



*Research Article*

## **Study of the Seismic Behavior of Steel Braced Frames After Fire**

**Hamid Kazemi<sup>1\*</sup>, Mohammad Mahdi Rashidian<sup>2</sup>, Ehsan Fereshtepour<sup>2</sup>**

1. Assistant Prof., Civil Department, Islamic Azad University, Mashhad Branch, Mashhad, Iran

2. Administration of Roads and Urban Development, Khorasan Razavi, Mashhad, Iran

Received: 05 January 2023; Revised: 06 March 2023; Accepted: 09 April 2023; Published: 09 April 2023

### **Abstract**

Buildings can be affected by special loads such as earthquakes, storms, fires or explosions, that each one can cause the destruction of the structure. In some cases, the structures may be affected by these loads Simultaneously, but there are not also any regulations in existing codes in this regard. Since many buildings have suffered small or large fires in the recent years in Iran, and on the other hand, Iran is located in a high risk zone of earthquakes, it is needed to control the seismic performance of the building after the fire experience can be considered as an important issue. In this regard, the studies have conducted so far have mostly focused on moment resisting frame structures, so in this paper, using ABAQUS software, the seismic behavior of steel braced frames structural system have been investigated. The results of the pushover analysis show that the ultimate strength and ductility capacity of the steel braced frames after fire can be significantly reduced, which is aggravated by increasing the number of floors.

### **Keywords:**

Nonlinear Static Analysis; Earthquake after Fire; Braced Frame; Abaqus Software

**Cite this article as:** kazemi hamid, Rashidian MM, Fereshtepour E. (2023). Study of the Seismic Behavior of Steel Braced Frames After Fire. *Civ Proj*;4(12):25–35. <https://doi.org/10.22034/cpj.2023.391811.1187>

**ISSN:** 2676-511X / **Copyright:** © 2023 by the author.

**Open Access:** This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License, which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons licence, and indicate if changes were made. The images or other third party material in this article are included in the article's Creative Commons licence, unless indicated otherwise in a credit line to the material. If material is not included in the article's Creative Commons licence and your intended use is not permitted by statutory regulation or exceeds the permitted use, you will need to obtain permission directly from the copyright holder. To view a copy of this licence, visit <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

**Journal's Note:** CPJ remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.



نشریه عمران و پروژه  
<http://www.cpjournals.com/>

## بررسی اثر آتش سوزی بر رفتار لرزه ای قاب های ساختمانی فولادی مهاربندی شده

حمید کاظمی<sup>۱</sup>، محمد مهدی رشیدیان<sup>۲</sup>، احسان فرشته پور<sup>۳</sup>

۱. استادیار دانشگاه آزاد اسلامی، واحد مشهد، مشهد، ایران

۲. اداره کل راه و شهرسازی خراسان رضوی، مشهد، ایران

۳. اداره کل راه و شهرسازی خراسان رضوی، مشهد، ایران

تاریخ دریافت: ۱۵ دی ۱۴۰۱؛ تاریخ بازنگری: ۱۵ اسفند ۱۴۰۱؛ تاریخ پذیرش: ۲۰ فروردین ۱۴۰۲؛ تاریخ انتشار آنلاین: ۲۰ فروردین ۱۴۰۲

### چکیده

ساختمان ها می توانند تحت تاثیر بارهای خاص مانند زلزله، طوفان، حریق یا انفجار قرار گیرند که هر یک می تواند موجب تخریب سازه شوند، اما در بعضی موارد ممکن است سازه در مراحل متوالی تحت اثر این بارها قرار گیرند که آیین نامه های موجود نیز در این خصوص فاقد پیش بینی های لازم می باشند. از آنجا که طی سال های گذشته ساختمان های متعددی دچار حریق های کوچک و یا بزرگ شده اند و از سوی دیگر ایران در ناحیه خطر بالای زلزله قرار دارد، لزوم بررسی عملکرد لرزه ای ساختمان پس از تجربه حریق می تواند موضوع مهمی تلقی گردد. در این خصوص مطالعات انجام شده تاکنون بیشتر بر سازه های قاب خمشی تمرکز داشته است، لذا در این مقاله به کمک نرم افزار آباکوس به بررسی عملکرد لرزه ای سیستم سازه ای قاب ساختمانی با مهاربند فلزی، پرداخته شده است. نتایج تحلیل غیرارتجاعی فزاینده نشان داد که مقاومت نهایی و ظرفیت شکل پذیری قاب های مهار شده در اثر آتش سوزی بطور قابل ملاحظه ای می تواند کاهش یابد که با افزایش تعداد طبقات نیز تشدید می گردد.

### کلمات کلیدی

تحلیل استاتیکی فزاینده، زلزله پس از حریق، قاب مهاربندی شده، نرم افزار آباکوس

## ۱. مقدمه

محیط پیرامونی ما معمولاً تحت پدیده‌های خاصی مانند سیل، زلزله، طوفان، انفجار و حریق قرار گرفته که هر یک دارای احتمال وقوع، میزان خطر و خطرپذیری مختص به خود می‌باشند. در ضوابط طراحی سازه‌ها نیز معمولاً یکی از این خطرات علاوه بر بارهای دائمی مانند بارهای مرده و زنده در نظر گرفته می‌شود و اثر وقوع یکی از این خطرات در طول عمر مفید سازه با خطر دیگر ترکیب نمی‌شود. اما از آنجا که آیین‌نامه‌ها به دنبال دوام بیشتر می‌باشند، ممکن است مشخصات مکانیکی سازه در اثر یک بار خاص دچار زوال غیر محسوس مصالح و اعضا شده و در مراحل بعد تحت تاثیر بارهای خاص ایمنی خود را از دست بدهد. لذا در سال‌های اخیر به عملکرد سازه‌ها با موضوعات بارها و خطرات ترکیبی توجه بیشتری شده است.

