



Journal of Structural and Construction Engineering

www.jsce.ir



Experimental and numerical study of the post-fire behavior of steel sections with fireproof coating

Elham Hedayati¹, Shirin Esmaili Niari^{2*}, Elham Ghandi²

1- MSC Graduate of Structural Engineering, Faculty of Technical and Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

2- Associate Professor, Faculty of Technical and Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

ABSTRACT

In this paper, aiming to examine how fireproof coatings influence the post-fire behavior of steel sections under axial compressive loading, the residual strength of hollow steel columns with fireproof coatings after exposure to high temperatures and cooling was assessed through experimental and numerical studies. For this research, samples were selected from hollow steel sections coated with mineral cement and gypsum-based fireproof coatings. Initially, the furnace was brought to temperatures of 400, 600, 800, and 1000 degrees Celsius, and then the samples were placed in the electric furnace at the desired temperatures for one hour. After the samples were cooled to room temperature over 24 hours, a tensile test was conducted to obtain the mechanical properties of the steel, and a compressive load-bearing test was performed to evaluate the residual compressive strength of the samples. The results of the fireproof-coated samples were compared with those of the uncoated samples. Next, a numerical model was developed using the finite element software ABAQUS, which can be used to perform parametric studies. The results of the numerical model were compared with the results of the experiments and verified. The findings regarding the residual strength of the sections showed that the use of fireproof coatings increased the residual strength of the sections at 800 and 1000 degrees Celsius by approximately 30 to 34 percent compared to the uncoated samples at the same temperature.

ARTICLE INFO

Receive Date: 27 July 2025

Revise Date: 01 November 2025

Accept Date: 24 December 2025

Keywords:

*Mechanical properties of steel
fireproof coating
Experimental model
residual strength
numerical model*

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2025.532061.3765>

*Corresponding author: Shirin Esmaili Niari

Email address: sh_esmaeili@uma.ac.ir

مطالعه آزمایشگاهی و عددی رفتار پس از آتش سوزی مقاطع فولادی با پوشش‌های ضد حریق

الهام هدایتی^۱، شیرین اسماعیلی نیاری^{۲*}، الهام قندی^۲

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی عمران-سازه، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

۲- دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

چکیده

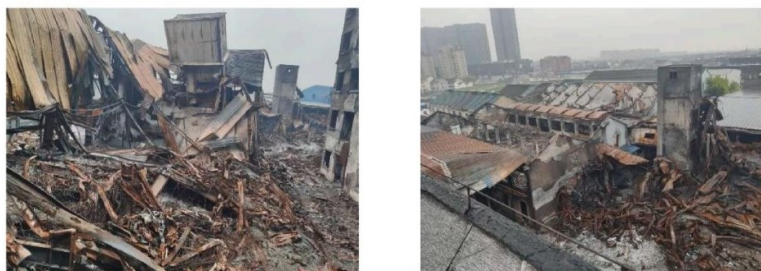
در این مقاله با هدف بررسی چگونگی تأثیر پوشش‌های ضد حریق در بهبود رفتار پس از آتش مقاطع فولادی تحت بارگذاری محوری فشاری، مقاومت پسماند ستون‌های فولادی توخالی با پوشش‌های ضد حریق پس از قرارگیری در معرض دماهای بالا و سردشدگی، با استفاده از انجام مطالعات آزمایشگاهی و عددی، مورد ارزیابی قرار گرفته است. برای انجام این پژوهش، نمونه‌ها از مقاطع فولادی قوطی شکل که با پوشش ضد حریق معدنی سیمانی و گچی پوشش داده شده بودند، انتخاب گردید. ابتدا کوره به دماهای ۴۰۰، ۶۰۰، ۸۰۰ و ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد رسانده شده سپس نمونه‌ها در کوره الکتریکی تحت دماهای مدنظر به مدت یک ساعت قرار داده شدند. بعد از خنک شدن نمونه‌ها در دمای محیط طی ۲۴ ساعت، آزمایش کشش برای بدست آوردن مشخصات مکانیکی فولاد و آزمایش ظرفیت باربری فشاری برای ارزیابی مقاومت فشاری پسماند نمونه‌ها انجام شد. نتایج نمونه‌های با پوشش ضد حریق با نمونه‌های بدون پوشش مقایسه شد. در ادامه، یک مدل عددی نیز با استفاده از نرم افزار عناصر محدود ABAQUS توسعه داده شد، که بتوان برای انجام مطالعات پارامتریک از آن بهره گرفت. نتایج مدل عددی ایجاد شده با نتایج آزمایشات انجام یافته مقایسه شده و تایید صحت شد. آنچه از نتایج مقاومت پسماند مقاطع حاصل شد این است که استفاده از پوشش‌های ضد حریق، مقاومت پسماند مقاطع را در دمای ۸۰۰ و ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد نسبت به نمونه بدون پوشش در همان دما حدود ۳۰ تا ۳۴ درصد افزایش داده است.

کلمات کلیدی: خواص مکانیکی فولاد، پوشش ضد حریق، مدل آزمایشگاهی، مقاومت پسماند، مدل عددی.

سابقه مقاله:		شناسه دیجیتال:			
دریافت	بازنگری	پذیرش	انتشار آنلاین	چاپ	doi:
۱۴۰۴/۰۵/۰۵	۱۴۰۴/۰۸/۱۰	۱۴۰۴/۱۰/۰۳	۱۴۰۴/۱۰/۰۳	۱۴۰۵/۰۵/۳۱	https://doi.org/10.22065/jsce.2025.532061.3765
*نویسنده مسئول:		شیرین اسماعیلی نیاری			
پست الکترونیکی:		sh_esmaeili@uma.ac.ir			

۱- مقدمه

از جمله معایب سازه‌های فولادی این است که در اثر آتش‌سوزی در مدت کوتاهی مقاومت خود را به سرعت از دست می‌دهند. براساس مطالعات صورت گرفته‌ای که در ذیل اشاره شده است، مقاومت و خواص مکانیکی فولاد در هنگام آتش‌سوزی به میزان زیادی کاهش می‌یابد که ممکن است آسیب‌های قابل توجهی برای سازه ایجاد کند. در شکل ۱ نمونه‌هایی از خرابی سازه‌های فولادی در اثر آتش‌سوزی نشان داده شده است [۱].



شکل ۱: فروپاشی سازه فولادی تحت آتش‌سوزی [۱].

مطالعه صفائیان [۲] که به رفتار ستون‌های فولادی با مقطع مربع توخالی^۱ تحت اثر دماهای ۴۰۰، ۵۰۰ و ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد با در نظر گرفتن پارامترهای تاثیرگذار از قبیل نسبت عرض به ضخامت، نسبت سختی قید محوری، نسبت بار و لاغری پرداخته شده، نشان داد که به ازای نسبت عرض به ضخامت یکسان، تا دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد کاهش مقاومت نهایی به ۵۵٪ می‌رسد. مطالعه هوانگ و همکاران^۲ [۳] که بررسی تجربی روی خصوصیات مکانیکی فولاد Q345 مقطع لوله‌ای تا دمای ۶۰۰ درجه بود، نشان داد که در دمای ۶۰۰ درجه، مقاومت تسلیم به ۴۷٪ مقدار اولیه خود در دمای محیط می‌رسد. ماهندران و کساوان^۳ [۴] مطالعه تجربی روی خصوصیات مکانیکی مقاطع فولادی سرد نورد به شکل قوطی مربعی^۴ و مستطیلی توخالی^۵ با فولاد Q350 و Q450 پس از آتش‌سوزی انجام دادند. نتایج نشان داد که مقدار کاهش مدول الاستیسیته و مقاومت تسلیم و مقاومت نهایی در حالت بعد از آتش بیش‌تر از حالت در معرض آتش است. مطالعه حیدرپور و همکاران [۵] که بررسی تجربی اثر خزش کرنشی روی خصوصیات مکانیکی فولاد پرمقاومت با گرید Q1200 و مقطع دایره‌ای تو خالی^۶ بود، نشان داد که در دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد مقاومت نهایی مقطع ۲۳٪ کاهش دارد. ماهندران و همکاران^۷ [۶] که بررسی تجربی روی خصوصیات مکانیکی فولاد سرد نورد با گرید Q350 مقاطع مربعی و مستطیلی توخالی تا دمای ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد را انجام دادند. یانگ و لی^۸ [۷] بررسی تجربی روی خصوصیات مکانیکی پسماند مقاطع مربعی و مستطیلی توخالی با مقاومت تسلیمی از ۶۹۰ تا ۹۶۰ مگاپاسکال تا دمای ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد را انجام دادند که نتایج حاصله نشان داد، در دمای ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد مدول الاستیسیته کاهش ۹۰٪ و مقاومت نهایی و مقاومت تسلیم با کاهش کمتر از ۶۰٪ روبرو است. سینگ و همکاران^۹ [۸] بررسی تجربی روی خصوصیات مکانیکی فولاد سردنورد YST-310 با مقاطع مربعی و مستطیلی توخالی تا دمای ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد انجام دادند که نتایج نشان داد در دمای ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد مقاومت تسلیم ۵۹٪ کاهش و مقاومت نهایی ۷۵٪ کاهش و شکل‌پذیری ۴۵٪ کاهش دارد. مطالعه یوانگ و کای^{۱۰} [۹] بررسی تجربی روی خصوصیات مکانیکی ورق فولادی با پوشش گالوانیزه روی براساس گرید فولادهای ۴۵۰، ۵۰۰، ۵۵۰ تحت کوره الکتریکی و کوره

¹ BOX

² Huang et al.

³ Mahendran and Kesawan

⁴ SHS (Square Hot-rolled Steel)

⁵ RHS (Rectangular Hot-rolled Steel)

⁶ CHS (circle Hot-rolled Steel)

⁷ Mahendran et al.

⁸ Young and Li

⁹ Singh, K.D and Singh, T.G

¹⁰ Young and Cai

گازمایع تا دمای ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد بود که تفاوت جزئی در بین نتایج خصوصیات مکانیکی مقاطع قرار داده شده در کوره الکتریکی و کوره گاز مایع مشاهده شد. سانگ و همکاران^۱ [۱۰]، نیز بررسی تجربی روی خصوصیات مکانیکی پس از آتش فولاد Q460 و Q690 بعد از خنک سازی با فوم آتش‌نشانی انجام دادند که نتایج بیانگر این شد که حالت خنک سازی با فوم در مقایسه با خنک‌سازی با هوا و آب، کاهش تنش تسلیم و مقاومت نهایی و مدول الاستیسیته کمتری را نشان می‌دهد.

