

## Numerical Study of Thermal Behaviour of Concrete Filled Steel Tube Columns protected with Intumescent Fire Coating

Ebrahim Khalilzade Vahidi<sup>1\*</sup>, Mosayeb Hasani Jalilian<sup>2</sup>

1- Assistant Professor, Faculty of Civil Engineering, Razi University of Kermanshah, Kermanshah, Iran

2- MSc of Structural Engineering, Department of Civil Engineering, Razi University of Kermanshah, Kermanshah, Iran

### ABSTRACT

The potential danger of fire is one of the important phenomena that may cause irreparable damages to the structure. Therefore, adding fire protection is essential for columns as the main components of a structure that require sufficient fire resistance for an increase in safety. In this study, the effect of expandable paint coating on the temperature distribution at the cross section and time of fire resistance of concrete-filled steel columns that are suitable for high seismic areas and tall buildings has been studied. For this purpose, in the first step the finite element model of a steel column filled with concrete under ISO 834 standard fire was prepared and analyzed according to available laboratory data. After validation of the results from the finite element model in comparison with the laboratory data, various specimens of columns that were protected with intumescent fire coating and with circular, rectangular, square and oval sections, designed according to the Iranian Steel Code and have been modeled and analyzed by Abacus finite element software. The results show that the expandable paint coating increases the fire resistance of concrete-filled steel columns with circular, square, rectangular and oval cross sections by 2.2, 3.3, 4.14 and 3.36 respectively. Equality has been afforded to those without protective cover.

### ARTICLE INFO

**Receive Date:** 04 December 2019

**Revise Date:** 03 May 2020

**Accept Date:** 17 May 2020

### Keywords:

Concrete filled steel tube

Fire

Fire Resistance

Fire Protection

Intumescent fire coating

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2020.210427.2011>

\*Corresponding author: Ebrahim Khalilzadehvahidi

Email address: e\_vahidi2000@yahoo.com

## مطالعه‌ی عددی رفتار حرارتی ستون‌های فولادی پر شده با بتن به همراه پوشش

### حرارتی منبسط شونده IFC

ابراهیم خلیل زاده وحیدی<sup>۱\*</sup>، مصیب حسنی جلیلیان<sup>۲</sup>

۱- استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران

۲- کارشناس ارشد مهندسی سازه، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران

#### چکیده

خطر بالقوه آتش‌سوزی یکی از پدیده‌های مهمی است که ممکن است باعث خسارت جبران ناپذیر به سازه شود. بنابراین، برای ستون‌ها به عنوان اجزای باربر اصلی یک سازه که برای افزایش ایمنی نیاز به مقاومت کافی در برابر آتش دارند، اضافه کردن پوشش محافظ آتش امری ضروری است. در این پژوهش تأثیر پوشش رنگ منبسط شونده روی توزیع دما در مقطع و زمان مقاومت در برابر آتش ستون‌های فولادی پر شده با بتن که مناسب مناطق با لرزه خیزی بالا و ساختمان‌های بلند هستند، مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور ابتدا مدل اجزای محدود یک ستون فولادی پر شده با بتن تحت اثر آتش استاندارد ایزو ۸۳۴، طبق داده‌های آزمایشگاهی موجود، تهیه و تحلیل شده است. پس از صحت سنجی نتایج بدست آمده از مدل اجزای محدود در مقایسه با داده‌های آزمایشگاهی، نمونه‌های مختلفی از ستون‌های محافظت شده توسط پوشش حرارتی منبسط شونده، دارای مقاطع دایره، مستطیل، مربع و بیضی، بر اساس آیین‌نامه‌ی فولاد ایران طراحی و توسط نرم افزار اجزای محدود آباکوس مدل سازی و تحلیل شده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد پوشش رنگ منبسط شونده باعث افزایش مدت زمان تاب آوری در برابر آتش ستون‌های فولادی پر شده با بتن با سطح مقطع دایره، مربع، مستطیل و بیضی به ترتیب به میزان، ۲/۲، ۳/۳، ۴/۱۴ و ۳/۳۶ برابری نسبت به نمونه‌های مذکور بدون پوشش محافظتی شده است.

کلمات کلیدی: ستون فولادی بتن پر، آتش سوزی، مقاومت آتش سوزی، حفاظت در مقابل آتش، رنگ منبسط شونده.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	<a href="https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2020.210427.2011">https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2020.210427.2011</a>	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2020.210427.2011	۱۴۰۰/۰۶/۳۱	۱۳۹۹/۰۲/۲۸	۱۳۹۹/۰۲/۲۸	۱۳۹۹/۰۲/۱۴	۱۳۹۸/۰۹/۱۳
			ابراهیم خلیل زاده وحیدی		*نویسنده مسئول:	
			e_vahidi2000@yahoo.com		پست الکترونیکی:	