حوادث آتش‌سوزی در ساختمان‌ها، می‌توانند به علل و طرق مختلفی رخ دهند. وقوع چنین حوادثی می‌تواند اتفاقی، سهوی یا عمدی به سبب اشکال در تأسیسات برقی یا گازی، نگهداری نادرست مواد قابل اشتعال، نشت سوخت از خودروهای پارک شده، بی‌احتیاطی ساکنان و ... باشد. مبحث سوم مقررات ملی ساختمان (۱۳۹۵) اقدامات لازم برای جلوگیری از آتش‌سوزی‌ها و پیش‌بینی مهار سریع آنها از طریق سیستم‌های اعلام و اطفاء، فضاهای مورد نیاز و نحوه تخلیه، کاربرد مصالح مقاوم در برابر حریق و پوشش‌های ضد حریق تعیین می‌نماید. اما از سوی دیگر در طراحی سازه، کنترل‌های لازم برای پایداری دراز مدت سازه در برابر بارهای ثقیل و جانبی و بدون توجه به تاثیر حریق انجام می‌شوند، و نیز مشاهدات و تجارب قبلی در آتش‌سوزی‌ها، نشان می‌دهد که هیچ اقدامی در خصوص بررسی و ارزیابی عملکرد لرزه‌ای سازه انجام نشده است. بدیهی است که ساختمان‌هایی که قبل از الزامی شدن مبحث سوم مقررات ملی ساخته شده‌اند و یا آن دسته از ساختمان‌ها که به هر دلیل دارای ضعف‌های اجرایی در رعایت مبحث سوم هستند، می‌توانند پس از تجربه حریق، تحت زلزله‌های محتمل، دچار آسیب‌های جدی شوند.

## ۲. کارهای انجام شده

طی دهه‌های گذشته مطالعات مختلفی مرتبط با موضوع حریق در ساختمان‌ها انجام شده است که به صورت اثر مستقیم حریق بر سازه و یا ترکیب آن با دیگر خطرات مانند زلزله مطالعه شده است. لذا در ادامه جهت آشنایی دقیق‌تر با تحقیقات انجام شده، به برخی از این مطالعات پرداخته شده است.

در اواسط دهه‌ی ۹۰ میلادی، پروژه‌ی تحقیقاتی گسترده‌ای با شبیه‌سازی ساختمان‌های بزرگ مقیاس در آزمایشگاه گروه BRE واقع در کاردینگتون، جهت تعیین پاسخ ساختمان در برابر آتش‌سوزی در اتاق‌ها انجام شد. مطالعات نشان داد که حریق از دو طریق بر ظرفیت سازه‌ی ساختمان اثر می‌گذارد: (۱) قرار گرفتن طولانی مدت اجزای سازه در درجه حرارت‌های بالا، مشخصات مکانیکی آن‌ها را کاهش داده و منجر به کاهش ظرفیت کل سازه می‌گردد و (۲) قرار گرفتن در درجه حرارت‌های بالا سبب ایجاد نیروهای داخلی (به دلیل گیرداری و جلوگیری از انبساط حرارتی) یا تغییرشکل‌های محوری در اعضای سازه شده (به دلیل کرنش‌های پلاستیک، خیز یا کمانش) که بر ناپایداری کلی سازه اثر می‌گذارد. نتایج این مطالعه منجر به تهیه‌ی دستورالعملی برای طراحی بر پایه‌ی عملکرد در مقابل حریق را فراهم نمود و ونگ نیز در سال ۲۰۰۰ مقاله‌ای بر اساس این مطالعات ارائه نمود. در این خصوص می‌توان به تدوین استاندارد آزمون‌های دوام مصالح در برابر آتش در اروپا مانند ISO 834 نیز اشاره نمود.

عثمانی و همکاران (۲۰۰۱) نیروها، تغییرشکل‌ها و کرنش‌های حرارتی ایجاد شده در اعضای فولادی را در درجه حرارت‌های مختلف با تغییرات یکنواخت و غیر یکنواخت دما بررسی نموده‌اند که نتایج آن، توانسته مبنای خوبی برای دیگر مطالعات قرار گیرد. فلینت (۲۰۰۵) نیز در رساله دکتری خود، بطور مفصل اثر آتش بر مکانیزم فروریزش ساختمان‌های بلند را تحقیق کرده است.

پارکینسون و همکاران (۲۰۰۸)، همچنین مک‌آلیستر و همکاران (۲۰۱۰) به ارائه روش‌های طراحی سازه‌های بتنی و فولادی در شرایط آتش پرداخته‌اند. در واقع تلاش آنها برای اصلاح روش‌های طراحی ایمن‌تر برای شرایط حریق در ساختمان‌ها انجام شده است.

اثرات نیروها و تغییرشکل‌های حرارتی در ستون‌ها نیز توسط هو (۲۰۱۰) مورد مطالعه قرار گرفته است که نشان داد ممانعت از انبساط حرارتی می‌تواند تأثیر زیادی در عملکرد ستون‌های فولادی در شرایط حریق داشته باشد و لذا نیروی محوری ستون را باید برآیندی از نیروهای ثقلی و نیروهای حاصل از گیرداری در نظر گرفت و چشم‌پوشی از این نیروها می‌تواند منجر به طراحی‌های غیر قابل اعتماد گردد.

سان و همکاران (۲۰۱۲) رفتار استاتیکی و دینامیکی ساختمان‌های فولادی را به هنگام خرابی‌های پیش‌رونده‌ی کلی و موضعی در شرایط آتش‌سوزی مورد بررسی قرار داده‌اند. نتایج این مطالعات نشان داد که مهاربندی سازه برای جلوگیری از خرابی پیش‌رونده‌ی قاب مفید بوده و درجه حرارت در وضعیت خرابی کلی قاب، به سختی جانبی آن حساس نمی‌باشد. همچنین لی در سال ۲۰۱۲ در رساله دکتری به بررسی تأثیر تغییرات خواص مصالح و اثر آن بر سازه در شرایط تغییرات شدید دما پرداخته است.