بنابراین طبق مطالعات بیان شده، ارزیابی دقیق میزان آسیب و ظرفیت تحمل بار باقیمانده (مقاومت پسماند) سازه‌ها پس از قرار گرفتن در معرض آتش بسیار مهم است تا اطمینان حاصل شود که پس از آتش‌سوزی امکان تقویت و مقاوم‌سازی سازه فراهم خواهد شد. در مطالعاتی نیز به بررسی ظرفیت پسماند مقاطع بعد از قرارگیری در معرض دماهای بالا پرداخته شده است. در مطالعه رودریگس و همکاران^۲ [۱۱-۱۲] که مطالعه آزمایشگاهی روی رفتار پس از آتش سوزی مقاطع فولادی سردنورد شده بود، ستون‌های فولادی سرد نورد با مقطع ناودانی لبه‌دار (C) و بدون لبه (U) و مقاطع مرکب (2C) I، با در نظر گرفتن پارامترهای تأثیرگذار از قبیل سختی سازه اطراف، شرایط تکیه‌گاه انتهایی و نسبت بار اولیه اعمال شده بر روی ستون‌ها مورد بررسی قرار گرفتند. مطالعه یوانگ و کای [۱۳] که مطالعه تجربی روی رفتار مقاطع فولادی سرد نورد ضد زنگ اتصال یافته با اتصالات پیچی برشی تا دمای ۹۵۰ درجه سانتی‌گراد بود، نشان داد که میزان کاهش مقاومت برای نمونه‌های اتصال یافته با یک پیچ برشی بیش از دو پیچ برشی است. مطالعه صابری و همکاران [۱۴] که بررسی تأثیر تعداد، جنس و چیدمان پیچ‌ها بر عملکرد اتصالات صلب پیچی تحت آتش بود، نشان داد که استفاده از مصالح با تنش تسلیم و گیسختگی پایین‌تر منجر به جاری شدن اتصال در دمای پایین‌تر شده و تاب آوری آن را در برابر آتش کاهش می‌دهد. در مطالعه دیگری، صابری و همکاران [۱۵] پارامترهای هندسی اتصال T شکل تحت بارگذاری آتش را مورد ارزیابی قرار دادند. در این مطالعه با افزایش طول اتصال در اتصالات تیر به ستون مقادیر تنش بیشتری مشاهده شد. تعداد پیچ‌ها در کاهش جابجایی و شکل‌پذیری در اتصالات و افزایش ظرفیت جذب انرژی و میزان سختی و مقاومت در دماهای بالاتر مؤثر است. نوروزی‌نژاد و همکاران [۱۶] به بررسی تأثیر آتش بر رفتار اتصالات پیچی تیر به ستون با صفحه انتهایی و سپری اتصال با تغییر پارامترهای تعداد پیچ و افزایش ضخامت صفحات انتهایی پرداختند. گرمی و میرزایی [۱۷] رفتار قاب‌های خمشی فولادی محافظت‌شده با ارتفاع کم، متوسط و بلند را تحت بارگذاری پس از زلزله از طریق دو روش مختلف بررسی کردند. در روش اول، از تحلیل پوش‌آور برای شبیه‌سازی پاسخ سازه‌های نمونه برای جابجایی‌های هدف مختلف استفاده شد. سپس، تحلیل حرارتی-مکانیکی برای ارزیابی رفتار قاب‌های آسیب‌دیده تحت بارگذاری مجدد انجام شد. لیانگ و همکاران^۳ [۱۸] مطالعه عددی شبیه‌سازی رفتار غیرخطی ستون‌های کوتاه با مقطع مربعی و مستطیلی توخالی تا دمای ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد تحت کماتش موضعی پیش‌رونده با تغییر بار ستون و مقاومت بتن و نسبت عرض به ضخامت انجام دادند که نتایج نشان داد هر چه نسبت عرض به ضخامت بیشتر باشد و دما بالاتر باشد، کاهش بیشتری در مقاومت ستون پس از آتش‌سوزی وجود دارد. حسینلو و همکاران [۱۹] مطالعه پارامتریک رفتار چرخه‌ای دیوار برشی بتنی پس از آتش را انجام دادند. در این مطالعه تأثیر پارامتر تغییر ضخامت دیوار برشی و نوع سنگدانه و تغییر زمان حرارت‌دهی بررسی شد. نتایج گویای این است که با افزایش مدت زمان حرارت‌دهی تنش فون‌میسز و کرنش تسلیم و کرنش نهایی افزایش یافته و خصوصیات مکانیکی میلگرد فولادی کاهش می‌یابد. وانگ و همکاران^۴ [۲۰] با مطالعه تجربی و عددی به بررسی رفتار مقاطع ستون فولادی سرد نورد ساخته شده با مقطع C و U تحت دماهای بالا پرداختند. پارامترهای مؤثر در تحلیل مقاطع از قبیل نسبت بار و قیود محوری و دورانی روی رفتار مقاومت ستون‌ها مورد بررسی قرار گرفت. هی و همکاران^۵ [۲۱] بررسی آزمایشگاهی روی رفتار مقاطع فولادی سردنورد Q235 با مقطع C شکل پس از قرارگیری در معرض دماهای بالا انجام دادند و به این نتیجه رسیدند که حالت خنک‌سازی با آب نسبت به حالت خنک‌سازی در دمای محیط، باعث کاهش مقاومت نهایی بیشتری می‌شود. شی و همکاران^۶ [۲۲] نیز به مطالعه عددی رفتار مقاطع فولادی I شکل با در نظر گرفتن پارامترهای شکل مقطع، نسبت بار محوری، لاغری، تنش پسماند و روش افزایش دما پرداختند. شجاعی [۲۳] مطالعه پارامتریک روی

¹ Song et al.

² Rodrigues et al.

³ Liang et al.

⁴ Wang et al.

⁵ He et al.

⁶ Shi et al.

ستون فولادی با مقاطع قوطی توخالی و I شکل با پارامترهای موثر دما، طول ستون و نوع مقطع انجام داد و تأثیر تغییرات دما در تغییر مکان جانبی، مقاومت و کرنش نهایی ستون‌ها و میزان اتلاف انرژی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که افزایش دما و افزایش طول ستون باعث کاهش مقاومت نهایی می‌شود. ژائو و همکاران^۱ [۲۴] مطالعه تجربی و عددی بر روی رفتار پس از آتش‌سوزی مقاطع فولادی مستطیل شکل توخالی با مقاومت بالا، تحت فشار محوری انجام دادند. نتایج مطالعات نشان داد در مقاطع غیر لاغر کماتش موضعی پس از رسیدن به تنش تسلیم مواد رخ می‌دهد. هم‌چنین براساس مطالعات اوزاکی و یه^۲ [۲۵]، مطالعه ژائو و همکاران [۲۶-۲۷] و مطالعه فانگ و چان^۳ [۲۸] استفاده از روابط آئین‌نامه یوروکد [۲۹] نسبت به آئین‌نامه AISC [۳۰]، که پیش‌بینی دقیق‌تری برای مقاومت سازه در دماهای بالا ارائه می‌دهد جهت مدل‌سازی رفتار ساختمان‌های فولادی تحت دماهای بالا پیشنهاد می‌شود.

در کنار بکارگیری سیستم‌های اعلام و اطفاء حریق در ساختمان، یکی از راهکارهای افزایش ایمنی ساختمان‌ها در برابر آتش استفاده از پوشش‌های ضد حریق در اعضای سازه‌ای است. بر این اساس طراحان باید جهت حفظ ایمنی سازه و حفظ جان ساکنین آن برحسب نوع کاربری سازه، تعداد و مساحت طبقات، ضوابط ایمنی از قبیل اجرای پوشش‌های ضدحریق، نصب لوازم اطفاء حریق، به کارگیری کپسول‌های آتش‌نشانی و راه‌های خروج از بنا را مطابق ضوابط آئین‌نامه‌ای موجود در مبحث ۳ مقررات ملی ساختمان در نظر داشته باشند تا از گسترش آتش به فضاهای مجاور جلوگیری به عمل آید [۳۱].

مطابق دستورالعمل (ISO 6892-1:2019(E) [۳۲] و BS 476 [۳۳]، فولاد بدون پوشش ضدحریق در مدت کمتر از ۱۰ دقیقه به دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد می‌رسد که می‌تواند مقاومت خود را از دست دهد. به همین علت باید با عایق کردن اعضای فولادی با پوشش‌های ضدحریق، در برابر آتش محافظت گردند تا از فروپاشی سازه در اثر افزایش دما جلوگیری شده و زمان کافی برای نجات جان انسان فراهم شود. چنانچه سطح فولادی با پوشش ضدحریق پوشانده شود پوشش به عنوان لایه محافظی عمل کرده و در طی آتش به صورت انبساطی سوخته و مانع از رسیدن فولاد به دماهای خیلی بالا خواهد بود. میزان مقاومت سازه‌ها و میزان ضخامت مواد پوششی استفاده شده جهت ایمنی سازه در برابر آتش باید طبق استانداردهای ASTM E 119 [۳۴]، UL 263 [۳۵]، EN BS 476 [۳۶]، آئین‌نامه IBC-2015 [۳۷] یا استاندارد آتش‌نشانی ایران و مبحث ۳ مقررات ملی ساختمان باشد که براساس عواملی از قبیل هدایت حرارتی، میزان ظرفیت حرارتی، میزان واکنش‌های شیمیایی ناشی از گرما، میزان واکنش‌های فیزیکی ناشی از گرما و انجماد تعیین می‌گردد. هم‌چنین عواملی از قبیل دوام طولانی مدت (اثرات هوازدگی)، اثرات محتوای رطوبت، خواص حرارتی در دماهای بالا، نرخ گرمایش، آسیب مواد با افزایش دما و عملکرد تغییر شکل، محتوای ترکیب و انتشار دی اکسید کربن در طول ساخت پوشش‌ها یا زمانی که در معرض دمای بالا قرار می‌گیرند، موضوعات بسیار مهمی هستند که در انتخاب مواد عایق بسته به کاربرد آن‌ها همیشه باید در نظر گرفته شوند. با این حال، خواص حرارتی از قبیل گرمای ویژه و هدایت حرارتی از مهم‌ترین پارامترها هست، زیرا نتایج اکثر مدل‌های تحلیلی و عددی به شدت به آن‌ها بستگی دارد [۳۸]. پوشش‌های ضدحریق شامل مصالح بنایی، پوشش پایه معدنی گچی و سیمانی و پوشش غیر معدنی بردها و پنل‌های ضدحریق و رنگ‌های منبسط شونده است. این پوشش‌ها قبل از مرحله سفت‌کاری سازه‌های فولادی بر روی اعضای فولادی به صورت پاششی اجرا می‌شوند. به طور کلی از موارد کاربرد پوشش‌های ضدحریق می‌توان به استفاده از آن‌ها در پوشش ستون‌ها، تیرها و تیرچه‌های داخلی؛ پوشش عرشه‌ها، دیوارها، سقف‌ها و کف‌ها اشاره کرد.

مطالعاتی نیز به منظور بهبود عملکرد مقاطع با استفاده از پوشش ضد حریق انجام شده است که در ادامه به برخی از آن‌ها اشاره شده است. براساس مطالعات انجام یافته توسط آناند و همکاران^۴ [۳۸] که به بررسی رفتار پس از آتش مقاطع فولادی مربع، مستطیل و دایره توخالی با پوشش ضد حریق پرلیت سیمانی با در نظر گرفتن اثر آتش، مدت زمان و نوع سرمایش، مدت زمان قرار گرفتن در معرض دما پرداختند، نتایج نشان داد نمونه‌های پوشش داده شده نسبت به نمونه‌های بدون پوشش، مقاومت پسماند بهتری بعد از قرار گرفتن در معرض

¹ Zhao et al.

² Ozaky and Ye

³ Fang and CHan

⁴ Anand et al.

آتش داشتند. لایم و همکاران^۱ [۳۹] به مطالعه عددی رفتار ستون‌های فولادی با مقاطع قوطی شکل توخالی^۲ با پوشش ضد حریق گچی، با در نظر گرفتن پارامترهای موثر از قبیل ضخامت، نوع پوشش، لاغری ستون و نسبت بار پرداختند. نتایج نشان داد با استفاده از پوشش ضد حریق گچی، مقاومت ستون تا ۲۵٪ افزایش داشته است. کی ران و همکاران^۳ [۴۰] به بررسی تأثیر چهار نوع پوشش ضد حریق بر روی خواص فیزیکی و مکانیکی پسماند مقطع فولادی سرد نورد شده با مقطع C پس از قرارگیری در معرض آتش پرداختند. نتایج نشان داد نمونه بدون پوشش ۲۰ درصد کاهش مقاومت بیشتری نسبت به نمونه با پوشش ورمیکولیت و پرلیت دارد.