## ۱- مقدمه

در سالهای اخیر تأمین ایمنی سازه‌ها در برابر آتش سوزی، اهمیت بیشتری پیدا کرده است. اجزای سازه‌ای باید مطابق آیین نامه‌ها یا استانداردهایی همچون GB50016-2014، NFPA5000 و ... [۱ و ۲]، برای رسیدن به مقاومت کافی در برابر آتش سوزی، طراحی شوند. در این آیین نامه‌ها، حداقل تاب آوری در برابر آتش برای ساختمان‌های بلندمرتبه بیش‌تر از ۱۲۰ دقیقه می‌باشد. برای برآوردن چنین الزاماتی، معمولاً استفاده از پوشش محافظ آتش امری ضروری است، مخصوصاً برای سازه‌های فولادی بدون پوشش حفاظتی که مقاومت محدودی در برابر آتش دارند [۳ و ۴]. پوشش مقاوم در برابر آتش، شامل نوع غیرواکنشی (دوغاب سیمان، پوشش بتن و...) و نوع واکنشی (پوشش رنگ منبسط شونده IFC)، برای محافظت از سازه‌های مرکب فولادی-بتنی و سازه‌های فولادی مورد استفاده قرار می‌گیرد و می‌توانند یک لایه عایق مقاوم در برابر آتش ایجاد کنند. مصالح پوشش مقاوم غیرواکنشی در برابر آتش دارای خواص فیزیکی و حرارتی نسبتاً ثابتی هستند و در هنگام حرارت دهی واکنش شیمیایی رخ نمی‌دهد. به هر حال، پوشش مقاوم غیر واکنشی در برابر آتش دارای معایبی همچون ضخامت زیاد، وزن سنگین، دوام کم و نگهداری دشوار می‌باشد. در عمل، پوشش مقاوم غیر واکنشی در برابر آتش برای حفاظت اعضای سازه‌ای فولادی استفاده می‌شود. خواص آن برای طراحی و محاسبه نسبتاً پایدار است، زیرا عموماً از مواد ساده و با افزودنی کم ساخته می‌شوند. در هنگام گرم شدن هیچ واکنش شیمیایی رخ نمی‌دهد و ضخامت آن در هنگام قرار گرفتن در معرض آتش ثابت می‌ماند. علاوه بر این، چگالی و خواص حرارتی، همچون ظرفیت گرمایی ویژه و رسانش حرارتی می‌تواند برای هر دمایی تعیین شود. یکی از انواع پوشش‌های واکنشی مقاوم در برابر آتش رنگ منبسط شونده (IFC) می‌باشد. پوشش مقاوم در برابر آتش IFC متشکل از: رزین، کاتالیزور خنک کننده، کربن فعال کننده، پرکننده‌ها و افزودنی‌ها می‌باشد. IFC دارای مزایایی همچون وزن سبک، عملکرد خوب، زیبایی ظاهری و نگهداری راحت است. هنگام گرم شدن IFC واکنش شیمیایی اتفاق می‌افتد و مقدار زیادی از گرما توسط دود و کف تولید شده در واکنش شیمیایی جذب می‌شود. در همین حال پوشش IFC در اثر واکنش شیمیایی افزایش حجم داده و یک لایه فوم ضخیم ایجاد می‌شود که رسانش حرارتی بسیار کمی دارد. خواص فیزیکی و شیمیایی مصالح IFC در معرض آتش بسیار پیچیده است. طبق آیین نامه ASFP [۵]، در عمل تعیین ضخامت IFC برای سازه‌های فولادی معمولاً به سه پارامتر مقاومت مورد نیاز در برابر آتش، ضریب مقطع عضو سازه‌ای و محدودیت ظرفیت دمای فولاد بستگی دارد. IFC معمولاً برای حفاظت سازه‌های فولادی با نرخ مقاومت آتش کمتر از ۹۰ دقیقه [۶] استفاده می‌شود که می‌توانند حفاظت از آتش را تا ۱۲۰-۱۵۰ دقیقه، فراهم کند. عملکرد پوشش IFC بسیار پیچیده و به طور قابل ملاحظه‌ای تحت تاثیر ترکیبات، شرایط آتش و نرخ حرارت قرار می‌گیرد [۷]. در ده‌های اخیر تحقیقات آزمایشگاهی و عددی فراوانی در زمینه بررسی رفتار حرارتی سازه‌های فولادی و همچنین خواص حرارتی IFC در سازه‌های فولادی انجام شده است. گیلت<sup>۲</sup> و همکاران [۸] و همچنین ژانگ<sup>۳</sup> و همکاران [۹]، مدل‌های ریاضی تک بعدی برای مصالح IFC با در نظر گرفتن مقادیر دقیق انتقال حرارت و افت وزنی پوشش در معرض آتش ارائه کردند. سیرپسی<sup>۴</sup> و همکاران [۱۰]، یک روش تحلیلی را ارائه کردند که می‌تواند انبساط پوشش IFC با ضخامت‌های مختلف تحت شرایط دمایی و آتش‌سوزی متفاوت را محاسبه کند و برای صحت سنجی مدل پیشنهادی، به پیش‌بینی دمای فولاد محافظت شده با IFC تحت شرایط مختلف پرداخته است [۱۱]. وقتی پوشش IFC برای ستون‌های فولادی پر شده با بتن (CFST<sup>۵</sup>) استفاده می‌شود، گرادیان دمایی پوشش به طور قابل ملاحظه‌ای می‌تواند متفاوت باشد. به هر حال، انبساط پوشش IFC روی سطح جدار فولادی می‌تواند با پوششی که روی صفحه فولادی است، متفاوت باشد. اگرچه تحقیقات بالا بحرانی‌ترین حالت عملکرد IFC تحت اثر آتش را بررسی کرده‌اند، با این حال عملکرد IFC برای ستون CFST نمی‌تواند به طور مستقیم با استفاده از نتایج تحقیقات بالا پیش‌بینی شود. به علاوه، فرمولاسیون مواد IFC تولید شده توسط تولید کنندگان مختلف، متفاوت است و عملکرد این ماده به طور قابل ملاحظه‌ای تحت تاثیر جزئیات فرمولاسیون قرار دارد [۱۲]. ستون‌های CFST ظرفیت باربری و تاب آوری در برابر آتش بسیار خوبی دارند، زیرا هسته بتنی می‌تواند به ظرفیت باربری و جذب حرارت کمک کند [۱۳ و ۱۴]. تاب آوری در برابر آتش ستون‌های CFST می‌تواند با استفاده از آرماتور در هسته بتنی [۱۵] و فولاد

<sup>1</sup> Intumescent fire coating

<sup>2</sup> Gillet

<sup>3</sup> Zhang

<sup>4</sup> Cirpici

<sup>5</sup> Concrete filled steel tube

مقاوم در برابر آتش یا فولاد ضد زنگ افزایش یابد [۱۶]. به علاوه، آزمایش‌های حرارتی و مدل‌های اجزاء محدود صحت‌سنجی شده، روش‌های ساده پیشنهاد شده توسط آیین نامه EC4 [۱۷] و مطالعات آلبرو<sup>۶</sup> و همکاران [۱۸]، برای پیش بینی مقاومت آتش ستون‌های CFST محافظت نشده در دسترس قرار دارند.