بیکر و همکاران (۲۰۱۲) در نیوزیلند همچنین بهنام و رونق (۲۰۱۴) رفتار سازه‌های قاب خمشی فولادی بلندمرتبه در معرض آتش‌سوزی پس از زلزله را بررسی نمودند. نتایج مطالعه نشان داد که تأخیر زمانی در پیشروی حریق به طبقات بالاتر، تأثیر قابل توجهی بر رفتار سازه تحت آتش‌سوزی پس از زلزله دارند. همچنین نشان داده شد که اهمیت کمانش در ستون‌های سازه به سبب کاهش مشخصات مکانیکی فولاد در درجه حرارت‌های بالا، دو چندان می‌شود.

در مطالعه‌ی دیگر، ماراویاس و فاسولاکیس (۲۰۱۴)، مشخصات مکانیکی مصالح و رفتار کلی سازه برای فولادهای با مقاومت کم و زیاد را که در معرض حریق گرم و سپس سرد می‌شوند، بررسی کرده‌اند. نتیجه آنکه فولادهای مختلف، در حرارت ۶۰۰ درجه سانتیگراد، قابلیت بازیابی حداقل ۷۵ درصد مشخصات مکانیکی خود را داشته، اما مقاومت تسلیم، در بالای ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد تا ۴۰ درصد کاهش می‌یابد. ژائو (۲۰۱۴) نیز به ارزیابی مقاومت ساختمان‌ها در مقابل آتش بر اساس یوروکد ۳ پرداخته و روند مقاومت و پایداری تیرها و سقف‌ها را در هنگام آتش‌سوزی ارزیابی نموده است. راکوسکایته و همکاران در سال‌های ۲۰۱۵، ۲۰۱۷ و ۲۰۲۱ مطالعات متعددی بر سناریوهای مختلف حریق و نحوه گسترش آن در ساختمان‌های چند طبقه و تأثیر آن در مکانیزم فروریزش سازه انجام داده است.

حاجی کریمیان و سایرین (۲۰۱۶) رفتار لرزه‌ای قاب‌های فولادی صلب پس از آتش‌سوزی را مورد بررسی قرار داده‌اند. نتایج پژوهش نشان داد که برش پایه نظیر تغییر مکان مشخص در قاب‌هایی با تجربه آتش‌سوزی نسبت به قاب فاقد تجربه حریق، بیشتر است. ضمناً جابجایی نسبی نیز در طبقات فوقانی تشدید شده و معمولاً از مقدار جابه‌جایی نسبی مجاز تجاوز می‌کند.

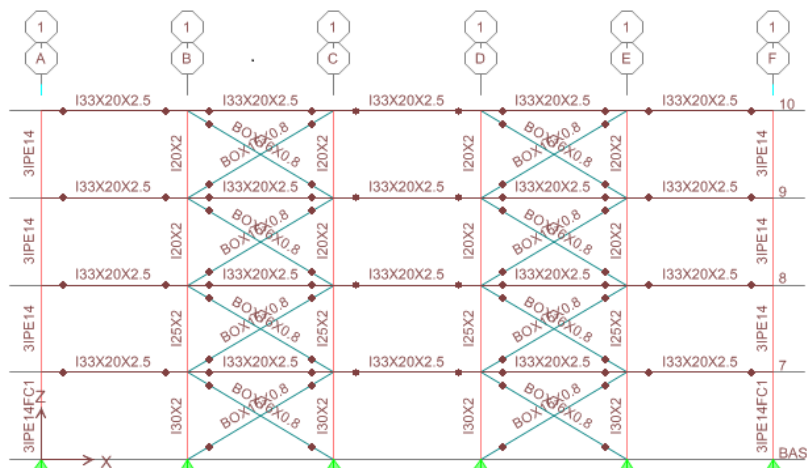
کاظمی و همای (۲۰۱۶) به بررسی میزان افزایش جابجایی نسبی ساختمان، همچنین ایزدی فرد و همکاران (۲۰۱۹)، به بررسی خرابی پیش‌رونده‌ی قاب خمشی فولادی ناشی از حریق پس از زلزله پرداختند. در واقع در این مطالعات، حریق در سازه آسیب‌دیده و بلافاصله پس از زلزله ایجاد شده و نتایج جابجایی‌های جانبی ارزیابی شده است.

کفاش و همکاران (۲۰۲۱) سناریوهای مختلف آتش‌سوزی در قاب مهاربندی شده هم محور فولادی با شکل‌پذیری کم و زیاد، زمان دوام سازه و نحوه تغییرات نیروهای محوری و لنگر خمشی را بررسی نمودند. در این مطالعه اگر چه اثر زلزله بطور مستقیم بر سازه در نظر گرفته نشده، اما اثر مثبت طرح لرزه‌ای مهاربندها مطابق با شکل‌پذیری زیاد در تامین زمان دوام بیشتر سازه نسبت به فروریزش، نتیجه‌گیری شده است.