از آنجایی که مطالعات انجام یافته در مورد چگونگی تأثیر پوشش‌های ضد حریق متشکل از مواد معدنی پایه گچی و سیمانی مورد تأیید مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن و آتش‌نشانی، در مقاومت پسماند نمونه‌های ستون بعد از قرارگیری در معرض دماهای بالا محدود است، نظر به ضرورت استفاده از پوشش‌های ضد حریق در ساختمان‌های فولادی برای افزایش مقاومت پسماند ساختمان، در این مطالعه سعی بر این است با انجام مطالعات آزمایشگاهی و عددی به بررسی چگونگی تأثیر پوشش‌های ضد حریق مورد تأیید مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن و آتش‌نشانی در مقاومت پسماند نمونه‌های ستون فولادی کوتاه پرداخته شود.

۲- روش پژوهش

در این مقاله با استفاده از انجام مطالعات آزمایشگاهی و عددی، مقاومت پسماند ستون‌های فولادی توخالی با پوشش‌های ضد حریق پس از قرارگیری در معرض دماهای بالا و سردشدگی، مورد ارزیابی قرار گرفته است. برای انجام مطالعه عددی از نرم‌افزار عناصر محدود ABAQUS [۴۱] استفاده شده است. با استفاده از نتایج مطالعات، تأثیر پوشش‌های ضد حریق در بهبود مقاومت پسماند مقاطع فولادی بعد از آتش مورد بحث و بررسی قرار گرفته است.

۲-۱- مطالعه آزمایشگاهی

نمونه‌ها از مقاطع فولادی قوطی شکل توخالی^۴ از نوع ST37 ساخته شدند. به دلیل محدودیت ابعاد کوره (۱۸۰×۱۸۰×۶۰۰) میلیمتر و با در نظر گرفتن ضخامت پوشش ضد حریق، نمونه آزمایشگاهی با ابعاد مقطع (۸۰×۸۰×۲) میلیمتر انتخاب شد. همچنین به دلیل محدودیت در دستگاه آزمایش فشاری موجود در آزمایشگاه، طول مقطع ۳۰۰ میلیمتر در نظر گرفته شد. مراحل انجام آزمایش بر روی نمونه‌های ستون فولادی با پوشش‌های ضد حریق به صورت زیر می‌باشد:

۱. مرحله گرمایش (گرمایش در کوره الکتریکی، دمای کوره به اندازه دلخواه رسیده و به مدت ۶۰ دقیقه نمونه در این دما نگه داشته می‌شود).

۲. مرحله سرمایش (نمونه‌ها از کوره بیرون آورده می‌شود و در هوای محیط سرد می‌شوند).

۳. انجام آزمایش مقاومت فشاری (بعد از سرمایش، نمونه‌ها تحت بار محوری فشاری قرار گرفته و مقاومت پسماند نمونه‌ها بدست می‌آید).

۴. انجام آزمایش کشش بر روی نمونه‌های استاندارد (آزمایش کشش برای تعیین خواص مکانیکی فولاد در دمای محیط و بعد از قرارگیری در معرض دماهای بالا انجام می‌شود).

مکانیزم عملکرد پوشش‌های ضد حریق، ایجاد تأخیر در مدت زمانی است که طول می‌کشد تا فولاد به دمای بحرانی خود برسد. به دلیل محدودیت هزینه و تعداد نمونه‌های آزمایشگاهی، در این پژوهش از دو نوع پوشش ضد حریق معدنی بر پایه ملات سیمانی و پوشش ضد حریق معدنی بر پایه ملات گچی، طبق استاندارد مورد تأیید مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی ساخت شرکت کلینیک ساختمانی ایران

¹ Laím et al.

² SHS (Square Hot-rolled Steel)

³ Kiran et al.

⁴ BOX

استفاده شد. پوشش ضد حریق پایه سیمانی مورد استفاده در این پژوهش با نام تجاری Firecement با چسباننده سیمان است. پوشش ضد حریق پایه گچی مورد استفاده در این پژوهش با نام تجاری Firetard با چسباننده گچ است. این پوشش‌ها از مواد معدنی مثل ورمیکولیت - پرلیت - الیاف شیشه و سنگدانه‌های منبسط شونده و انواع الیاف گچ و مواد افزودنی تشکیل شده‌اند. برای اجرای پوشش ضد حریق، ابتدا سطح نمونه‌ها پاکسازی و تمیزکاری شده و بعد از انجام زیرسازی، پوشش ضد حریق با ضخامت ۲۵ میلی‌متر بر روی سطح نمونه‌ها اجرا شد. مواد پوشش ضد حریق به نسبت ۴ کیلوگرم مواد و ۳ کیلوگرم آب به مدت ۳ دقیقه مخلوط شده و سپس بر روی سطوح مورد نظر در دو مرحله تا رسیدن به ضخامت مورد نظر با دستگاه شاتکریت مخصوص، توسط مجری متخصص اجرای پوشش ضد حریق شرکت کلینیک ساختمانی ایران واقع در سعادت آباد تهران اجرا شدند. سپس نمونه‌ها به مدت ۷۲ ساعت در هوای آزاد قرار گرفتند تا پوشش ضد حریق اجرا شده خشک شود. نمونه مقاطع بدون پوشش و با پوشش ضد حریق سیمانی و گچی در شکل ۲ آورده شده است.



شکل ۲: (الف) نمونه بدون پوشش ضد حریق، (ب) نمونه با پوشش ضد حریق گچی و (ج) نمونه با پوشش ضد حریق سیمانی.

نمونه‌ها بعد از آماده‌سازی، به منظور قرارگیری در معرض دماهای بالا، در کوره الکتریکی آتبین (ATBIN) به ابعاد $180 \times 180 \times 600$ میلی‌متر که در شکل ۳ نشان داده شده، قرار داده شدند. به دلیل محدودیت کوره حرارتی در ثبت دما و زمان متناظر و عدم توانایی دستگاه در اعمال منحنی استاندارد آتش مثل $iso\ 834$ ، فقط دمای نهایی به حد مورد نظر (۴۰۰، ۶۰۰، ۸۰۰ و ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد) رسیده و نمونه یک ساعت در این دما ثابت نگهداشته شده است.



شکل ۳: نمای کلی کوره الکتریکی.

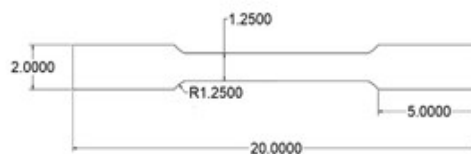
۱-۲-۱- آزمایش کشش

برای ارزیابی مشخصات مکانیکی مقاطع فولادی هم در دمای محیط و هم بعد از قرارگیری در معرض دماهای بالا از آزمایش کشش استاندارد استفاده شد. نمونه‌های کشش براساس استاندارد A370 [۴۲] مطابق ابعاد مشخص شده در شکل ۴-الف تهیه شده و سپس تحت آزمایش کشش با سرعت $15\ mm/min$ قرار گرفتند. به دلیل کمبود امکانات آزمایشگاهی و افزایش هزینه‌های ناشی از انجام آزمایش کشش

از هر نمونه مشخص (پوشش و دمای مشخص) یک نمونه با برش لیزری برش داده شده و تحت آزمایش تنش-کرنش قرار گرفت. نتایج حاصل از این آزمایش به صورت منحنی تنش-کرنش ارائه شد. دستگاه آزمایش کشش در شکل ۴-ب نشان داده شده است.



(ب)



(الف)

شکل ۴: (الف) ابعاد و نمونه تست کشش مقطع فولادی؛ (ب) دستگاه تست کشش به همراه نمونه در داخل دستگاه.

۲-۱-۲- آزمایش ظرفیت باربری محوری

برای ارزیابی مقاومت پسماند مقاطع بعد از قرارگیری در معرض دماهای بالا، نمونه‌ها بعد از قرارگیری در معرض دماهای بالا در کوره و سپس خنک شدن در دمای محیط، تحت آزمایش ظرفیت باربری با دستگاه tecnotest (که در شکل ۵ نشان داده شده است) قرار گرفتند تا مقاومت فشاری پسماند آن‌ها بدست آید.



شکل ۵: دستگاه ظرفیت باربری.

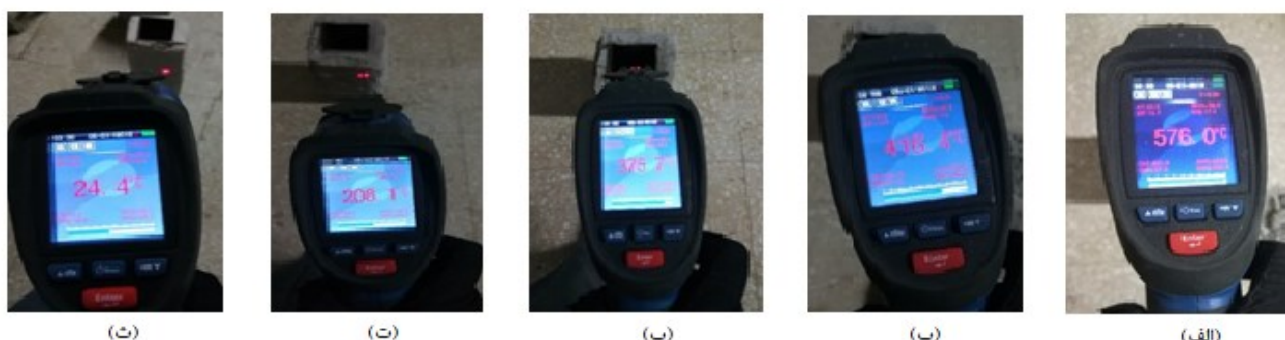
۲-۲- بررسی مشاهدات و نتایج آزمایشگاهی

در نمونه‌های با پوشش ضدحریق سیمانی، بعد از قرارگیری نمونه در معرض دماهای ۴۰۰، ۶۰۰، ۸۰۰ و ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد، پوشش سیمانی دچار ترک شد اما در نمونه‌های با پوشش ضد حریق گچی بعد از دمای ۸۰۰ درجه و ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد، پوشش گچی دچار ترک شد (در شکل ۶ ترک‌ها نشان داده شده است).



شکل ۶: الف) نمونه با پوشش ضد حریق گچی قبل از حرارت ۱۰۰۰ درجه سانتی گراد، ب) نمونه با پوشش ضد حریق گچی بعد از حرارت ۱۰۰۰ درجه سانتی گراد، پ) نمونه با پوشش سیمانی قبل از حرارت ۱۰۰۰ درجه سانتی گراد، ت) نمونه با پوشش سیمانی بعد از دمای ۱۰۰۰ درجه سانتی گراد.

دمای سطح داخلی و خارجی نمونه‌ها بعد از بیرون آوردن از کوره در مدت‌های ۱۵ دقیقه و ۳۰ دقیقه و ۶۰ دقیقه با ترمومتر اندازه‌گیری شد که نمونه‌های بدون پوشش هیچ تفاوت دمایی بین سطح داخل و خارج نشان داد ولی نمونه‌های پوشش داده شده با پوشش ضد حریق به طور میانگین نشان دهنده تفاوت دمایی ۱۰۰ درجه‌ای بود. نمونه‌های پوشش داده شده بعد از گذشت مدت یک ساعت و نمونه‌های بدون پوشش بعد از گذشت مدت سی دقیقه به دمای محیط رسیدند که در شکل ۷ نشان داده شده است. همچنین طبق جدول ۱ نیز اختلاف دمای داخل و خارج مقاطع پوشش داده شده با سیمان بیش از گچی است.