به هر حال هنوز هم محافظت در برابر آتش برای اطمینان از ایمنی ستون‌های CFST در معرض آتش، مخصوصاً وقتی که ستون‌ها ضریب لاغری بزرگ یا سطح بار بالایی دارند، امری ضروری است. یافته‌ها نشان می‌دهد که ضخامت مورد نیاز دوغاب سیمان برای ستون‌های CFST نسبت به ضخامت مورد نیاز برای ستون‌های فولادی توخالی، وقتی پارامترهایی همچون اندازه‌ی هندسه، مصالح و نرخ تاب آوری در برابر آتش یکسان باشد بسیار کمتر است [۱۴]. همچنین پوشش IFC می‌تواند از لحاظ اقتصادی، محافظت در برابر آتش ستون‌های CFST را تامین کند. در بررسی‌های آزمایشگاهی توسط ساکوموتو<sup>۷</sup> و همکاران [۱۹] و ادواردز<sup>۸</sup> [۲۰ و ۲۱]، مشخص شد که تاب آوری در برابر آتش ستون‌های CFST دایره‌ای و مربعی محافظت شده با IFC به طور قابل ملاحظه‌ای بیشتر از ستون‌های فولادی تو خالی است.

مطالعه‌ی آزمایشگاهی دیگر روی دو ستون CFST مسلح شده با مقطع فولادی H و محافظت شده با IFC تحت اثر آتش توسط بینچ<sup>۹</sup> [۲۲] انجام گرفت. در این مطالعه‌ی آزمایشگاهی، تاب آوری در برابر آتش دو ستون CFST محافظت شده با IFC بیش از ۱۸۰ دقیقه است. مطالعات بالا همراه با آزمایش‌های انتقال حرارت ستون‌های CFST محافظت شده با IFC که توسط ادواردز [۲۰] و ریوش<sup>۱۰</sup> [۲۳] انجام شده بود، افزایش دمای بسیار کندتری را در مقطع ستون‌های CFST نسبت به ستون‌های فولادی توخالی نشان داد. اگرچه تحقیقاتی روی تاب آوری در برابر آتش ستون‌های CFST محافظت شده با IFC صورت گرفته ولی هنوز داده‌ها برای درک کامل عملکرد این پوشش در معرض آتش کامل نیست. متغیرهایی که ممکن است بر مقاومت نسبی ستون‌های CFST محافظت شده با IFC تاثیر بگذارد، بسیار پیچیده هستند. رفتار مکانیکی ستون‌های CFST در معرض آتش، همچون توزیع دمایی، دمای محدود کننده در شکست و فرایند توزیع بار بین جدار فولادی و بتن هنگامی که IFC استفاده شود ممکن است به مقدار قابل توجهی تغییر کند. با توجه به عملکرد فیزیکی و شیمیایی پیچیده IFC در معرض آتش و نبود روش طراحی قابل اعتماد، مدلسازی دقیق پوشش IFC یک چالش برای سازه‌های مختلف است. برای بررسی عملکرد حرارتی ستون‌های CFST محافظت شده با IFC در معرض آتش، مدلسازی اجزاء محدود گروهی از ستون‌های CFST با مقاطع دایره، مربع، مستطیل و بیضی در معرض آتش استاندارد ISO-834 با استفاده از نرم افزار اجزاء محدود Abaqus در این مقاله ارائه شده است. توزیع دما در ارتفاع ستون یکنواخت در نظر گرفته شده است، هرچند در واقعیت به سبب یکسان نبودن شدت آتش در تمام نقاط، معمولاً توزیع دما در ارتفاع ستون یکنواخت نیست. بنابراین انتظار می‌رود فرض فوق باعث بدست آمدن نتایج محافظه کارانه‌ای شود [۲۴]. توزیع دما و تاب آوری در برابر آتش ستون‌های CFST و عملکرد پوشش IFC مورد بررسی قرار گرفته است.

## ۲- مدلسازی اجزاء محدود

### ۲-۱- هندسه و مش بندی مدل

با استفاده از نرم افزار Abaqus یک مدل سه بعدی برای شبیه سازی رفتار حرارتی ستون‌های فولادی پر شده با بتن بکار رفته است. پارامترهای اصلی مدل، طول ستون (L)، قطر خارجی (D)، ضخامت جدار فولادی (t)، شرایط تکیه‌گاهی، سطح بارگذاری (u) و خواص حرارتی و مکانیکی مصالح می‌باشد. مدل شامل سه قسمت: هسته بتنی، جدار فولادی و صفحه‌ی بارگذاری می‌باشد. مدلسازی با مقیاس واقعی انجام شده است. صفحه بارگذاری به صورت جسم صلب مدلسازی و بار محوری با استفاده از این المان به جدار فولادی و هسته بتنی منتقل شده است. در تحلیل سازه‌ای برای مش بندی هسته بتنی و جدار فولادی از المان پوسته هشت گرهی سه بعدی با انتگرال کاهش یافته (C3D8R) و برای تحلیل حرارتی از المان پوسته هشت گرهی سه بعدی (DC3D8) استفاده شده است. اندازه‌ی مش حداکثر دو

<sup>6</sup> Albero

<sup>7</sup> Sakumoto

<sup>8</sup> Edwards

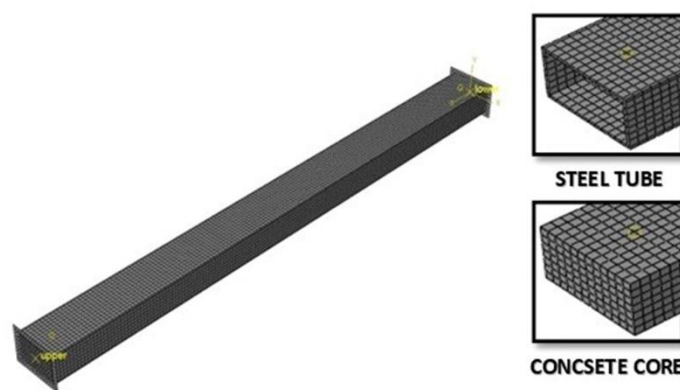
<sup>9</sup> Binch

<sup>10</sup> Rush

سانتیمتر در نظر گرفته شده است، که دقت کافی را برای پیش بینی رفتار حرارتی و مکانیکی ستون‌های CFST تحت اثر آتش فراهم می‌کند. همچنین برای مدلسازی پوشش IFC از المان پوسته هشت گرهی سه بعدی (DC3D8) بهره برده شده است. شکل (۱) نحوه‌ی مش بندی ستون CFST را نشان می‌دهد. همچنین جزئیات نمونه‌های مدل شده در این پژوهش در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱: جزئیات نمونه‌های عددی محافظت شده و محافظت نشده