با وجود آن که آیین‌نامه‌های بسیاری برای مقابله با وقوع حوادث احتمالی سازه تهیه و تدوین گردیده‌اند، لیکن آیین‌نامه‌های موجود یا برای طراحی سازه‌ها در برابر زلزله و یا برای بررسی مقاومت اعضا در برابر حریق تهیه شده و ترکیب این دو حادثه بطور همزمان و یا متوالی برای طراحی یک سازه در نظر گرفته نشده است. مشاهدات نشان می‌دهند که بسیاری از سازه‌ها پس از آتش‌سوزی و اطفای حریق، غالباً پایدار بوده و قابلیت استفاده آن‌ها صرفاً با اصلاح نما و نازک‌کاری ساختمان بدون هیچ‌گونه ارزیابی سازه‌ای حفظ می‌گردد. لذا از آنجا که کشور ایران غالباً در خطر لرزه‌خیزی زیاد قرار دارد، لزوم بررسی این موضوع دو چندان می‌نماید. بررسی مطالعات گذشته نشان می‌دهد اکثر تحقیقات بر روی سیستم‌های قاب خمشی بوده و مطالعات بر روی سیستم‌های مهار شده از جمله قاب ساختمانی با مهاربند فلزی بسیار محدود می‌باشند. لذا این مقاله به بررسی عملکرد لرزه‌ای این نوع سیستم سازه‌ای با تجربه حریق می‌پردازد. از این رو در این مقاله، چند قاب فولادی با مهاربند هم محور نمونه بر اساس آیین‌نامه‌های معتبر موجود طراحی شده، سپس در معرض آتش‌سوزی قرار داده شده و پس از مرحله‌ی سرد شدن، تحت بار زلزله قرار گرفته و با حالتی که تنها در معرض بار زلزله قرار داشته‌اند، مقایسه شده‌اند.

### ۳. مدل سازی

در این پژوهش سه قاب بادی ۴، ۷ و ۱۰ طبقه انتخاب و بر اساس مبحث ششم مقررات ملی، آیین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله-ویرایش چهارم (۲۰۱۴) و مبحث دهم مقررات ملی بارگذاری (به کمک نرم‌افزار ایتبز<sup>۱</sup>) طراحی شده و سپس به کمک نرم‌افزار آباکوس<sup>۲</sup> تحلیل استاتیکی غیرخطی انجام شده است. مطابق شکل ۱، همه قاب‌های منتخب، ۵ دهانه با طول دهانه ثابت ۶ متر و ارتفاع همه طبقات ۳/۶۰ متر فرض شده‌اند. بار خطی مرده برابر ۴۰۰۰ کیلوگرم بر متر و بار خطی زنده برابر ۲۰۰۰ کیلوگرم بر متر منظور شده است. کلیه اتصالات تیرها و مهاربندها مفصلی بوده و مشخصات مقاطع تیرها، ستون‌ها و مهاربندها در جداول ۱ تا ۳ نشان داده شده است. لازم به ذکر است که مطابق نامگذاری‌های انجام شده در جداول ۱ تا ۳، I300\*30 نشان‌دهنده ستون I شکل بوده که عدد اول طول بال و جان و عدد دوم ضخامت آن‌را نشان می‌دهد. مقطع کلیه تیرها نیز در همه مدل‌ها یکسان و با I330\*200\*25 نامگذاری شده که به ترتیب ارتفاع تیر، عرض بال و ضخامت بال و جان را نشان می‌دهند. ستون‌های کناری که باربر ثقیلی می‌باشند بصورت چسبیده به هم با ورق تقویتی بال می‌باشند.



شکل ۱: مقاطع تیرها، ستون‌ها و مهاربندهای قاب مهاربندی شده ۴ طبقه

<sup>1</sup> ABAQUS

<sup>2</sup> ETABS2019

جدول ۱: مقاطع طراحی شده قاب ۴ طبقه

مهاربند	ستون های دهانه مهاربندی	ستون های ثقلی	طبقات
Box 160*8	I300*20	3IPE140+2PL160*10	طبقه اول
Box 160*8	I250*20	3IPE140	طبقه دوم
Box 160*8	I200*20	3IPE140	طبقات سوم و چهارم

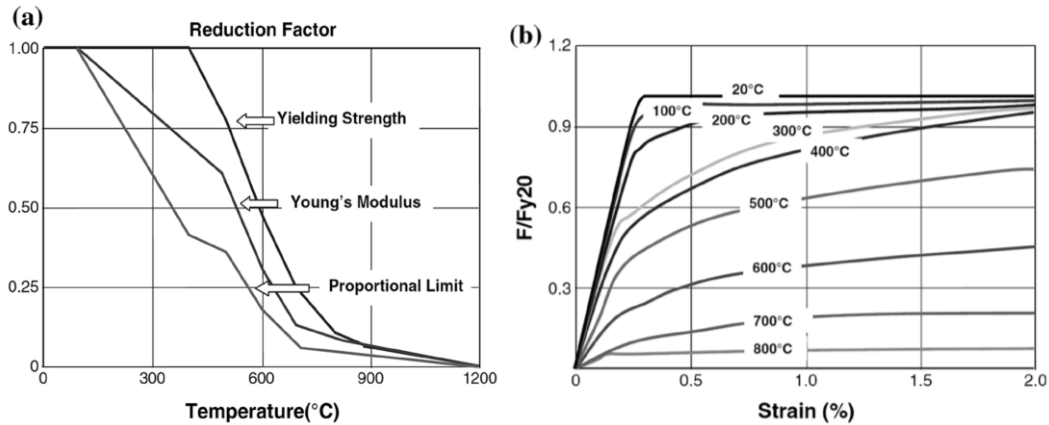
جدول ۲: مقاطع طراحی شده قاب ۷ طبقه

مهاربند	ستون های دهانه مهاربندی	ستون های ثقلی	طبقات
Box 160*8	I400*40	3IPE180+2PL220*10	طبقه اول
Box 160*8	I400*30	3IPE180+2PL220*10	طبقه دوم
Box 160*8	I400*30	3IPE140+2PL160*10	طبقه سوم
Box 160*8	I300*20	3IPE140+2PL160*10	طبقه چهارم
Box 160*8	I250*20	3IPE140	طبقه پنجم
Box 160*8	I200*20	3IPE140	طبقات ششم و هفتم