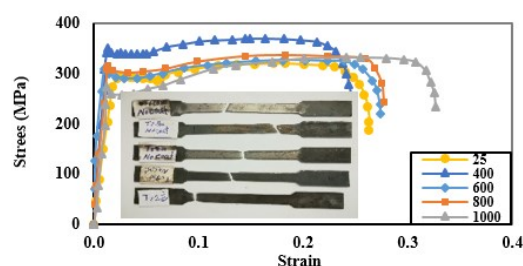
شکل ۷: تغییر دما برای نمونه پوشش ضد حریق سیمانی بعد از دمای ۶۰۰ درجه سانتی گراد الف) دمای داخل مقطع در مدت ۱۵ دقیقه، ب) دمای خارج مقطع در مدت ۱۵ دقیقه، پ) دمای داخل مقطع در مدت ۳۰ دقیقه، ت) دمای خارج مقطع در مدت ۳۰ دقیقه و ث) دمای خارج مقطع در مدت ۶۰ دقیقه.

۲-۲-۱- بررسی نتایج آزمایش کشش

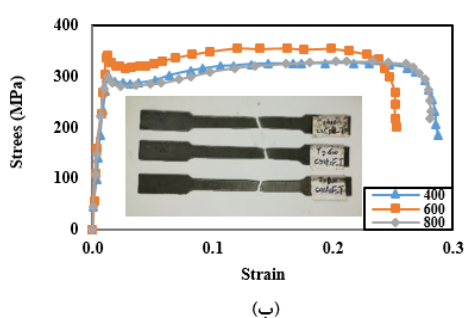
نتایج آزمایش کشش نمونه‌ها پس از قرار گیری در معرض دماهای ۴۰۰، ۶۰۰، ۸۰۰ و ۱۰۰۰ درجه سانتی گراد، به صورت منحنی‌های تنش-کرنش، مقاومت تسلیم، مقاومت نهایی و مدول الاستیسیته استخراج شده است. نمودار تنش-کرنش نمونه‌های کششی با پوشش ضد حریق و بدون پوشش ضد حریق، در دمای محیط و پس از قرار گیری در معرض دماهای ۴۰۰، ۶۰۰، ۸۰۰ و ۱۰۰۰ درجه سانتی گراد، در شکل‌های ۸ و ۹ نشان داده شده است.

جدول ۱: اختلاف دمای سطح داخل و خارج مقاطع در زمان‌های ۱۵، ۳۰ و ۶۰ دقیقه پس از خارج شدن از کوره

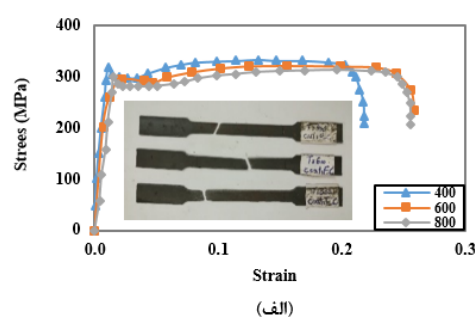
نوع پوشش	اختلاف دمای بعد از مدت ۱۵ دقیقه		اختلاف دمای بعد از مدت ۳۰ دقیقه		اختلاف دمای بعد از مدت ۶۰ دقیقه	
	داخل و خارج مقطع	داخل و خارج مقطع	داخل و خارج مقطع	داخل و خارج مقطع	داخل و خارج مقطع	داخل و خارج مقطع
	دمای داخل (°C)	دمای خارج (°C)	دمای داخل (°C)	دمای خارج (°C)	دمای داخل (°C)	دمای خارج (°C)
نمونه بدون پوشش بعد از ۱۰۰۰ درجه	۶۲۷	۶۲۷	۰	۲۴	۰	۲۴
نمونه با پوشش گچی بعد از ۶۰۰ درجه	۵۸۰	۴۴۶	۱۳۴	۳۷۵	۲۴	۲۴
نمونه با پوشش سیمانی بعد از ۶۰۰ درجه	۵۷۶	۴۱۶	۱۶۰	۱۵۹	۲۳/۲	۲۳/۲



شکل ۸: نمودار تنش-کرنش مقاطع فولادی بدون پوشش بعد از دماهای بالا.

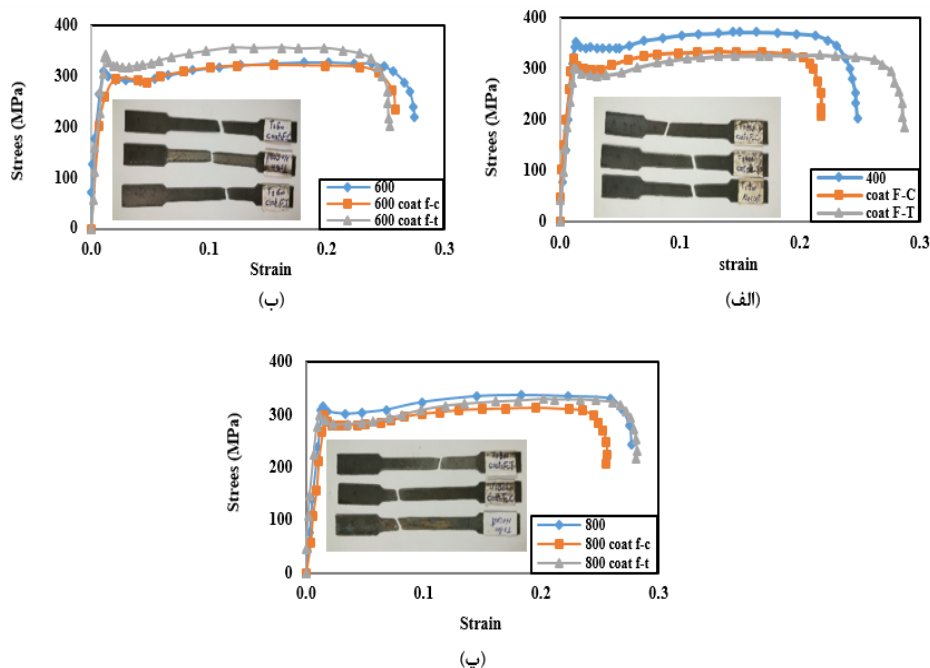


(ب)



(الف)

شکل ۹: نمودار تنش-کرنش مقاطع فولادی بعد از دمای ۴۰۰، ۶۰۰ و ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد (الف) مقطع با پوشش سیمانی (coat F-C) و (ب) مقطع با پوشش گچی (coat F-T).

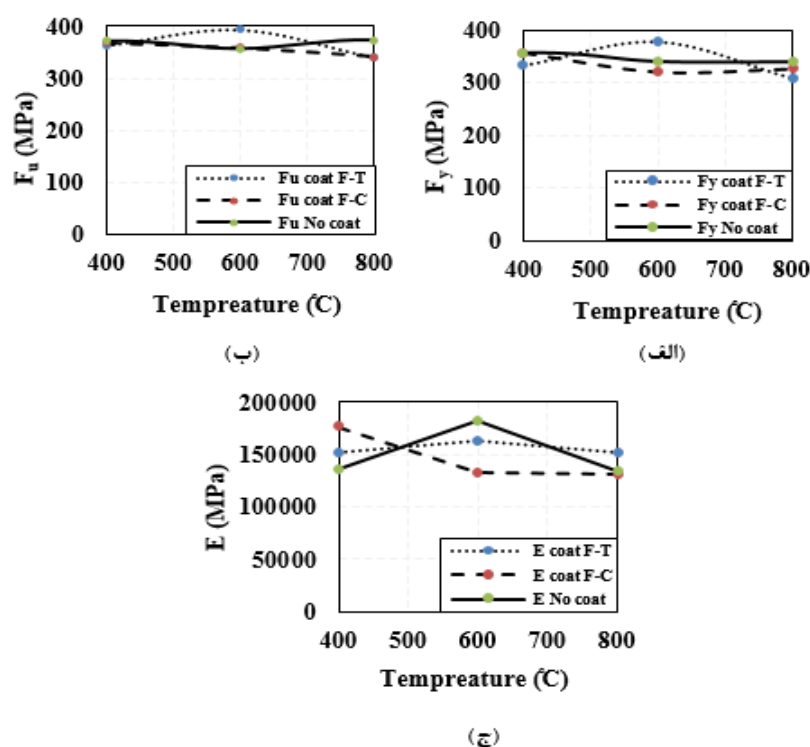


شکل ۱۰: مقایسه نمودار تنش-کرنش فولاد بدون پوشش و با پوشش گچی و با پوشش سیمانی (الف) بعد از دمای ۴۰۰ درجه سانتی گراد، (ب) بعد از دمای ۶۰۰ درجه سانتی گراد، (پ) بعد از دمای ۸۰۰ درجه سانتی گراد.

مشخصات مکانیکی از قبیل مقاومت تسلیم، مقاومت نهایی و مدول الاستیسیته برای نمونه‌های فولادی بدون پوشش و با پوشش ضد حریق در دمای محیط و پس از قرارگیری در معرض دماهای بالا در جدول ۲ آورده شده است. همچنین نمودار مشخصات مکانیکی-دما در شکل ۱۱ آورده شده است.

جدول ۲: جدول مشخصات مکانیکی مقاطع

نوع پوشش	F_y (MPa)	F_u (MPa)	E (MPa)	T (°C)
نمونه بدون پوشش	۳۱۹	۳۴۵	۱۲۲۴۴۴	۲۵
	۳۵۷/۶	۳۷۲	۱۳۶۱۳۳	۴۰۰
	۳۴۰	۳۵۷	۱۸۲۳۹۷	۶۰۰
	۳۳۹	۳۷۴	۱۳۴۰۷۲	۸۰۰
	۲۸۰	۳۳۵	۱۱۶۷۳۹	۱۰۰۰
نمونه با پوشش گچی	۳۳۴	۳۶۳	۱۵۱۱۹۱	۴۰۰
	۳۷۹	۳۹۴	۱۶۲۶۷۶	۶۰۰
	۳۱۰	۳۳۹	۱۵۲۲۱۷	۸۰۰
نمونه با پوشش سیمانی	۳۵۷/۵	۳۶۹	۱۷۶۵۵۵	۴۰۰
	۳۲۱	۳۵۹	۱۳۲۸۶۶	۶۰۰
	۳۲۷	۳۴۱	۱۱۴۹۸۶	۸۰۰



شکل ۱۱: نمودار مشخصات مکانیکی مقاطع بدون پوشش (No coat)، با پوشش گچی (coat F-T) و پوشش سیمانی (coat F-C) پس از قرارگیری در معرض دماهای بالا، الف) مقاومت تسلیم-دما، ب) مقاومت نهایی-دما و پ) مدول الاستیسیته-دما.

مقاطع بدون پوشش با افزایش دما تا ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد دارای افزایش مقاومت تسلیم بود. مقاطع با پوشش سیمانی پس از قرارگیری در دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد، کاهش ۱۰ درصدی و پس از قرارگیری در دمای ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد کاهش ۸ درصدی در مقاومت تسلیم را نشان داد و در مقایسه با مقاطع بدون پوشش پس از دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد کاهش ۵ درصدی و پس از دمای ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد کاهش ۳ درصدی در مقاومت تسلیم داشته است. مقاطع با پوشش گچی پس از قرارگیری در معرض دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد کاهش ۱۳ درصدی و پس از قرارگیری در دمای ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد کاهش ۷ درصدی در مقاومت تسلیم را نشان داد و نسبت به مقاطع بدون پوشش پس از دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد با کاهش ۱۱ درصدی و پس از دمای ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد با کاهش ۸ درصدی روبرو شد.