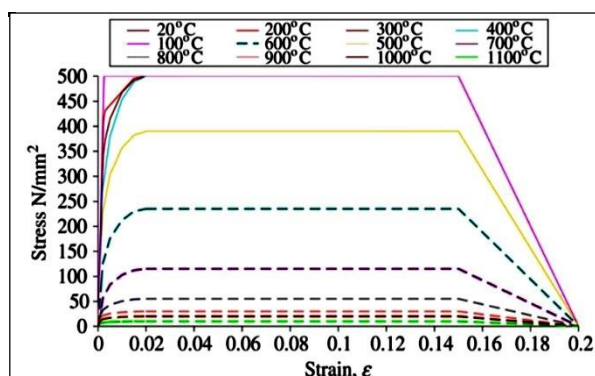
نمونه	مقطع	ابعاد / قطر (mm)	$F_y$ (Mpa)	$F_c$ (Mpa)	ضخامت IFC (mm)	ضخامت تیوب (mm)	بار محوری (KN)
C <sub>1-1</sub>	مستطیل	۲۵۰×۱۵۰	۲۵۰	۳۵	-	۱۰	۷۰۷/۸۴
C <sub>1-2</sub>	مستطیل	۲۵۰×۱۵۰	۲۵۰	۳۵	۱	۱۰	۷۰۷/۸۴
C <sub>2-1</sub>	مربع	۲۰۰×۲۰۰	۲۵۰	۳۵	-	۱۰	۷۷۵/۴۶
C <sub>2-2</sub>	مربع	۲۰۰×۲۰۰	۲۵۰	۳۵	۱	۱۰	۷۷۵/۴۶
C <sub>3-1</sub>	دایره	۲۲۰	۲۵۰	۳۵	-	۱۰	۷۲۷/۸۸
C <sub>3-2</sub>	دایره	۲۲۰	۲۵۰	۳۵	۱	۱۰	۷۲۷/۸۸
C <sub>4-1</sub>	بیضی	۳۲۰×۱۶۰	۲۵۰	۳۵	-	۱۰	۶۹۹/۱۵
C <sub>4-2</sub>	بیضی	۳۲۰×۱۶۰	۲۵۰	۳۵	۱	۱۰	۶۹۹/۱۵



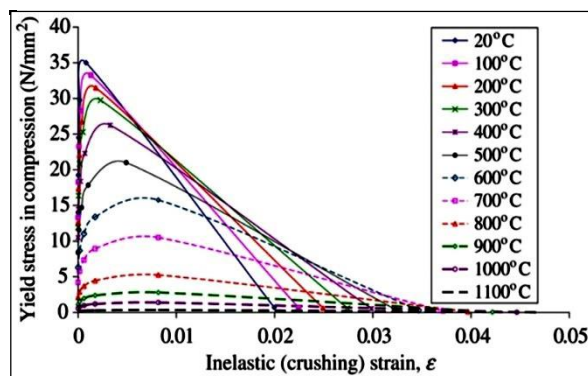
شکل ۱: مش بندی ستون CFST

## ۲-۲- خواص مصالح در دماهای بالا

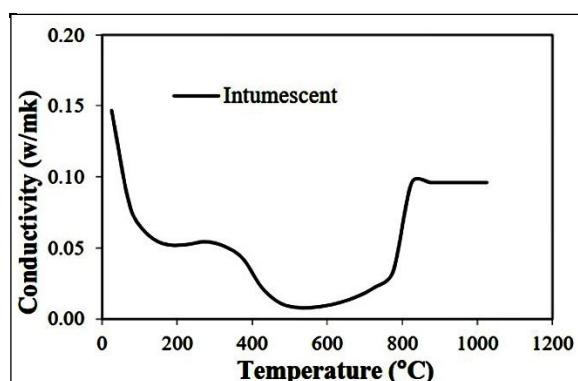
در مدل عددی، خواص حرارتی و مکانیکی مصالح، وابسته به دما در نظر گرفته شده است. برای بتن، مدل مکانیکی ارائه شده توسط لی<sup>۱۱</sup> [۲۵] مورد استفاده قرار گرفته است. قبلاً توسط هانگ<sup>۱۲</sup> و وارما<sup>۱۳</sup> [۲۶] ثابت شده است که این مدل پیش بینی دقیق تری از رفتار بتن داخل ستون CFST به عمل می‌آورد. در این پژوهش از مدل خسارت بتن استفاده شده است. خواص حرارتی بتن در دماهای بالا از EN1992-1-2 [۲۷] استخراج شده است. برای فولاد سازه‌ای، خواص حرارتی و مکانیکی وابسته به دمای ارائه شده توسط EN1993-1-2 [۲۸] تایید شده است. برای فولاد مدل پلاستیک با سطح تسلیم فون میسز مورد استفاده قرار گرفته است. برای میلگردها، خواص حرارتی بر اساس پیشنهاد EN1994-1-2، مشابه آنچه برای فولاد سازه‌ای استفاده شده است، بکار می‌رود. خواص مقاومت و تغییر شکل با استفاده از همان مدل ریاضی که برای فولاد سازه‌ای به دست آمده، استفاده شده است. فقط ضرایب کاهش توصیه شده در EN1992-1-2 در آن اعمال می‌شود. مقدار ضرایب انبساط حرارتی بتن طبق توصیه هانگ و وارما [۲۶]، مقدار ثابت  $\alpha_c = 6 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  و برای فولاد، مقدار ضریب انبساط حرارتی ارائه شده توسط EN1993-1-2 در نظر گرفته شده است. وزن مخصوص و گرمای مخصوص پوشش IFC به ترتیب  $1300 \text{ kg/m}^3$  و  $1000 \text{ J/kg}$  در نظر گرفته شده است [۳۶]. مقادیر رسانش حرارتی برای پوشش IFC مطابق شکل (۵) استفاده شده است.