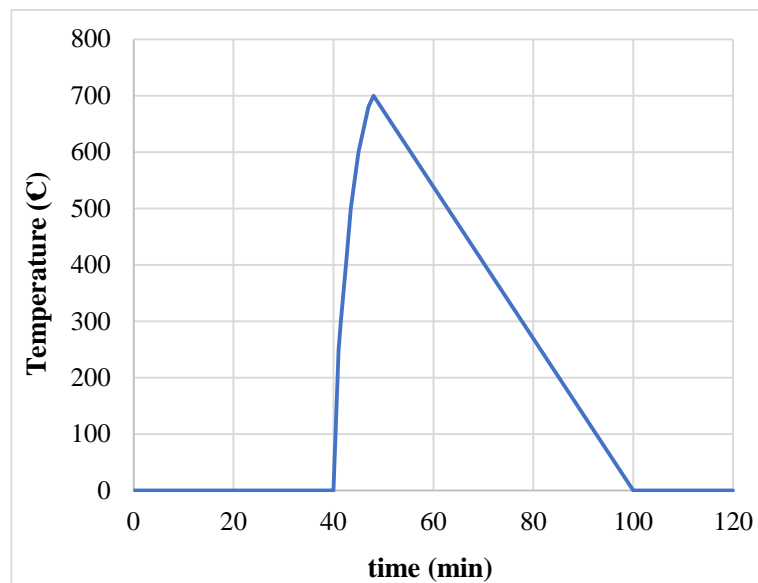
جدول ۳: مقاطع طراحی شده قاب ۱۰ طبقه

مهاربند	ستون های دهانه مهاربندی	ستون های ثقلی	طبقات
Box 160*10	I400*40	3IPE180+2PL320*12	طبقه اول و دوم
Box 160*8	I400*40	3IPE180+2PL220*10	طبقه سوم و چهارم
Box 160*8	I400*30	3IPE180+2PL220*10	طبقه پنجم و ششم
Box 160*8	I300*20	3IPE140+2PL160*10	طبقه هفتم و هشتم
Box 160*8	I200*20	3IPE140	طبقه نهم و دهم

ضریب پواسون  $\nu = 0.3$ ، تنش تسلیم و مدول ارتجاعی فولاد در درجه حرارت  $20^\circ\text{C}$  درجه سانتیگراد به ترتیب  $240$  مگاپاسکال و  $210$  گیگاپاسکال فرض شده‌اند. مشخصات فولاد در درجه حرارت‌های بالا با ضرب ضرایب کاهندگی در مقادیر این مشخصات اعمالی و نسبت به درجه حرارت  $20^\circ\text{C}$  درجه سانتیگراد به دست می‌آیند. ضرایب کاهندگی فولاد مورد استفاده در این مطالعه بر اساس آزمایشات انجام شده قبلی در شکل ۲-الف ارائه و مورد استفاده قرار گرفته است. مجموعه‌ای از نمودارهای تنش- کرنش نرمال شده برای فولاد ساختمانی در درجه حرارت‌های بالا نیز مطابق شکل ۲-ب در نرم افزار استفاده شده است. همچنین بر اساس پیرو کد ۳ (۲۰۰۲)، متوسط ضریب انبساط حرارتی فولاد برابر  $10.5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$  در نظر گرفته شده است. در تحلیل استاتیکی غیرخطی کلیه اعضا تیرگونه در نظر گرفته شده و اثر تغییر مکان‌های بزرگ لحاظ شده است. از آنجا که مشخصات مصالح وابسته به دما تعریف شده است، دمای سازه در شرایط اولیه  $20^\circ\text{C}$  درجه سانتیگراد فرض شده است. بنابراین ابتدا قاب‌ها تحت بارگذاری ثقلی قرار گرفته و سپس توسط یک سناریوی حریق مشخص مطابق شکل ۳، گرم و سپس سرد شده‌اند. در گام بعد، قاب‌ها در معرض بار جانبی یکنوا قرار گرفته و تحلیل استاتیکی غیرخطی فزاینده انجام گرفته است. لازم به ذکر آنکه راستی آزمایشی مدل‌سازی با مطالعات انجام شده توسط حاجی کریمیان و همکاران نیز صورت گرفته است.



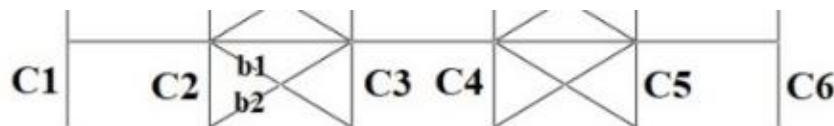
شکل ۲: الف) ضرایب کاهش‌دهنده مشخصات فولاد در درجه حرارت‌های بالا، ب) تنش و کرنش فولاد ساختمانی در درجه حرارت‌های بالا (Eurocode CEN 3)



شکل ۳: منحنی تغییرات دمای محیط در اثر آتش سوزی

#### ۴. یافته‌های حاصل از تحلیل

با انجام تحلیل استاتیکی فزاینده به کمک نرم‌افزار آباکوس، نتایج تغییرشکل، جابجایی‌ها و نیروهای داخلی اعضا بدست آمده‌اند. به منظور درک بهتر از نتایج و نمودارهای بدست آمده، شکل ۴ نحوه نام‌گذاری ستون‌ها و مهاربندها را نشان می‌دهد. به دلیل تقارن، فقط نیروی اعضای یک نیمه قاب رسم شده‌اند.