مقاطع بدون پوشش پس از قرارگیری در معرض دماهای بالا تا ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد، با افزایش مقاومت نهایی و پس از دمای ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد با کاهش ۳ درصدی در مقاومت نهایی روبرو است. مقاومت نهایی مقاطع با پوشش سیمانی پس از دمای ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد ۸ درصد کاهش نشان داد و نسبت به مقاطع بدون پوشش پس از دمای ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد با افزایش ۸ درصدی مقاومت نهایی روبرو است. مقاومت نهایی مقاطع با پوشش گچی پس از دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد ۹ درصد افزایش و پس از دمای ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد ۷ درصد کاهش در مقاومت نهایی نشان داد و در مقایسه با مقاطع بدون پوشش پس از دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد، افزایش مقاومت ۳ درصدی و پس از دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد افزایش مقاومت ۱۱ درصدی و پس از دمای ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد افزایش مقاومت ۱۰ درصدی را نشان داد.

مقاطع بدون پوشش پس از قرارگیری در معرض دماهای بالای ۴۰۰، ۶۰۰، ۸۰۰ و ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد، به ترتیب ۱۲ درصد افزایش، ۴۹ درصد افزایش، ۱۰ درصد افزایش و ۵ درصد کاهش مدول الاستیسیته را نشان داد. در مقاطع با پوشش سیمانی پس از دماهای ۶۰۰ و ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد، کاهش ۲۵ درصدی در مدول الاستیسیته نشان داده شد و در مقایسه با نمونه بدون پوشش پس از دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد، ۳۰ درصد افزایش و پس از دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد، ۲۸ درصد کاهش و پس از دمای ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد، ۵ درصد

کاهش مدول الاستیسته مشاهده شد. در مقاطع با پوشش گچی بعد از دمای ۶۰۰ و ۸۰۰ درجه سانتی گراد افزایش ۸ درصدی در مدول الاستیسته نسبت به نمونه در دمای محیط مشاهده گردید و نسبت به مقاطع بدون پوشش پس از قرارگیری در معرض دماهای بالای ۴۰۰ ، ۶۰۰ و ۸۰۰ درجه سانتی گراد، به ترتیب ۲۳ درصد افزایش، ۲۰ درصد افزایش و در دمای ۸۰۰ درجه سانتی گراد ۱۷ درصد کاهش ثبت شد.

از نتایج نمودار شکل ۱۱ می توان به این نتیجه رسید که مقاطع فولادی بدون پوشش پس از قرارگیری در معرض دماهای بالا و سپس خنک شدگی، تا دمای مشخص (دمای بحرانی فولاد) مقاومت خوبی از خود نشان داده اند. از آنجا که برای بهبود خواص مکانیکی و فیزیکی ورق فولادی st37 از فرایندهای سخت کاری و عملیات حرارتی تا دمای بحرانی فولاد (تقریباً ۷۰۰ درجه) استفاده شده، سپس فولاد به دمای محیط برمی گردد، بنابراین مقاطع ساخته شده با ورق فولادی، پس از قرارگیری در معرض دماهای بالا و سپس خنک شدگی، برخلاف انتظار با افزایش مشخصات مکانیکی همراه خواهند بود. نتایج مطالعات [۴۳] و [۲۲] و [۲۷] و [۱۰] و [۴۴] نیز موید این مطلب است.

با توجه به اینکه در این مقاله نیز مشخصات مکانیکی پسماند نمونه های فولادی پس از قرارگیری در معرض دماهای بالا و سپس خنک شدگی نمونه های فولادی ارزیابی شده و بررسی مشخصات مکانیکی در حین حرارت در دماهای بالا در این پژوهش مورد نظر نبوده است، بنابراین تا دمای مشخصی (تقریباً دمای بحرانی فولاد)، نتایج آزمایش نه تنها با کاهش بلکه با افزایش همراه خواهد بود.

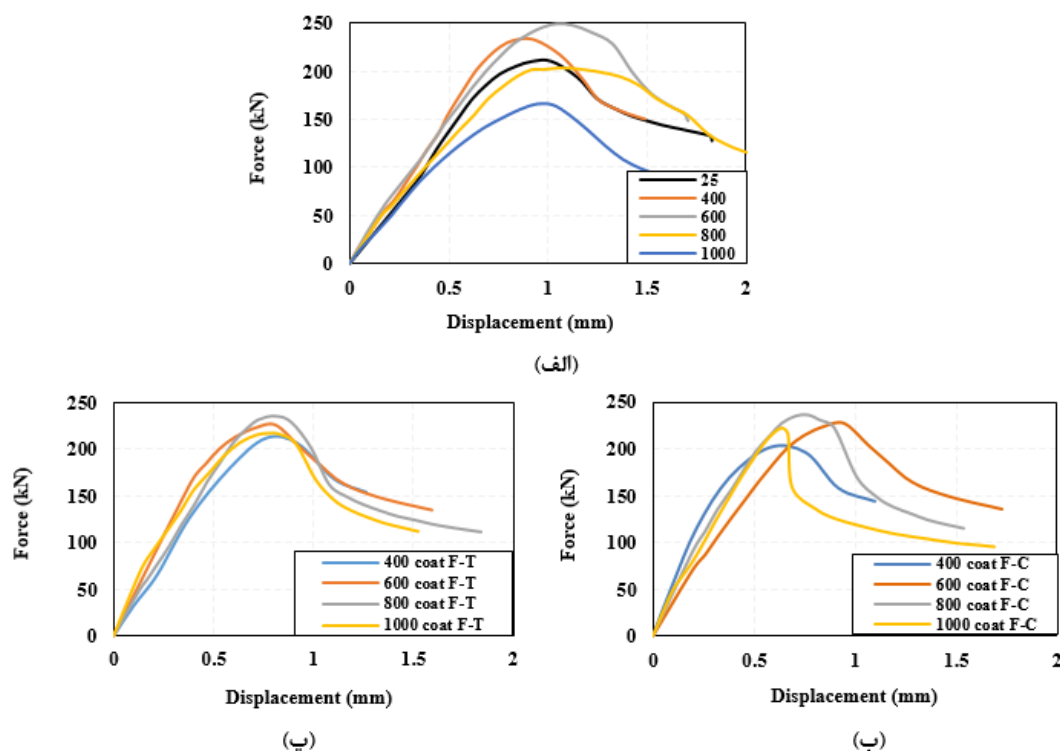
۲-۲-۲- بررسی مشاهدات و نتایج آزمایش ظرفیت باربری نمونه ها

تغییر شکل و کمانش ستون ها حاصل از انجام آزمایشات ظرفیت باربری در شکل ۱۲ نشان داده شده است.

دما (°C)	۲۵ درجه	۴۰۰ درجه	۶۰۰ درجه	۸۰۰ درجه	۱۰۰۰ درجه
مقاطع بدون پوشش ضد حریق					
مقاطع با پوشش ضد حریق سیمانی	-----				
مقاطع با پوشش ضد حریق گچی	-----				

شکل ۱۲: تغییر شکل مقاطع بدون پوشش و با پوشش سیمانی و گچی تحت بارگذاری محوری پس از قرارگیری در معرض دماهای بالا.

نمودارهای نیرو-تغییر مکان محوری مقاطع تحت بارگذاری محوری پس از قرارگیری در معرض دماهای بالا، در شکل ۱۳ و مقاومت پسماند نمونه‌های آزمایشگاهی در جدول ۳، آورده شده است. آنچه از نتایج نمودارهای شکل ۱۳ حاصل شد این است که مقاطع فولادی بدون پوشش تا دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد مقاومت پسماند خوبی از خود نشان داده‌اند. براساس نتایج جدول ۳، نمونه‌های آزمایشگاهی بدون پوشش پس از قرارگیری در معرض دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد، ۱۰ درصد افزایش مقاومت و پس از قرارگیری در معرض دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد، ۸ درصد افزایش مقاومت نسبت به افزایش دما داشته‌اند. از دمای ۸۰۰ تا ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد کاهش مقاومت در مقاطع بدون پوشش دیده شده است که این کاهش مقاومت بعد از دمای ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد ۱۸ درصد و بعد از دمای ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد ۱۹ درصد نسبت به افزایش دما می‌باشد. نمونه‌های پوشش داده شده با سیمان بعد از دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد ۱۱ درصد افزایش مقاومت و بعد از دمای ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد ۶ درصد افزایش مقاومت و بعد از دمای ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد ۶ درصد کاهش مقاومت نسبت به افزایش دما نشان داده است. همچنین برای نمونه‌های گچی نیز بعد از دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد ۷ درصد افزایش مقاومت، بعد از دمای ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد ۴ درصد افزایش مقاومت و بعد از دمای ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد ۸ درصد کاهش مقاومت نسبت به افزایش دما ثبت شده است.



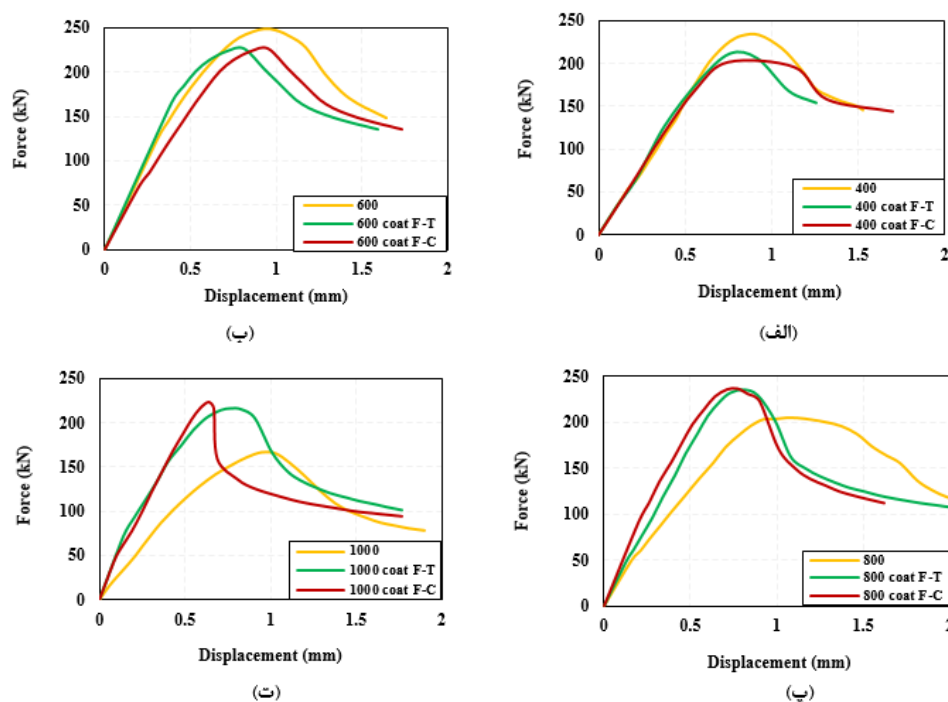
شکل ۱۳: الف) نمودار نیرو-تغییر مکان نمونه بدون پوشش بعد از دماهای بالا، ب) نمودار نیرو-تغییر مکان نمونه‌های با پوشش سیمانی (coat F_C.c-cement) بعد از دماهای بالا و پ) نمودار نیرو-تغییر مکان نمونه‌های با پوشش گچی (coat F-T.t-tard) بعد از دماهای بالا.