شکل ۳: نمودار تنش - کرنش فولاد در دمای بالا [۳۶]



شکل ۴: نمودار تنش کرنش بتن در دمای بالا [۳۶]



شکل ۵: رسانش حرارتی پوشش IFC [۳۵]

11 Lie

12 Hong

13 Varma

## ۳-۲- نقص هندسی اولیه‌ی ستون

در مدل عددی ارائه شده، مقادیر نقص هندسی اولیه که به علت فرایند ساخت بوجود می‌آید در نظر گرفته شده است. این نقص هندسی اولیه ستون به عنوان اولین مود کمانش ستون بصورت یک ضریب در مدل سازه‌ای شبیه‌سازی می‌شود. به این منظور، ابتدا یک تحلیل کمانش روی ستون با تکیه‌گاه دو سر مفصل تحت اثر بار محوری انجام شده است. هنگامی که شکل اولیه ستون بدست آمد، باید به عنوان هندسه اولیه به مدل مکانیکی وارد شود. سپس یک ضریب برابر با حداکثر نقص در امتداد طول ستون به آن اعمال می‌شود. مقدار  $L/1000$  که توسط اکثر محققان بکار رفته است، به عنوان ضریب نقص هندسی اولیه استفاده شده است. هندسه تغییر شکل یافته برای هر یک از نمونه‌های ستون با استفاده از این روش به عنوان هندسه اولیه برای انجام تجزیه و تحلیل حرارتی-مکانیکی استفاده شد [۲۹].

## ۴-۲- روش تحلیل

هنگام انجام تحلیل حرارتی- مکانیکی یک مدل، می‌توان دو روش متفاوت را در نظر گرفت. روش اول، روش کوپل پی در پی تحلیل حرارتی- مکانیکی که ساده‌ترین و سریع‌ترین روش است. این نوع تحلیل می‌تواند تا زمانی که مقاومت حرارتی در مرز فولاد و بتن مستقل از فاصله بین آنها باشد، اجرا شود. روش دوم، روش کوپل کامل تحلیل حرارتی- مکانیکی است که بسیار غیر خطی و زمان بر است. این تحلیل بر این فرض استوار است که مقاومت حرارتی روی مرز فولاد و بتن وابسته به فاصله بین آنهاست. رسانش حرارتی فاصله بین دو سطح فولاد و بتن کاهش می‌یابد، زیرا فاصله دو سطح به علت اختلاف در ضریب انبساط حرارتی فولاد و بتن افزایش می‌یابد. در این مورد، راه حل‌های مکانیکی و حرارتی یکدیگر را تحت تاثیر قرار می‌دهند و تحلیل‌های حرارتی و مکانیکی باید به طور همزمان انجام شود. این روش نسبت به روش اول به زمان محاسبات بسیار طولانی تری نیاز دارد و موجب ایجاد مشکلات زیادی در همگرایی می‌شود. به دلیل اینکه زمان تحلیل در روش دوم نسبت به روش اول بسیار بالاست، برای این تحقیق از روش کوپل پی در پی استفاده شده است. بنابراین دو مدل مختلف مورد نیاز است: یک مدل حرارتی و یک مدل مکانیکی. ابتدا برای محاسبه‌ی میدان دما یک تحلیل انتقال حرارت، سپس برای محاسبه‌ی پاسخ سازه‌ای یک تحلیل تنش- جابجایی انجام گرفت. در تحلیل حرارتی دمای گره‌ها بصورت دما-زمان ذخیره شده سپس بصورت فایل از پیش تعریف شده به تحلیل سازه‌ای وارد می‌شود. پس از بدست آوردن نتایج با دقت کافی از طریق یک تحلیل ساده‌ی کوپل ترتیبی، همانطور که در قسمت صحت سنجی نشان داده خواهد شد، می‌توان نتیجه گرفت که دیگر نیاز به انجام تحلیل کوپل کامل که بسیار وقت گیر است و منجر به مشکلات همگرایی می‌شود، نیست.

## ۵-۲- تحلیل حرارتی

برای هر یک از نمونه‌های مورد مطالعه یک تحلیل حرارتی غیر خطی انجام شد. یک فرمول اجزاء محدود از معادله تعادل پایه انرژی همراه با قانون فوریه، که هدایت گرما را کنترل می‌کند، مورد استفاده قرار گرفت. برای انجام تحلیل حرارتی، منحنی آتش استاندارد ISO-834 [۳۰] به سطح ستون CFST به عنوان بار حرارتی از طریق مکانیزم انتقال حرارت و تابش حرارتی اعمال شد. برای پارامترهای حاکم بر تحلیل حرارتی از مقادیر توصیه شده در EN1991-1-2 [۳۱] که در جدول (۲) آورده شده است، استفاده گردیده است.

جدول ۲: پارامترهای حاکم بر تحلیل حرارتی

$h = 25 \text{ w/m}^2\text{k}$	ضریب انتقال همرفتی در سطح در معرض آتش
$\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ w/m}^2\text{k}^4$	ثابت استفان- بولتزمن
$\epsilon_m = 0.7$	ضریب نشر در سطح در معرض آتش
$\epsilon_f = 1$	ضریب نشر آتش
$T_0 = 20^\circ\text{C}$	دمای اولیه

برای مش بندی مدل حرارتی از المان هشت گرهی سه بعدی (DC3D8) و برای مش بندی میلگردها از المان دو گرهی انتقال حرارت (DC1D2) استفاده شده است. نتایج حاصل از تحلیل انتقال حرارت غیرخطی، شامل منحنی‌های دما-زمان، برای تمام گره‌ها در مدل سه بعدی به عنوان بارگذاری حرارتی به مدل مکانیکی اعمال می‌شود.

## ۶-۲- تحلیل سازه‌ای

یک تحلیل تنش غیرخطی با استفاده از مدل اجزاء محدود مشابه با مدل حرارتی که توسط آن دمای گره‌ها محاسبه گردیده، انجام شده است. در این مدل، مش و تعداد گره‌ها دقیقاً مانند مدل حرارتی انتخاب شده است. برای مش بندی میلگردها از المان دو گرهی (T3D2) استفاده شده است. میلگردها بصورت مدفون در بتن قرار می‌گیرند.

## ۷-۲- اندرکنش حرارتی و مکانیکی در مرز مشترک فولاد و بتن

مقاومت حرارتی در مرز بین تیوب فولادی و هسته‌ی بتنی با استفاده از رابطه‌ی ارائه شده توسط قوجل<sup>۱۴</sup> محاسبه شد [۳۲]. علاوه بر این، یک مکانیزم انتقال حرارتی تابش در فصل مشترک فولاد و بتن با ضریب نشر برابر ۰,۷ مدلسازی شد [۳۱]. برای اندرکنش مکانیکی بین تیوب فولادی و هسته‌ی بتنی، رفتار نرمال بصورت تماس سخت و برای رفتار مماسی از مدل اصطکاکی کلمب با یک ضریب اصطکاک ثابت ۰,۳ استفاده شده است.