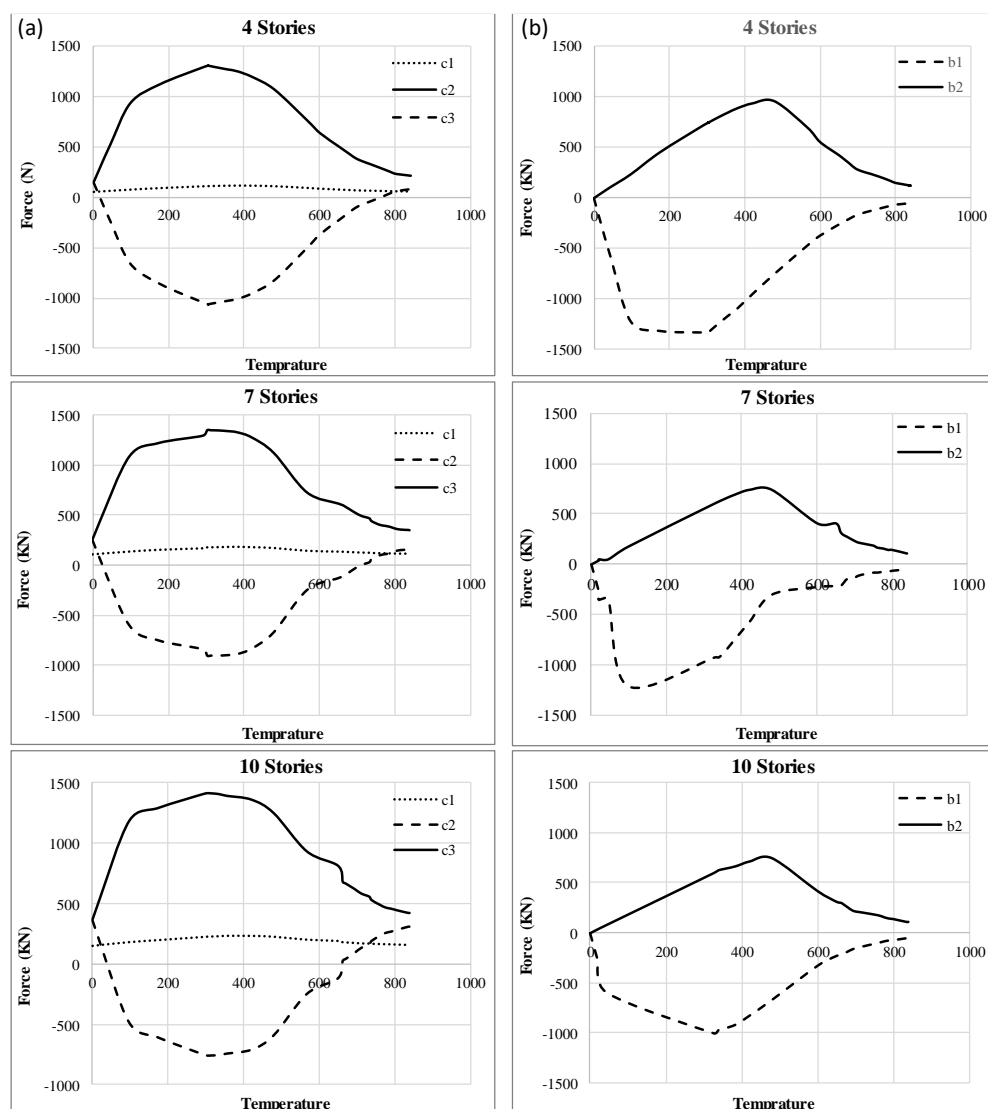


شکل ۴: نام‌گذاری ستون‌ها و بادبندهای قاب‌های موردنظر

اشکال ۵-الف تغییرات نیروی داخلی ستون‌ها و اشکال ۵-ب تغییرات نیروی داخلی مهاربندها را به ترتیب در قاب‌های ۴، ۷ و ۱۰ طبقه در دماهای مختلف نشان می‌دهند که این تغییرات در نیروهای داخلی، مربوط به اثر گیرداری دهانه مهاربندی، کاهش مشخصات اعضا و انتقال نیرو از ستون‌ها به مهاربندها می‌باشد.

در شکل ۴-۱۱ نیروهای محوری مدل‌های مورد بررسی در نرم‌افزار آباکوس نمایش داده شده است. در نمودار محور افقی درجه حرارت به سانتیگراد و در محور قائم نیرو محوری به نیوتن نشان داده شده‌اند.

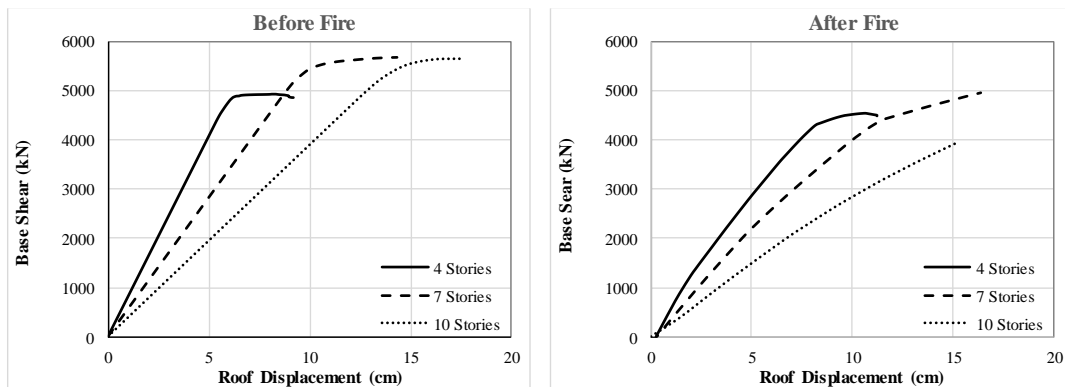
همانطور که در اشکال ۵ مشاهده می‌شود که به دلیل نامعینی قاب مهاربندی شده، نیروهای داخلی ابتدا با افزایش درجه حرارت، افزایش یافته می‌باشد، اما به مرور و با نزدیک شدن به درجه حرارت ۸۰۰ درجه سانتیگراد، نیروی داخلی مهاربندها به سمت صفر میل می‌کند که نشان از کاهش شدید سختی اعضا و در نتیجه جذب نیروی بسیار کم آن‌ها دارد. نیروی محوری در ستون‌های دهانه مهاربندی با افزایش درجه حرارت تغییرات محسوس پیدا می‌کند و در ستون‌های دیگر، محسوس نیست. نمودارها نشان می‌دهند که میزان تغییرات نیروی محوری تا ۸۰۰ درجه سانتیگراد، برای ستون C1 مقدار ۰/۳۶٪، ستون C3 مقدار ۲۱/۲٪ و ستون C2 مقدار ۵۹/۲٪ را داراست. به عبارت دیگر نمی‌توان میزان افزایش یکسانی را در تمام قاب‌ها پیش‌بینی نمود. از سوی دیگر با افزایش درجه حرارت، به دلیل گیرداری سازه و درجه نامعینی نیروهای محوری داخلی اعضا افزایش یافته اما به تدریج ازدیاد دما باعث کاهش سختی اعضا شده و در نتیجه منجر به کاهش نیروهای داخلی می‌شود، ولی مقداری نیروی پس‌ماند، پس از سرد شدن سازه در اعضای قاب باقی می‌ماند که می‌تواند پتانسیلی برای افت عملکرد در زلزله‌های آتی باشد و در نتایج تحلیل بار جانبی در قسمت بعدی مشخص می‌باشد.