جدول ۳: مقاومت پسماند مقاطع بعد از دماهای بالا

نمونه‌ها	دما (°C)	ظرفیت باربری (kN)
نمونه بدون پوشش	۲۵	۲۱۱
	۴۰۰	۲۳۳
	۶۰۰	۲۴۹
	۸۰۰	۲۰۴
	۱۰۰۰	۱۶۶
نمونه با پوشش سیمانی	۴۰۰	۲۰۲
	۶۰۰	۲۲۳
	۸۰۰	۲۳۶
	۱۰۰۰	۲۲۳
نمونه با پوشش گچی	۴۰۰	۲۱۲
	۶۰۰	۲۲۶
	۸۰۰	۲۳۵
	۱۰۰۰	۲۱۷

براساس نتایج جدول ۳، مقاطع بدون پوشش بعد از قرارگیری در معرض دماهای ۴۰۰، ۶۰۰، ۸۰۰ و ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد نسبت به نمونه در دمای محیط به ترتیب ۱۱ درصد افزایش مقاومت، ۱۸ درصد افزایش مقاومت، ۳ درصد کاهش مقاومت و ۲۱ درصد کاهش مقاومت نشان داده است. مقاطع پوشش داده شده با سیمان بعد از قرارگیری در معرض دماهای ۴۰۰، ۶۰۰، ۸۰۰ و ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد نسبت به نمونه در دمای محیط، به ترتیب ۴ درصد کاهش مقاومت، ۶ درصد کاهش مقاومت، ۱۲ درصد افزایش مقاومت و ۶ درصد افزایش مقاومت نشان داده است. مقاطع پوشش داده شده با گچ نیز بعد از قرارگیری در معرض دماهای بالا نسبت به نمونه در دمای محیط، به ترتیب بعد از دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد تغییر مقاومت چندانی نداشته، بعد از ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد ۷ درصد افزایش مقاومت، بعد از ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد ۱۲ درصد افزایش مقاومت و بعد از ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد ۳ درصد افزایش مقاومت نشان داده است. همچنین براساس نتایج جدول ۳ در مقایسه بین پوشش‌های به کار رفته، مقاومت مقطع با پوشش گچی نسبت به مقطع با پوشش سیمانی بعد از دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد، ۵ درصد افزایش و بعد از دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد ۲ درصد افزایش و بعد از دمای ۸۰۰ و ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد مقاومت مقطع تا ۳ درصد کاهش دارد.

همچنین نتایج نمودارهای شکل ۱۴ و جدول ۳ نشان داد که تا زمانی که نمونه‌ها دماهای پایین‌تر از ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد را تجربه می‌کنند، وجود پوشش تأثیر زیادی در افزایش مقاومت پسماند نمونه‌ها ندارد ولی از دمای ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد به بالا، مقاطع فولادی پوشش داده شده با پوشش سیمانی و گچی نسبت به مقطع فولادی بدون پوشش افزایش مقاومت نشان داده است، به طوری که بعد از دمای ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد مقاطع پوشش داده شده با سیمان ۱۶ درصد افزایش مقاومت و بعد از قرارگیری در معرض دمای ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد، ۳۴ درصد افزایش مقاومت نسبت به مقطع بدون پوشش در همان دما نشان داده است. همچنین مقاطع پوشش داده شده با گچ بعد از دمای ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد افزایش مقاومت ۱۵ درصدی و بعد از دمای ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد افزایش مقاومت ۳۰ درصدی نسبت به نمونه بدون پوشش در همان دما نشان داده است. پس از قرارگیری در معرض دماهای پایین‌تر یا مساوی ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد، نمونه‌های پوشش داده شده با گچ افزایش مقاومت بیشتری نسبت به نمونه‌های با پوشش سیمانی نشان داده است ولی بعد از دمای ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد و ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد، نمونه با پوشش ضدحریق سیمانی مقاومت بهتری نسبت به نمونه با پوشش ضد حریق گچی نشان داده است.



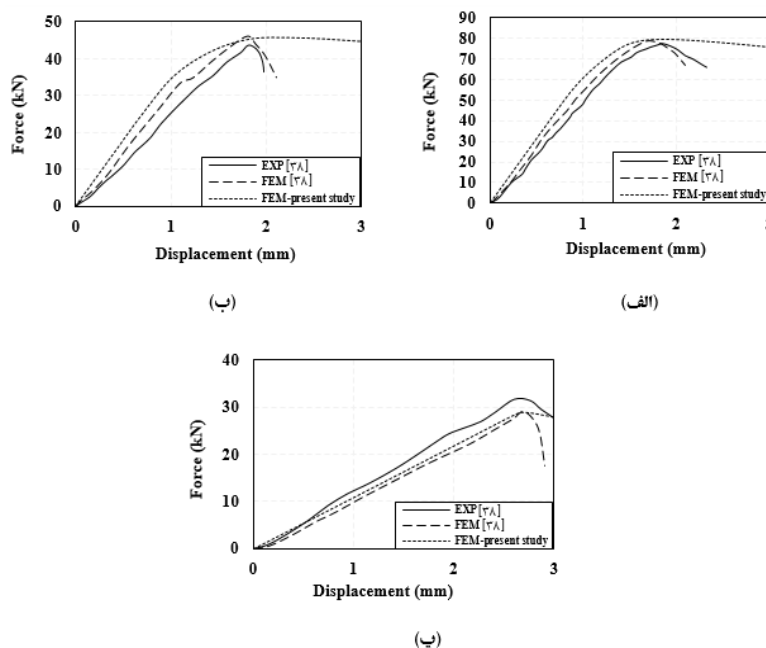
شکل ۱۴: نمودار نیرو-تغییر مکان برای سه نوع مقطع (بدون پوشش، با پوشش سیمانی (coat F-C) و پوشش گچی (coat F-T)) پس از قرارگیری در معرض دماهای بالا (الف) دمای ۴۰۰ درجه سانتی گراد، (ب) دمای ۶۰۰ درجه سانتی گراد، (پ) دمای ۸۰۰ درجه سانتی گراد و (ت) دمای ۱۰۰۰ درجه سانتی گراد.

۲-۳- مدل سازی عددی نمونه آزمایشگاهی

هزینه زیاد مطالعات تجربی و همچنین محدودیت در تعداد پارامترهای مورد مطالعه در هر آزمایش، محققین را به استفاده از روش های عددی سوق می دهد. اخیرا استفاده از روش اجزا محدود به عنوان یکی از روش های مهم عددی گسترش یافته است. در پژوهش حاضر برای مدل سازی اجزا محدود نمونه های ستون فولادی کوتاه، از نرم افزار ABAQUS استفاده شد.

۲-۳-۱- صحت سنجی مدل عددی

برای رسیدن به مدل نهایی و بررسی صحت مدلسازی عددی، نتایج مطالعه [۳۸] که در مورد بهبود عملکرد مقاطع فولادی با پوشش پرلیت سیمانی بعد از آتش است، با نتایج عددی صحت سنجی شده است. در شکل ۱۵، مقایسه نتایج مدل عددی با مدل آزمایشگاهی نشان داده شده است که نشان دهنده تطابق خوب مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی است.



شکل ۱۵: نمودار نیرو-تغییر مکان (الف) نمونه بدون پوشش در دمای محیط، (ب) نمونه بدون پوشش پس از قرارگیری در معرض دمای ۹۲۵ درجه سانتی گراد، (پ) نمونه بدون پوشش پس از قرارگیری در معرض دمای ۱۰۲۹ درجه سانتی گراد

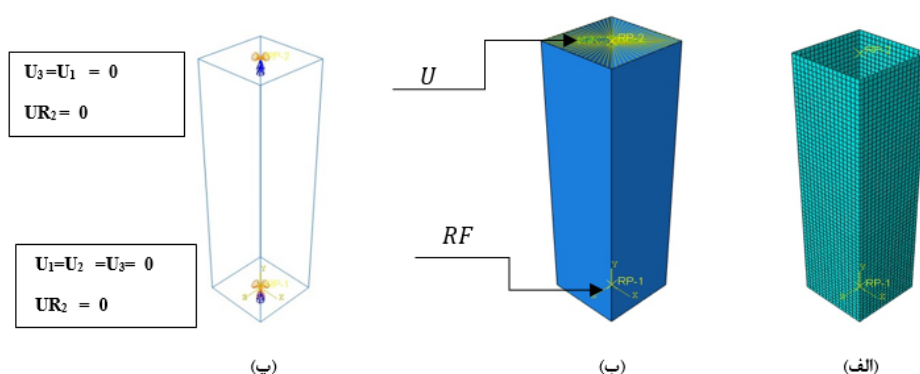
در ادامه، نمونه‌های آزمایش شده در این پژوهش به صورت عددی نیز مورد بررسی قرار گرفته و نتایج بدست آمده با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است. در این مدل‌سازی عددی مشخصات مکانیکی مقطع فولادی از قبیل چگالی $\frac{kg}{m^3}$ ۷۸۵۰ و ضریب پواسون ν ۰/۳، مدول الاستیسیته (E)، تنش تسلیم (F_y) و تنش نهایی (F_u) طبق نتایج بدست آمده از آزمایش کشش و مطابق با جدول ۱ در نظر گرفته شد. مقادیر تنش-کرنش مهندسی با استفاده از روابط (۱-۲-۳) [۳۰] به تنش-کرنش واقعی تبدیل شده و به نرم‌افزار وارد گردید. در این روابط ϵ_e کرنش مهندسی یا اسمی، σ_e تنش مهندسی یا اسمی (بدست آمده از نتایج آزمایش) و σ_{true} تنش واقعی، ϵ_{true} کرنش واقعی و $\epsilon_{plastic}$ کرنش پلاستیک می‌باشند.

$$\sigma_{true} = \sigma_e (1 + \epsilon_e) \quad (1)$$

$$\epsilon_{true} = \ln(1 + \epsilon_e) \quad (2)$$

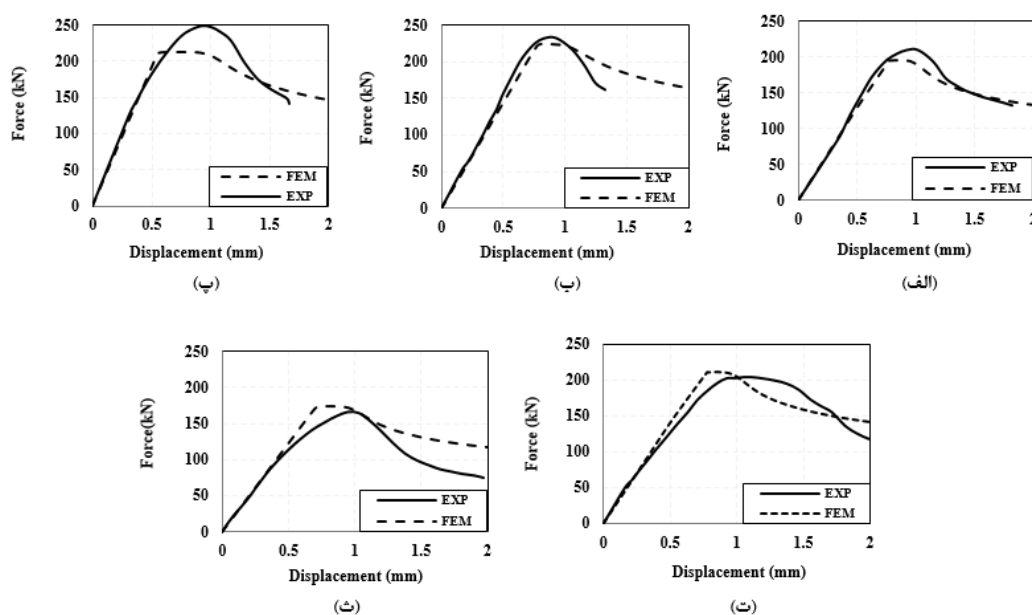
$$\epsilon_{plastic} = \epsilon_{true} - \epsilon_{elastic} \quad (3)$$

از المان پوسته‌ای S4R برای مش‌بندی مدل استفاده شد. ابعاد مش بهینه طبق مرجع [۳۸]، ۵ میلی‌متر ($L/6000$) انتخاب شد. در مدل‌های عددی ایجاد شده نیز، با چند اندازه مش، تحلیل انجام شده و در نهایت همان مش ۵ میلی‌متر به صورت بهینه انتخاب شد. گره‌های بالا و پایین ستون با استفاده از قید Mpc به نقطه مرجع (مرکز هندسی سطح مقطع) بسته شدند. شرایط مرزی و قیدهای تغییرمکانی طبق شرایط آزمایشگاهی انتخاب شد به طوری که تغییر مکان در جهت محور Y (محور طولی ستون) آزاد و دوران حول محور X و دوران حول محور Z نیز آزاد انتخاب شدند. مدل عددی به همراه شرایط تکیه‌گاهی در شکل ۱۶ نشان داده شده است. برای انجام تحلیل‌های سازه‌ای تحت بارگذاری محوری هم در دمای اتاق و هم پس از قرارگیری در معرض دماهای ۴۰۰، ۶۰۰، ۸۰۰ و ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد از تحلیل General, Static با در نظر گرفتن اثرات غیرخطی هندسی و مصالح استفاده شد. بار به صورت کنترل تغییرمکانی به انتهای بالای نمونه اعمال شده است.

