ آتش‌سوزی نشان می‌دهد. توزیع تنش‌ها تحت سناریو ۱ نشان می‌دهد که تنش در نواحی انتهایی رفتارها و در محل چشمه اتصال و پای ستون‌ها به تنش تسلیم تنزل یافته در دمای مربوطه، رسیده است. شکل (۱۲) توزیع تنش‌ها و توزیع دما تحت سناریو ۲ را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که حداکثر تنش‌ها در نواحی انتهایی رفتارها در محل اتصال به ستون و در محل چشمه اتصال در بخشی از سازه که تحت افزایش درجه حرارت نبوده، رخ داده است. ثبات مشخصات مکانیکی فولاد در نیمی از سازه که تحت افزایش درجه حرارت نبوده و بنابراین سختی و مقاومت بیشتری داشته باعث افزایش تنش‌ها شده است.

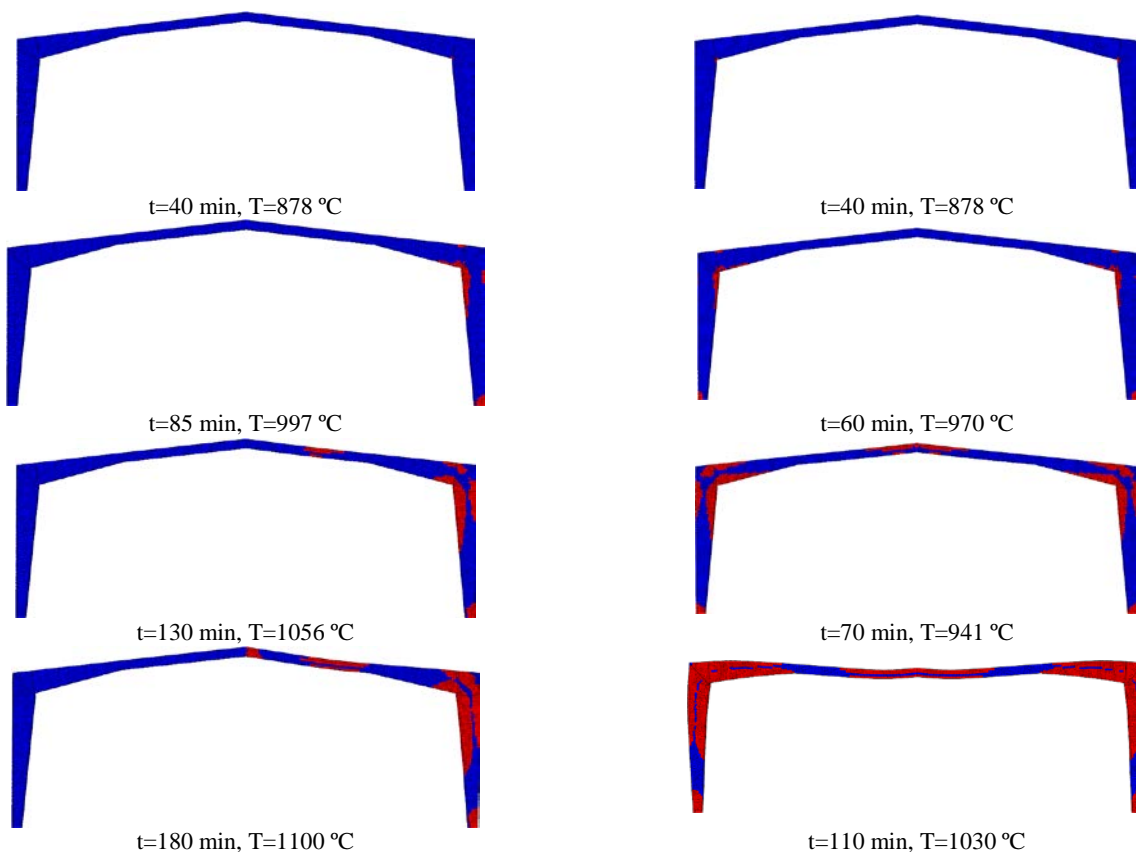
و در آستانه فروریزش قرار می‌گیرد. همچنین مشاهده می‌شود که ستون‌ها مقاومت خود را در برابر بار آتش تا آستانه فروریزش قاب حفظ نموده‌اند. تاریخچه جابجایی وسط دهانه قاب بر اساس سناریو ۲ در شکل (۱۰) نشان داده شده است. چنانکه مشاهده می‌شود، سازه مقاومت خود در برابر فروریزش را تا پایان مدت زمان اعمال آتش یعنی زمانی در حدود ۱۸۰ دقیقه، حفظ نموده است. در این سناریو نیز ستون‌ها تا هنگام آستانه فروریزش قاب، دچار کمانش نشده‌اند. همچنین در هر دو سناریو آتش، ضعف سازه در اثر از دست رفتن مقاومت رفتارها و چشمه اتصال صورت گرفته و پیشنهاد می‌شود برای رفتارها از پوشش‌های محافظت در برابر آتش استفاده شود تا زمان از دست رفتن مقاومت سازه در برابر آتش به تأخیر افتد.