## ۳- صحت سنجی مدل عددی

با توجه به هدف اصلی تحقیق، در این پژوهش جهت اطمینان به نتایج مدلسازی، ابتدا به مدلسازی عددی نمونه آزمایشگاهی ستون CFST تحت آتش و بار محوری و سپس در مرحله بعدی به مدلسازی عددی نمونه آزمایشگاهی محافظت شده با IFC تحت اثر آتش پرداخته می‌شود. در نهایت پس از مقایسه نتایج مدلسازی عددی و آزمایشگاهی، اقدام به مدلسازی عددی نمونه‌های مورد بررسی در این مقاله، می‌شود.

### ۱-۳- صحت سنجی مدلسازی اجزاء محدود ستون CFST تحت بارگذاری همزمان بار محوری و بار آتش

برای صحت سنجی مدل‌های اجزاء محدود ستون CFST، از مطالعات آزمایشگاهی اسپینوس<sup>۱۵</sup> و همکاران [۳۴] استفاده شده است. در پژوهشی که توسط اسپینوس و همکاران در سال ۲۰۱۵ با هدف بررسی اثر شکل مقطع ستون، درصد آرماتور و مقدار خروج از مرکز بار محوری بر رفتار ستون‌های CFST تحت اثر حرارت انجام شد، سه دسته نمونه آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت. دسته اول شامل ۶ نمونه آزمایشگاهی با مقطع مستطیلی به ابعاد  $۲۵۰ \times ۱۵۰ \times ۱۰$  میلیمتر، دسته دوم نیز شامل ۶ نمونه آزمایشگاهی با مقطع مستطیلی به ابعاد  $۳۵۰ \times ۱۵۰ \times ۱۰$  و دسته سوم شامل ۶ نمونه آزمایشگاهی با مقطع بیضی شکل به ابعاد  $۳۲۰ \times ۱۶۰ \times ۱۲/۵$  بوده‌اند. برای هر کدام از سه دسته مذکور، دو نمونه آزمایشگاهی در معرض بار محوری بدون خروج از مرکزیت، دو نمونه در معرض بار محوری با خروج از مرکزیت کم و دو نمونه در معرض بار محوری با خروج از مرکزیت زیاد بودند. همچنین در بعضی از نمونه‌ها به مقدار  $۲/۵$  درصد آرماتور وجود داشته است. همه نمونه‌های آزمایشگاهی دارای تکیه گاه مفصلی بوده‌اند که ابتدا بار محوری به میزان ۲۰ درصد ظرفیت ستون مورد نظر در دمای اتاق اعمال شده است، سپس نمونه تا دمای ۸۱۰ درجه سانتیگراد تا لحظه گسیختگی، تحت تاثیر بار حرارتی قرار گرفته‌اند.

در این مقاله، نمونه آزمایشگاهی R2 که بار محوری بدون هیچ خروج از مرکزی به آن وارد شده و دارای مقطع مستطیل شکلی به ابعاد  $۲۵۰ \times ۱۵۰ \times ۱۰$  میلیمتر است، جهت صحت سنجی مدل‌های اجزاء محدود در نرم افزار آباکوس مدلسازی و تحلیل شده است. در جدول ۳ مشخصات هندسی ستون R2 و مشخصات مکانیکی مصالح مورد استفاده، نشان داده شده است.

<sup>14</sup> Ghojeli

<sup>15</sup> Espinos

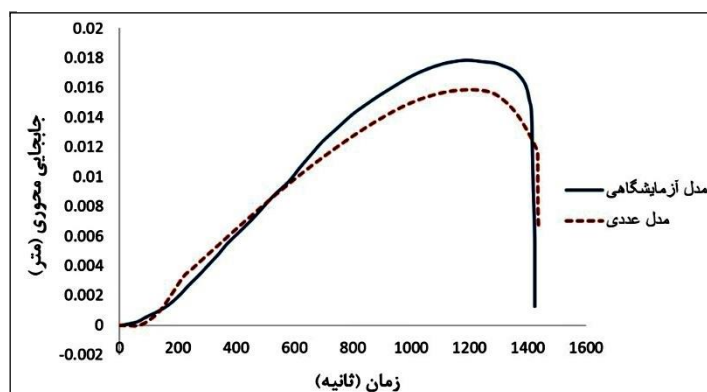


مطالعات آزمایشگاهی و عددی زیادی روی تاثیر آتش سوزی روی ستون‌های CFST ارائه شده است. افزایش دما باعث افت خواص مکانیکی بتن و فولاد می‌شود [۳۳]. در این پژوهش از روابط ارائه شده توسط Lie [۲۵] برای بتن محصور شده و برای فولاد از روابط ارائه شده توسط EC4 [۱۷] استفاده شده است. جهت اعمال بار حرارتی روی مدل اجزاء محدود، مطابق آنچه در بخش ۲-۲ ذکر شد، مشخصات حرارتی بتن و فولاد تحت افزایش دما به نمونه اعمال شده است. در این روابط تبخیر آب بتن تحت اثر حرارت و کاهش مقاومت آن نیز منظور گردیده است.

جدول ۳: جزئیات هندسی و مشخصات مکانیکی مصالح ستون آزمایش شده توسط اسپینوس و همکاران [۳۴]