شکل ۵: الف) تغییرات نیرو-درجه حرارت در ستون‌های طبقه اول، ب) تغییرات نیرو-درجه حرارت در مهاربندهای طبقه اول



شکل ۶ منحنی ظرفیت قاب‌های مورد بررسی را نشان می‌دهد و در دو حالت با و بدون تجربه آتش‌سوزی رسم شده‌اند. مشخص می‌شود که اولاً اثر آتش‌سوزی بر کاهش مقاومت نهایی قاب‌های ۴، ۷ و ۱۰ طبقه، به ترتیب حدود مقادیر ۱۰، ۱۴ و ۳۰ درصد بوده و ثانیاً با افزایش تعداد طبقات، علاوه بر کاهش سختی، شکل‌پذیری قاب‌ها کاهش یافته و مود شکست ناگهانی تشدید می‌شود که احتمالاً می‌تواند به دلیل تشدید اثرات خرابی پیش‌رونده در ساختمان‌های با تعداد طبقات بیشتر باشد. کاهش مقاومت و شکل‌پذیری قاب‌های مهارشده مذکور می‌تواند ضعف مهمی در رفتار لرزه‌ای سازه تلقی شود و منجر به کاهش شدید ایمنی و اطمینان سازه در زلزله گردد که به خصوص این موضوع در ساختمان‌های عمومی مورد توجه واقع گردد.



شکل ۶: نمودار مقایسه‌ای برش پایه-جابجایی جانبی در قاب‌های ۴، ۷ و ۱۰ طبقه

از سوی دیگر در شکل زیر، تغییرات نیرو-درجه حرارت در بادبندهای پایین‌ترین طبقه قاب‌های مورد مطالعه نشان داده شده است.

## ۵. نتیجه گیری

از آنجا که در کشور ما استفاده از مصالح مقاوم در برابر آتش به خصوص پوشش‌های ضد حریق سازه دارای ضعف می‌باشد، لذا ساختمان‌ها پس از تجربه آتش‌سوزی ممکن است دچار آسیب‌های پیدا و پنهان به سازه شوند و مقررات ملی موجود نیز فاقد روش‌های بررسی کمی و کیفی مناسب سازه‌ها در این خصوص می‌باشد. لذا در این مقاله ۳ قاب نمونه ۴، ۷ و ۱۰ طبقه فولادی با مهاربند هم محور فولادی انتخاب شده و به کمک نرم‌افزار آباکوس مورد تحلیل استاتیکی فزاینده قرار گرفته‌اند که نتایج زیر را می‌توان ارائه نمود.

- در مدل‌های مورد بررسی نیروی محوری در برخی ستون‌ها با افزایش درجه حرارت کاهش قابل ملاحظه‌ای داشته و در بعضی از ستون‌ها تغییرات آن محسوس نیست. میزان تغییرات نیروی محوری از ۲۵ درجه تا ۸۰۰ درجه برای ستون c6 مقدار ۰.۳۶٪، ستون c5 مقدار ۲۱.۲۵٪ و ستون C4 مقدار ۵۹.۱۸٪ را داراست.
- با مشاهده نتایج ظرفیت ساختمان‌ها، مشخص می‌شود که اولاً اثر آتش‌سوزی بر کاهش مقاومت نهایی قاب‌های ۴، ۷ و ۱۰ طبقه، به ترتیب مقادیر ۱۰، ۱۴ و ۳۰ درصد را نشان می‌دهد. ثانیاً با افزایش تعداد طبقات، علاوه بر کاهش سختی، شکل‌پذیری قاب‌ها کاهش یافته و مود شکست ناگهانی تشدید شده است که احتمالاً می‌تواند به دلیل اثر تغییرمکان‌های درجه دوم و یا تشدید اثرات خرابی پیش‌رونده در ساختمان‌های با تعداد طبقات بیشتر باشد.
- نتایج نشان می‌دهد که با وجود آن که نیروهای محوری ستون‌ها پس از اتمام آتش‌سوزی، نسبت به نیروی محوری ستون‌های متناظر در قاب‌های حرارت ندیده کاملاً متفاوت است؛ اما این اختلاف پس از اعمال بار لرزه‌ای کاهش یافته و مقادیر نیروی محوری ستون‌های مشابه در دو حالت فوق به مقداری نزدیک به یکدیگر میل می‌کنند.

- تاثیر قابل ملاحظه آتش‌سوزی بر تغییر عملکرد قاب‌ها (به خصوص در درجه حرارت‌های بالا) لزوم اضافه‌شدن بخش حریق در نشریه بهسازی لرزه‌ای سازه‌ها و تعریف منحنی رفتاری اعضایی که دچار حریق شده‌اند را نشان می‌دهد.
- نظر به اینکه مجوز خاصی برای بهره‌برداری مجدد سازه‌ها بعد از حریق توسط مراجع ذی صلاح داده نمی‌شود، لذا لازم است تغییراتی در ارائه مجوز بهره‌برداری مجدد به ساختمان‌هایی که دچار حریق شده‌اند، داده شود.