شکل (۱۲). توزیع تنش فون میسز و توزیع دما در زمان از دست رفتن مقاومت سازه بر اساس سناریو ۲ بر حسب $(t=180 \text{ min}, T=1100 \text{ }^\circ\text{C}) \text{ N/m}^2$

می‌کنند و در نهایت با گسترش نواحی جاری شدگی در میانه دهانه رفتارها، سازه ناپایدار می‌شود. همچنین با بررسی روند گسترش نواحی جاری شدگی سازه تحت سناریو ۲ مشاهده می‌شود که با افزایش درجه حرارت سازه ابتدا در زمان 40 min در محل اتصال رفتارها به ستون‌ها و در سمتی از سازه که تحت حرارت است، سازه شروع به جاری شدن می‌کند. در ادامه با افزایش دما و تنزل مشخصات مقاومتی، جاری شدگی به ستون در ناحیه تحت حرارت گسترش می‌یابد.

شکل (۱۳ و ۱۴) نواحی جاری شدگی سازه در زمان‌های مختلف و روند تشکیل مفاصل پلاستیک با افزایش درجه حرارت را تحت دو سناریو آتش‌سوزی نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که سازه تحت سناریو ۱ در زمان $t=40 \text{ min}$ دقیقه در محل اتصال رفتارها به ستون‌ها، شروع به جاری شدن می‌کند و در ادامه با افزایش دما و تنزل مشخصات مقاومتی، نواحی جاری شدگی در محل اتصال رفتارها به ستون‌ها گسترش می‌یابد. در زمان حدود $t=60 \text{ min}$ پس از تشکیل مفاصل پلاستیک در محل اتصال رفتارها به ستون‌ها، ناحیه میانی رفتارها نیز شروع به جاری شدن



شکل (۱۴). روند تشکیل مفاصل سازه تحت سناریو ۲

شکل (۱۳). روند تشکیل مفاصل سازه تحت سناریو ۱

همان‌طور که مشاهده می‌شود در هر دو سناریو، سازه پس از گذشت زمانی در حدود ۳۰ دقیقه، در اثر جاری شدن در برخی نواحی شروع به استهلاک انرژی می‌کند. همچنین مشاهده می‌شود که انرژی پلاستیک سازه تحت سناریو ۱ با سرعت بیشتری نسبت به سناریو ۲ مستهلک می‌شود که بیانگر این است که سازه در زمان کوتاه تری مکانیزم می‌شود.

با تشکیل مفاصل پلاستیک در محل اتصال رفته‌ها به ستون‌ها، ناحیه میانی رفته‌ها در سمتی از سازه که تحت حرارت است شروع به جاری شدن می‌کند و در نهایت با گسترش نواحی جاری شدگی در میانه رفته‌ها، سازه ناپایدار می‌شود.