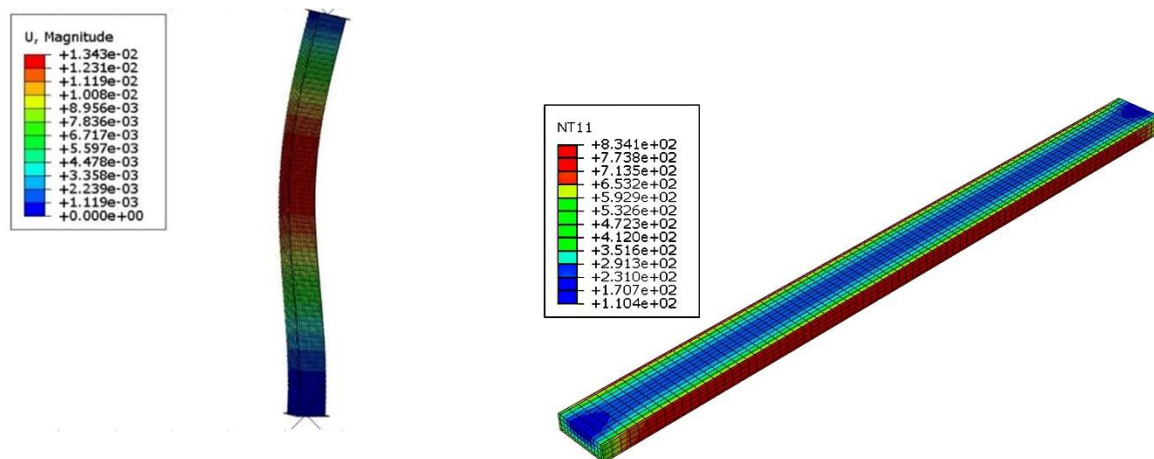
نمونه	میلگرد	ضخامت جدار فولادی		ارتفاع ستون (mm)	ابعاد مقطع (mm)
		فولاد	بتن		
R2	۱۶φ۴	۱۰		۳۱۸۰	۲۵۰×۱۵۰
	$F_y$ (Mpa)	$E_s$ (Gpa)	$F_c$ (Mpa)	$E_c$ (Mpa)	
	۴۲۸/۳	۲/۱	۳۹/۶	۲۷۷۹۲/۲۷	

دمای قسمت‌های مختلف ستون از تحلیل انتقال حرارت محاسبه شده و سپس این دما همراه با بار محوری به ستون اعمال و ستون تحلیل شده است. مدل تحت منحنی‌های آتش و گام‌های بارگذاری استاتیکی مناسب (افزایش بار با گام‌های برابر)، تحلیل شده است. در نهایت نمودار تغییر طول محوری ستون‌ها در اثر انبساط حرارتی، از مدل عددی استخراج شد. در شکل ۵ نتایج مدلسازی عددی و نمونه آزمایشگاهی مقایسه شده است.



شکل ۵: مقایسه‌ی نمودار تغییر شکل محوری-زمان نمونه آزمایشگاهی و عددی

همانطور که ملاحظه گردید، با وجود اختلافات ناچیز در صحت سنجی نمونه تحلیلی، مدلسازی اجزاء محدود از دقت مناسبی برخوردار بود. همچنین شکل (۶) نمایی از توزیع دمایی در مقطع و طول ستون CFST و شکل (۷) نمای تغییر شکل یافته ستون تحت اثر همزمان دما-بار محوری برای نمونه آزمایشگاهی را نشان می‌دهد.



شکل ۶: توزیع دما در مقطع

شکل ۷: نمای تغییر شکل یافته ستون تحت اثر همزمان دما-بار محوری

### ۲-۳- صحت سنجی مدل‌سازی اجزاء محدود نمونه‌ی محافظت شده با IFC تحت اثر آتش

برای بررسی تاثیر پوشش IFC روی اجزای سازه‌ای، نیاز به مدل عددی می‌باشد که بطور دقیق رفتار اجزاء سازه دارای پوشش IFC را تحت آتش ارائه دهد. به منظور صحت سنجی مدل‌های اجزاء محدود دارای پوشش IFC، از آزمایشی که در سال ۲۰۱۸ توسط آندرا لچرینی<sup>۱۶</sup> و همکاران [۷] انجام گرفت، استفاده شده است. هدف لچرینی و همکاران بررسی آزمایشگاهی عملکرد پوشش محافظ بود. برای این منظور، سه دسته نمونه آزمایشگاهی را مورد ارزیابی قرار دادند. در پژوهش حاضر، جهت صحت سنجی مدل‌های اجزاء محدود دارای پوشش محافظ، نمونه آزمایشگاهی I09-B10-F-ISO که مشخصات آن در جدول ۴ آورده شده، استفاده شده است. مقطع این نمونه IPE 400 است که طول آن ۴۰۰ میلی‌متر و توسط IFC به ضخامت یک میلی‌متر محافظت شده است. نمونه آزمایشگاهی مذکور در یک کوره به ابعاد داخلی ۱۵۰×۱۵۰×۱۵۰ سانتی‌متر و برای مدت ۳۰ دقیقه تحت اثر منحنی آتش ISO-834، که از رابطه‌ی (۱) محاسبه می‌شود، قرار گرفته است.

$$T = 345 \times \log_{10}^{(8t+1)} + 20 \quad (1)$$

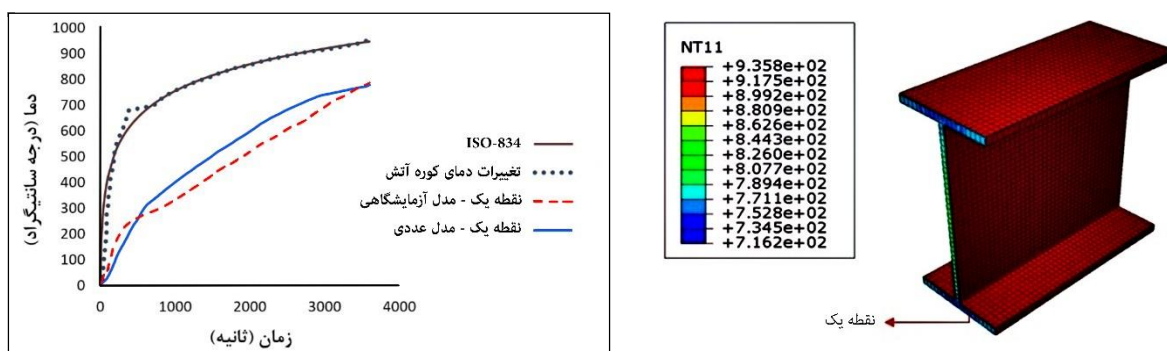
برای مدل‌سازی در نرم افزار اباکوس از خواص حرارتی فولاد مطابق آنچه در قسمت قبل به آن اشاره شد، استفاده شده است. همچنین برای خواص حرارتی پوشش IFC از مقادیر ارائه شده توسط دای<sup>۱۷</sup> و همکاران، بهره گیری شده است [۳۵]. برای تعیین توزیع دما در مقطع نمونه یک تحلیل انتقال حرارت انجام گرفته است و در نهایت نمودار تغییر دما مدل عددی استخراج شده است. در شکل (۸) نتایج مدل‌سازی عددی با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود نتایج تحلیل عددی از دقت قابل قبولی برخوردار هستند.