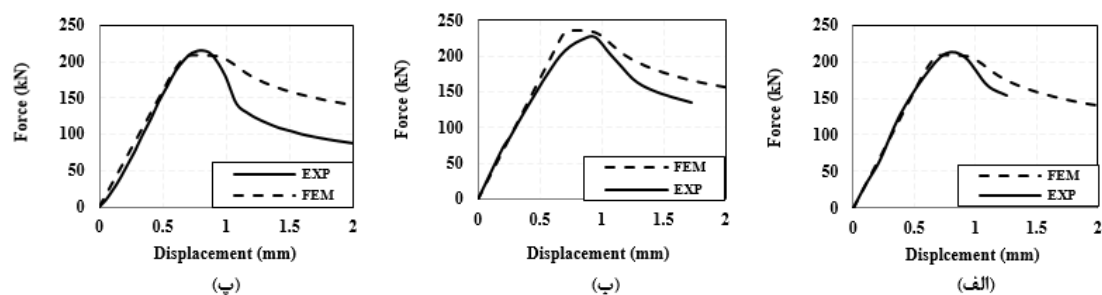


شکل ۱۶: الف) مش بندی مقطع فولادی، ب) ایجاد قید Mpc، پ) اعمال شرایط تغییر مکانی.

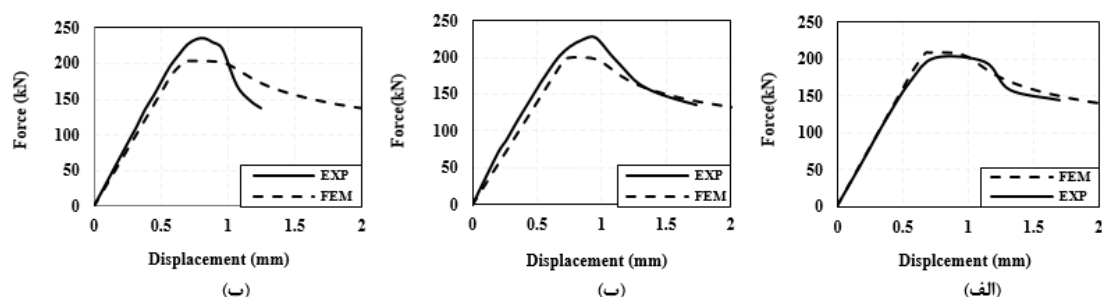
نمونه‌هایی که در قسمت قبلی با انجام آزمایشات، مورد بررسی قرار گرفته بودند و مقاومت پسماند و نمودارهای بار-تغییر مکان آنها بدست آمده بود، در این قسمت با استفاده از مدل‌سازی‌های عددی و انجام تحلیل‌های عددی مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج تحلیل‌های عددی با نتایج آزمایشگاهی صحت سنجی شده و در نمودارهای شکل ۱۷، ۱۸ و ۱۹ با هم مقایسه شده است که مطابقت خوب نتایج را نسبت به هم نشان داد. در جدول ۴ نیز میزان خطای مدل عددی با مدل آزمایشگاهی مقایسه شده است.



شکل ۱۷: نمودار بار-تغییر مکان مقاطع فولادی بدون پوشش تحت بارگذاری محوری پس از قرارگیری در معرض دماهای الف) دمای محیط (۲۵ درجه سانتی‌گراد)، ب) ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد، پ) ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد، ت) ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد و ث) ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد.



شکل ۱۸: نمودار نیرو-تغییر مکان مقاطع فولادی با پوشش گچی تحت بارگذاری محوری پس از قرارگیری در معرض دماهای الف) ۴۰۰ درجه سانتی گراد، ب) ۶۰۰ درجه سانتی گراد، پ) ۸۰۰ درجه سانتی گراد.



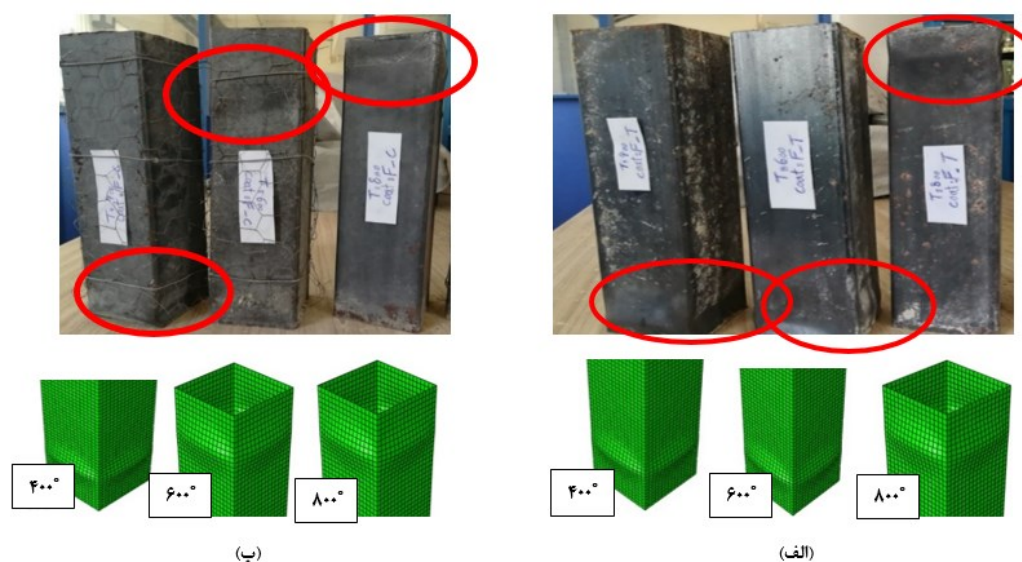
شکل ۱۹: نمودار نیرو-تغییر مکان مقاطع فولادی با پوشش سیمانی تحت بارگذاری محوری پس از قرارگیری در معرض دماهای الف) ۴۰۰ درجه سانتی گراد، ب) ۶۰۰ درجه سانتی گراد، پ) ۸۰۰ درجه سانتی گراد.

جدول ۴: درصد خطای مدل عددی با مدل آزمایشگاهی

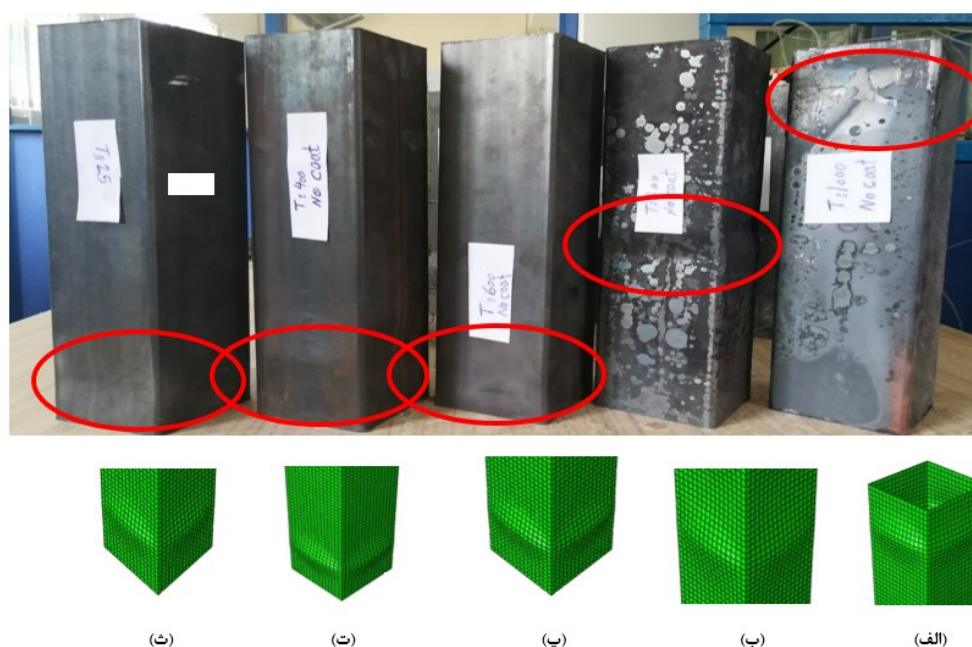
نمونه‌ها	دما (°C)	درصد خطای مدل عددی به مدل آزمایشگاهی (%)		ظرفیت باربری (kN)
		مدل آزمایشگاهی	مدل آزمایشگاهی	
نمونه بدون پوشش	۲۵	۷	۲۱۱	۱۹۶
	۴۰۰	۴	۲۳۳	۲۲۳
	۶۰۰	۱۴	۲۴۹	۲۱۳
	۸۰۰	۴	۲۰۴	۲۱۲
	۱۰۰۰	۵	۱۶۶	۱۷۴
نمونه با پوشش سیمانی	۴۰۰	۳	۲۰۲	۲۰۹
	۶۰۰	۱۰	۲۲۳	۲۰۱
	۸۰۰	۱۴	۲۳۶	۲۰۴
	۱۰۰۰	-	۲۲۳	-
نمونه با پوشش گچی	۴۰۰	۱۶	۲۱۲	۲۵۷
	۶۰۰	۴	۲۲۶	۲۳۶
	۸۰۰	۱۱	۲۳۵	۲۰۹
	۱۰۰۰	-	۲۱۷	-

۲-۲-۳-۲- مودهای خرابی

تغییر شکل نمونه‌های حاصل از نتایج مطالعه آزمایشگاهی با نتایج مطالعه عددی در شکل ۲۰ و ۲۱ مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد که مدل عددی با دقت خوبی توانسته است تغییر شکل‌های ایجاد شده در نمونه‌ها را شبیه‌سازی کند. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت، مدل عددی قابل اطمینان بوده و می‌توان از مدل‌های عددی برای انجام تحلیل‌های بیشتر و بررسی چگونگی تأثیر پارامترهای تأثیرگذار در مقاومت پسماند نمونه‌ها پس از قرارگیری در معرض دماهای بالا کمک گرفت.



شکل ۲۰: مقایسه تغییر شکل مقاطع پس از قرارگیری در معرض دماهای ۴۰۰، ۶۰۰ و ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد، (الف) با پوشش گچی و (ب) پوشش سیمانی.



شکل ۲۱: مقایسه تغییر شکل مقاطع فولادی بدون پوشش پس از قرارگیری در معرض دماهای (الف) ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد، (ب) ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد، (پ) ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد، (ت) ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد و (ث) ۲۵ درجه سانتی‌گراد.