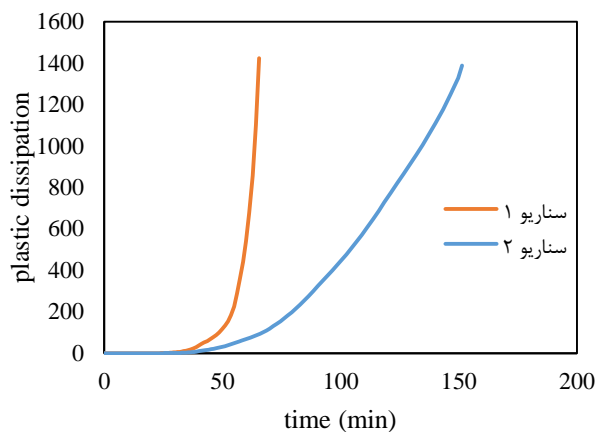
در شکل ۱۵ تاریخچه انرژی پلاستیک مستهلک شده در سازه در اثر رفتار غیرخطی سازه، به ازای سناریوهای مختلف آتش‌سوزی از زمان شروع آتش‌سوزی تا لحظه ناپایداری سازه، ارائه شده است.

۸- نتیجه‌گیری

در این مقاله سازه قاب سوله ساختمان توقفگاه خط ۲ قطار شهری مشهد در دو سناریو مختلف در معرض آتش‌سوزی یکنواخت و غیر یکنواخت قرار گرفت. با بررسی نتایج تحلیل‌ها، موارد زیر قابل اشاره است:

۱- با تغییر سناریو آتش از وضعیت آتش‌سوزی غیر یکنواخت به وضعیت آتش‌سوزی یکنواخت، زمان انهدام سازه تسریع می‌یابد چنانکه مقدار آن برای سناریو حریق یکنواخت در حدود ۱۱۰ دقیقه بوده است.

۲- با بررسی روند گسترش نواحی جاری شدگی سازه تحت سناریو ۱ مشاهده شد، با افزایش درجه حرارت سازه، ابتدا محل اتصال رفته‌ها به ستون‌ها شروع به جاری شدن می‌کند



شکل (۱۵). تاریخچه انرژی مستهلک شده سازه در اثر رفتار غیرخطی به ازای سناریو ۱ و سناریو ۲

[6] C. Fang, B.A. Izzuddin, A.Y. Elghazouli, D.A. Nethercot, "Robustness of multi-storey car parks under localised fire towards practical design recommendations", *J. Constr. Steel Res.*, 90 (2013) 193–208.

[7] C. Fang, B.A. Izzuddin, A.Y. Elghazouli, D.A. Nethercot, "Simplified energy-based robustness assessment for steel-composite car parks under vehicle fire", *Eng. Struct.*, 49 (2013) 719–732.

[8] D. Lange, C. Roben, A.S. Usmani, "Tall building collapse mechanisms initiated by fire: mechanisms and design methodology", *Eng. Struct.*, 36 (2012) 90–103.

[9] R.R. Sun, Z.H. Huang, I. Burgess, "Progressive collapse analysis of steel structures under fire condition", *Eng. Struct.* 34 (2012) 400–413.

[10] R.R. Sun, Z.H. Huang, I. Burgess, "The collapse behaviour of braced steel frames exposed to fire", *J. Constr. Steel Res.*, 72 (2012) 130–142.

[11] Behnam, B., "Failure Sensitivity Analysis of Tall Moment-Resisting Structures Under Natural Fires", *International Journal of Civil Engineering.*, Vol. 16(12) (2018) p. 1771-1780.

[12] Behnam, B., "Fire Structural Response of the Plasco Building: A Preliminary Investigation Report", *International Journal of Civil Engineering*, (2018).

[13] Memari, M. and H. Mahmoud, "Multi-resolution analysis of the SAC steel frames with RBS connections under fire", *Fire Safety Journal.*, Vol. 98 (2018) p. 90-108.

[14] Lou, G., C. Wang, J. Jiang, Y. Jiang, L. Wang, and G.-Q. Li, "Fire tests on full-scale steel portal frames against progressive collapse", *Journal of Constructional Steel Research.*, Vol. 145 (2018) p. 137–152.

[15] J. Jiang, "Nonlinear thermo mechanical analysis of structures using OpenSees", PhD Dissertation, University of Edinburgh, Edinburgh, UK, (2012).

[16] Jiang, J. and G.Q. Li, "Progressive collapse analysis of 3D steel frames with concrete slabs exposed to localized fire", *Engineering Structure Journal.*, Vol. 149 (2017) p. 21–34.