## سپاسگزاری

این مقاله بخشی از طرح پژوهشی تعریف شده در اداره کل راه و شهرسازی خراسان رضوی می‌باشد و نویسنده مقاله، کمال سپاسگزاری را از کارشناسان محترم آن اداره کل به منظور همکاری در و ارائه اطلاعات لازم و انجام طرح را دارد.

## مراجع

- ABAQUS-V2020 (2020), Finite Element Analysis Software, RI, USA.
- Baker G.B., Collier P.C., Abu A.K., Houston B, (2012), Post-Earthquake Structural Design for Fire-a New Zealand Perspective. In: Proceedings of the 7th international conference on structures in fire, Zurich, Switzerland, pp 23–32.
- Behnam B. and Ronagh H. R, (2014), Behavior of Noment-Resisting Tall Steel Structures Exposed to a Vertically Traveling Post-Earthquake Fire, The Structural Design of Tall and Special Buildings, 23(14), 1083-1096.
- BRE group report, (1996), BRE Cardington Steel Framed Building Fire Tests, Laboratory Test Report, BRE in collaboration with British Steel, Cardington, UK.
- ETABS-V2019 (2019), Extended 3D Analysis of Building Systems. Berkeley, CA, USA.
- Eurocode CEN (2001) 3, Design of Steel Structures, part 1.2: General Rules-Structural Fire Design (ENV 1993-1-2: 2001), European Committee for Standardization, Brussels
- Flint, G., (2005), Fire Induced Collapse of Tall Buildings. Ph.D. Thesis, University of Edinburgh, Scotland.
- Hajikarimian H, Hamed Farzaneh, and Izadifard R. A, (1395), Seismic Behavior Investigation of Rigid Steel Frames after Fire, Science Earthquake Engineering, Third year, No 3, Page 61-74 (Persian).
- Ho C.T.T, (2010), Analysis of Thermally Induced Forces in Steel Columns Subjected to Fire. Master of Science in Engineering, University of Texas, Austin.
- Iranian Seismic Code (2014), Iranian Code of Practice for Seismic Resistant Design of Buildings (Standard 2800), Edition 4, Road, Housing and Urban Development Research Center, Iran (in Persian).
- ISO 834 (1999), Fire Resistance Tests–Elements of Building Construction. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- Izadifard R.A. and Hajikarimian H., Giuliani L, (2019), Progressive Collapse of Steel Moment Frame Subjected to Post-Earthquake Fire. Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering, 43, pages 9–20.
- Kaffash M.R, Karamodina A. and M. Moghiman M, (2022), Behavior of Concentrically Braced Steel Frames under Fire Loading, Scientia Iranica A: Civil Engineering, 29(3), 951(963).
- Kazemi S. and Homami P, (2016), Investigation on Effect of Fire after Earthquake on Moment Resisting Frames Mid-rise Performance, National Conference on Protection of Buildings and Transportation Systems against Fire, BHRC, (Persian).
- Lee J. (2012), Elevated-Temperature Properties of ASTM A992 Steel for Structural-Fire Engineering Analysis, Ph.D. Thesis, University of Texas Austin.

Maraveas C. and Fasoulakis Z, (2014), Post-Fire Mechanical Properties of Structural Steel. 8th National Steel Structures Conference, Tripoli, Greece.

McAllister T.P., Gross J.L., and Hurley M.J, (2010), Best Practice Guidelines for Structural Fire Resistance Design of Concrete and Steel Buildings, National Institute of Standards and Technology.

National Building Regulations Office, Vol ۶: Loads for Buildings, 2017, BHRC, Tehran, Iran, [Persian].

National Building Regulations Office, Vol ۱۰: Design and Construction of Steel Structures, 2019, BHRC, Tehran, Iran, [Persian].

Parkinson D.L, Kodur V., and Sullivan P.D, (2008), Performance-Based Design of Structural Steel for Fire Conditions: A Calculation Methodology, ASCE.

Rackauskaite E, El-Rimawi J, (2015), A Study on the Effect of Compartment Fires on the Behaviour of Multi-Storey Steel Framed Structures, *Fire Technol*, 51(4):867–886

Rackauskaite E., Kotsovinos P., Jeffers A. and Rein G., (2017), Structural Analysis of Multi-Storey Steel Frames Exposed to Travelling Fires and Traditional Design Fires, *Engineering Structures*, Vol. 150, 1 November 2017, Pages 271-287

Rackauskaite E., Kotsovinos P., David L. and Rein G., (2021), Collapse Initiation and Mechanisms for a Generic Multi-Storey Steel Frame Subjected to Uniform and Travelling Fires, *International Journal of High-Rise Buildings* 10 (4) 265-283.

Sun R., Huang Z., and Burgess I.W, (2012), Progressive collapse analysis of steel structures under fire conditions, *Engineering Structures*, 34,400-413.

Sun R., Huang Z., and Burgess I.W, (2012), The Collapse Behaviour of Braced steel Frames Exposed to Fire, *Journal of Constructional Steel Research*, 72, 130-142.

The Third Topic of the National Building Regulations, Protection of Buildings against Fire, 1395, (Persian).

Usmani A.S., Rotter J.M., Lamont S., Sanad A. M., and Gillie M, (2001), Fundamental Principles of Structural Behaviour Under Thermal Effects, *Fire Safety Journal*, 36(8), 721-744.

Wang Y.C, (2000), An Analysis of the Global Structural Behaviour of the Cardington Steel-Framed Building During the two BRE Fire Tests, *Engineering Structures*, 22 (2000) 401–412.

Zhao B, (2014), Fire Resistance Assessment of Steel Structures According to Part 1-2 of Eurocode 3 (En 1993-1-2), *Eurocodes: Background and Applications Structural Fire Design*.