۳- نتیجه گیری

با توجه به محدودیت‌های موجود در ساخت مدل‌ها و امکانات آزمایشگاهی از قبیل محدودیت ابعاد کوره حرارتی، محدودیت کوره در اعمال پروتکل بارگذاری حرارتی و ثبت پروفیل دما-زمان، محدودیت ابعاد نمونه برای آزمایش در دستگاه آزمایش فشاری موجود در آزمایشگاه، در محدوده مطالعات انجام شده در پژوهش حاضر، می‌توان به نتیجه‌گیری‌های زیر اشاره کرد:

- براساس نتایج آزمایش کشش، با توجه به عملیات حرارتی بر روی ورق‌های فولادی، تا دماهای حدود ۷۰۰ درجه سانتیگراد تغییر چندانی در خصوصیات مکانیکی نمونه‌ها مشاهده نشد. مقاومت تسلیم مقاطع با پوشش سیمانی بعد از دمای ۸۰۰ درجه سانتیگراد با کاهش ۸ درصدی و مقاطع با پوشش گچی بعد از دمای ۸۰۰ درجه سانتیگراد کاهش ۱۰ درصدی در مقاومت تسلیم نشان دادند. مقاطع بدون پوشش بعد از قرارگیری در معرض دمای ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد نسبت به نمونه مشابه در دمای محیط، با کاهش ۳ درصدی در مقاومت نهایی روبرو است و مقاومت نهایی مقاطع با پوشش گچی بعد از دمای ۸۰۰ درجه سانتیگراد با کاهش ۷ درصدی مقاومت نهایی روبرو است. مدول الاستیسیته نیز در مقاطع بدون پوشش بعد از دمای ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد با ۵ درصد کاهش روبرو است و در مقاطع با پوشش سیمانی بعد از دمای ۸۰۰ درجه سانتیگراد با ۲۵ درصد کاهش روبرو است.
- براساس نتایج آزمایش ظرفیت باربری، از دمای ۸۰۰ درجه سانتیگراد به بالا، مقاطع فولادی پوشش داده شده با پوشش سیمانی و گچی نسبت به مقطع فولادی بدون پوشش افزایش مقاومت پسماند نشان داده است. به طوری که بعد از دمای ۸۰۰ درجه سانتیگراد مقاطع پوشش داده شده با سیمان ۱۶ درصد افزایش مقاومت و بعد از دمای ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد ۳۴ درصد افزایش مقاومت نسبت به مقطع بدون پوشش در همان دما نشان داده است و نمونه مقاطع پوشش داده شده با گچ بعد از دمای ۸۰۰ درجه سانتیگراد افزایش مقاومت ۱۵ درصدی و بعد از دمای ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد افزایش مقاومت ۳۰ درصدی در همان دما نشان داده است.

پیشنهادهای برای مطالعات آتی

- ۱- بررسی پارامتریک مقاومت پسماند مقاطع با ابعاد و ضخامت و با پوشش‌های ضد حریق متفاوت
- ۲- انجام تحلیل‌های عددی انتقال حرارت برای بررسی چگونگی تاثیر انواع پوشش‌های ضد حریق در توزیع دما در مقطع

مراجع

- [1] Wu, M.J., Zhu, J., Azim, I. and Huang, X.H., (2022). Thermal buckling and vibration analysis of cold-formed steel sections. *Case Studies in Thermal Engineering*, (101910), page (32).
- [2] Safaian, Mehdi. June (2011). *Behavior of box columns under the effect of increasing temperature*. Faculty of Civil Engineering. Khajeh Nasiruddin Toosi University of Technology.
- [3] Yuan, G., Shu, Q., Huang, Z. and Li, Q., (2016). An experimental investigation of properties of Q345 steel pipe at elevated temperatures. *Journal of Constructional Steel Research*, (118), pages (41-48).
- [4] Kesawan, S. and Mahendran, M., (2018). Post-fire mechanical properties of cold-formed steel hollow sections. *Construction and Building Materials*, (161), pages (26-36).
- [5] Azhari, F., Heidarpour, A., Zhao, X.L. and Hutchinson, C.R., (2017). Effect of creep strain on mechanical behaviour of ultra-high strength (Grade 1200) steel subject to cooling phase of a fire. *Construction and Building Materials*, (136), pages (18-30).
- [6] Imran, M., Mahendran, M. and Keerthan, P., (2018). Mechanical properties of cold-formed steel tubular sections at elevated temperatures. *Journal of Constructional Steel Research*, (143), pages (131-147).

- [7] Li, H.T. and Young, B., (2018). Residual mechanical properties of high strength steels after exposure to fire. *Journal of Constructional Steel Research*, (148), pages (562-571).
- [8] Singh, T.G. and Singh, K.D., (2019). Post-fire mechanical properties of YSt-310 cold-formed steel tubular sections. *Journal of Constructional Steel Research*, (153), pages (654-666).
- [9] Cai, Y. and Young, B., (2019). Mechanical properties of thin sheet steel after exposure to high temperatures. *Thin-Walled Structures*, (142), pages (460-475).
- [10] Zhang, C., Wang, R. and Song, G., (2020). Post-fire mechanical properties of Q460 and Q690 high strength steels after fire-fighting foam cooling. *Thin-Walled Structures*, (106983), page (156).
- [11] Craveiro, H.D., Rodrigues, J.P.C. and Laím, L., (2014). Cold-formed steel columns made with open cross-sections subjected to fire. *Thin-Walled Structures*, (85), pages (1-14).
- [12] Craveiro, H.D., Rodrigues, J.P.C. and Laím, L., (2016). Experimental analysis of built-up closed cold-formed steel columns with restrained thermal elongation under fire conditions. *Thin-Walled Structures*, (107), pages (564-579).
- [13] Cai, Y. and Young, B., (2019). Structural behaviour of cold-formed stainless steel bolted connections at post-fire condition. *Journal of Constructional Steel Research*, (152), pages (312-321).
- [14] Saberi, H., Saberi, V., Javan, S. and Sadeghi, A. (2022). Evaluation the Effect of Number, Material and Configuration of Bolts on Rigid Bolted Connections under Fire. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 9(1), pages (130-152).
- [15] Saberi, H., Saberi, V., Khodamoradi, N. et al. (2022). Effect of detailing on performance of steel T-connection under fire loading. *Journal Build Rehabil*, (7), page (7).
- [16] Saberi, V., saberi, H., Panahkhah, S. P., Sadeghi, A. and Noroozinejad Farsangi, E. (2022). Investigation of the Effect of Fire Loading on the Behavior of Connections with Beam-to-Column Bolted End Plate and T-Connection. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 9(6), pages (108-129).
- [17] Pouria Mirzaei, P. and Gerami, M. (2020). Collapse assessment of protected steel moment frame under post-earthquake fire. *Scientia Iranica*, 27(6), pages (2775-2789).
- [18] Kamil, G.M., Liang, Q.Q. and Hadi, M.N., (2019). Nonlinear post-fire simulation of concentrically loaded rectangular thin-walled concrete-filled steel tubular short columns accounting for progressive local buckling. *Thin-Walled Structures*, (106423), page (145).
- [19] Rezaeian, A., Hosseini, F. and Bahadori Birgani, B. (2025). A parametric study of the cyclic behavior of concrete shear wall after fire. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 12(02), pages (24-46).
- [20] Yang, J., Shi, Y., Wang, W., Xu, L. and Al-azzani, H., (2020). Experimental and numerical studies on axially restrained cold-formed steel built-up box columns at elevated temperatures. *Journal of Constructional Steel Research*, (106143), page (171).
- [21] Ren, C., Dai, L., Huang, Y. and He, W., (2020). Experimental investigation of post-fire mechanical properties of Q235 cold-formed steel. *Thin-Walled Structures*, (106651), page (150).
- [22] Shi, Y., Tu, C., Wu, Y., Liu, D., Meng, L. and Ban, H., (2021). Numerical investigations of fire-resistant steel welded I-section columns under elevated temperatures. *Journal of Constructional Steel Research*, (106464), page (177).
- [23] Shojai, Peyman. (1400). *Investigation of the behavior of steel columns under fire loading*. Civil Engineering Department, Fakhr Razi Higher Education Institute – Saveh.
- [24] Zhong, Y., Su, A. and Zhao, O., (2023). Post-fire local buckling behaviour of cold-formed S700 high strength steel circular hollow sections under axial compression: Experiments, modelling and design. *Thin-Walled Structures*, (110511), page (184).
- [25] Ye, K. and Ozaki, F., (2021). Post-fire mechanical properties and buckling strength of cold-formed steel hollow section columns. *Journal of Constructional Steel Research*, (106806), page (184).
- [26] Zhong, Y., Zhao, O. and Gardner, L., (2022). Experimental and numerical investigation of S700 high strength steel CHS beam-columns after exposure to fire. *Thin-Walled Structures*, (109248), page (175).
- [27] Zhong, Y., Sun, Y., Tan, K.H. and Zhao, O., (2021). Post-fire behaviour and residual resistances of S700 high strength steel tubular section stub columns under combined loading. *Thin-Walled Structures*, (108275), page (169).
- [28] Fang, H. and Chan, T.M., (2022). Behaviour and design of cold-formed normal-and high-strength steel SHS and RHS columns at elevated temperatures. *Thin-Walled Structures*, (109947), page (180).
- [29] CEN, E. (2006). EN 1993-1-4: 2006, Eurocode 3 - Design of steel structures - Part 1-4: General rules - Supplementary rules for stainless steels (EUROPEAN STANDARD), (2006).
- [30] *Specification for Structural Steel Buildings*, July 7, (2016) AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION. a-360-16.
- [31] *Topics 3, Standards, Fires and fire prevention, Buildings., Road, Housing and Urban Development Research Center., National Building Regulations.*, (1395).
- [32] *ISO 6892-1:2019(en)*, International Organization for Standard, Metallic materials — Tensile testing — Part 1: Method of test at room temperature, (2019).

- [33] *British Standard 476 Fire Tests*, Fire tests on building materials and structures, (1983-2004).
- [34] *ASTM E119-24*, Standard Test Methods for Fire tests of Building construction and Materials, (2024).
- [35] *UL 263*, Standard for Fire Tests of Building Construction and Materials, March 14, (2022).
- [36] *CEN, E. (2005)*. EN 1993-1-2:2005, Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-2: General rules Structural fire design (EUROPEAN STANDARD), (2005).
- [37] *IBC (INTERNATIONAL Building Code)*, (2015).
- [38] Kiran, T., Anand, N., Mathews, M.E., Andrushia, A.D., Walls, R. and Kanagaraj, B., (2022). Post-fire behaviour and improving the performance of hot rolled open sections subjected to standard fire exposure. *Case Studies in Construction Materials*, (01021), page (16).
- [39] Laím, L., Santiago, A., Caetano, H., Craveiro, H.D. and Shahbazian, A., (2022). Numerical analysis and structural fire design of protected SHS steel columns with thermally enhanced gypsum-based mortars. *Journal of Building Engineering*, 104629, page (54).
- [40] Jaya Kumar, G., Kiran, T., Anand, N. and Al-Jabri, K., (2022). Influence of fire-resistant coating on the physical characteristics and residual mechanical properties of E350 steel section exposed to elevated temperature. *Journal of Structural Fire Engineering*.
- [41] *ABAQUSIns*. ABAQUS Theory User Manual, V 6.7. (2017).
- [42] Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products, (2003). A370 -07a.
- [43] Weiyong, W., Tianzi, L., Jiepeng, L., (2015). Experimental study on post-fire mechanical properties of high strength Q460 steel. *Journal of Constructional Steel Research*, (114), pages (100–109).
- [44] Shi, G., Wang, Sh., Chen, X., Rong, Ch., (2021). Post-fire mechanical properties of base metal and welds of Q235 steel. *Journal of Constructional Steel Research*. (106767). Page (183).