[17] Jiang, B.H., G.Q. Li, L.L. Li, and B.A. Izzuddin, "Simulations on progressive collapse resistance of steel moment frames under localized fire", *Journal of Construction Steel Research.*, Vol. 138 (2017) p. 380–388.

[18] Jiang, J. and G.Q. Li, "Disproportional collapse of 3D steel-framed structures exposed to various compartment fires", *Journal of Construction Steel Research.*, Vol. 138 (2017) p. 594–607.

و در ادامه با افزایش دما و تنزل مشخصات مقاومتی، نواحی جاری شدگی در محل اتصال رفته‌ها به ستون‌ها گسترش می‌یابد. سپس با تشکیل مفاصل پلاستیک در محل اتصال رفته‌ها به ستون‌ها، ناحیه میانی رفته‌ها شروع به جاری شدن می‌کند و در نهایت با گسترش نواحی جاری شدگی در میانه دهانه رفته‌ها سازه ناپایدار می‌شود.

۳- با بررسی روند گسترش نواحی جاری شدگی سازه تحت سناریو ۲ مشاهده می‌شود که با افزایش درجه حرارت سازه ابتدا محل اتصال رفته‌ها به ستون‌ها و در سمتی از سازه که تحت حرارت است، سازه شروع به جاری شدن می‌کند. در ادامه با افزایش دما و تنزل مشخصات مقاومتی، جاری شدگی به ستون‌ها گسترش می‌یابد. سپس با تشکیل مفاصل پلاستیک در محل اتصال رفته‌ها به ستون‌ها، ناحیه میانی رفته‌ها در سمت تحت حرارت سازه شروع به جاری شدن می‌کند و در نهایت با گسترش نواحی جاری شدگی در میانه رفته‌ها، سازه ناپایدار می‌شود.

۴- سناریوهای مختلف آتش‌سوزی نشان می‌دهد از دست رفتن مقاومت رفته‌ها و چشمه اتصال تحت حرارت موجب فروریزش کلی سازه می‌شود و بنابراین پیشنهاد شد برای این نواحی از پوشش‌های محافظت در برابر آتش استفاده شود تا زمان از دست رفتن مقاومت سازه در برابر آتش به تأخیر افتد.

۹- مراجع

[1] A.S. Usmani, Y.C. Chung, J.L. Torero, "How did the WTC towers collapse: a new theory", *Fire Safety Journal*, 38 (2003) 501–533.

[2] A.S. Usmani, G.R. Flint, A. Jowsey, S. Lamont, B. Lane, J. Torero, "Modelling of the collapse of large multi-storey steel frame structures in fire", *Proceedings of the 4th International Conference on Advances in Steel Structures*, (2005) 991–998.

[3] A.S. Usmani, "Stability of the World Trade Center Twin Towers structural frame in multiple floor fires", *J. Eng. Mech.* 131 (6) (2005) 654–657.

[4] H.M. Ali, P.E. Senseny, R.L. Alpert, "Lateral displacement and collapse of single-storey steel frames in uncontrolled fires", *Eng. Struct.* 26 (2004) 593–607.

[5] C. Fang, B.A. Izzuddin, R. Obiala, A.Y. Elghazouli, D.A. Nethercot, "Robustness of multi-storey car parks under vehicle fire", *J. Constr. Steel Res.* 75 (2012) 72–84.

[23] Rezaeian, A. and M. Yahyai, "Fire response of steel column-tree moment resisting frames. Materials and Structures", (2014) p. 14-1, 2914.

[24] ANSI/AISC 341-05, "Seismic provisions for structural steel buildings", American Institute of Steel Construction, Chicago, US (2005).

[25] ANSI/AISC 360-05, "Specifications for structural steel buildings", American Institute of Steel Construction, Chicago, US (2005).

[19] ABAQUS 6.14 Documentation, Dassault Systèmes Simulia Corp (2014)..

[20] ISO 834, "fire resistance test elements of building construction", International Organization for Standardization, Geneva (1999).

[21] ASCE 7-10, "Minimum design loads for buildings and other structures." American Society of Civil Engineers, Virginia, US (2010).

[22] EN 1993-1-2, "Eurocode3: Design of Steel Structures, Part1-2: General Rules- Structural Fire Design." European Committee for Normalization, Brussels, Belgium (2005).