جدول ۴: مشخصات نمونه آزمایش شده توسط A. Lucherini

نمونه	نوع مقطع	ضخامت لایه IFC (mm)	ضریب مقطع (m <sup>-1</sup> )	طول المان (mm)
I09-B10-F-ISO	IPE 400	۰/۹۵	۱۷۵	۴۰۰

<sup>16</sup> Andrea Lucherini

<sup>17</sup> Dai



شکل ۸: تغییرات دمایی در IPE-400

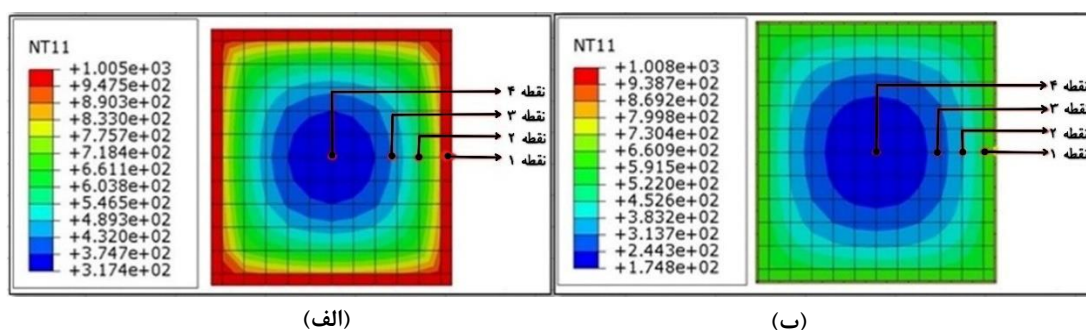
#### ۴- نتایج تحلیل عددی ستون CFST، بصورت محافظت شده و محافظت نشده

در بخش ۳ به مدلسازی عددی نمونه‌ی آزمایشگاهی ستون CFST و نمونه آزمایشگاهی محافظت شده با IFC تحت اثر آتش، جهت صحت سنجی مدل‌های اجزاء محدود پرداخته شد. در این قسمت با استفاده از مدلسازی اجزاء محدود، تاثیر پوشش IFC روی زمان تاب آوری در برابر آتش، جابجایی محوری و توزیع دما در مقطع ستون CFST تحت اثر آتش استاندارد بررسی می‌شود. نمونه‌های مدل شده در این پژوهش، دارای شکل مقطع مربعی، دایروی، مستطیلی و بیضی با سطح مقطع، ضخامت تیوب فولادی و ارتفاع یکسان می‌باشند. بار محوری ستون‌ها برابر  $0/3$  ظرفیت محوری مقاطع در نظر گرفته شده است که بصورت محوری و بدون خروج از محوریت به مرکز هندسی صفحه فوقانی ستون اعمال شد. ظرفیت محوری این ستون‌ها با استفاده از روابط ارائه شده در مبحث دهم مقررات ملی ساختمان محاسبه شده است. جزئیات نمونه‌های شبیه سازی شده در جدول (۱) ارائه شده است. همانطور که در جدول یک نشان داده شده است، ستون-های  $C_{4-1}$ ,  $C_{3-1}$ ,  $C_{2-1}$ ,  $C_{1-1}$  با شکل مقطع مستطیل، مربع، دایره و بیضی بدون پوشش محافظ در برابر آتش و ستون‌های  $C_{4-2}$ ,  $C_{3-2}$ ,  $C_{2-2}$ ,  $C_{1-2}$  محافظت شده با پوشش IFC تحت آتش استاندارد ISO-834 قرار دارند.

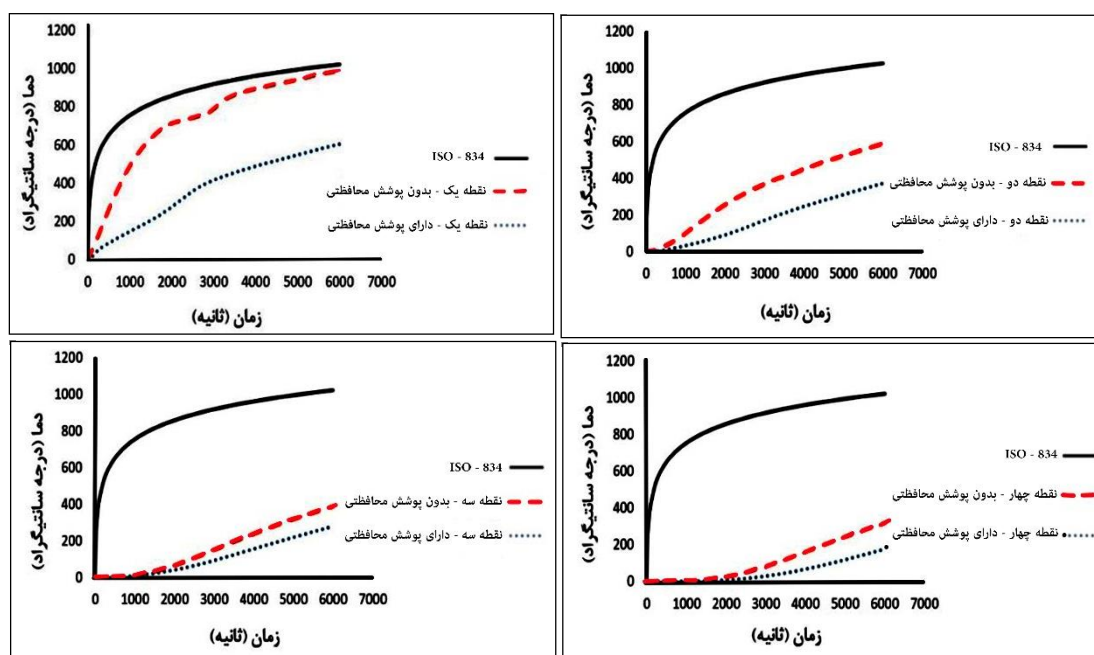
در نهایت در این پژوهش، بعد از مدلسازی نمونه‌های عددی توزیع دما در مقطع و زمان تاب آوری در برابر آتش، برای ستون‌های با مقاطع مختلف بصورت محافظت شده و محافظت نشده بررسی و مقایسه خواهند شد.

##### ۴-۱- توزیع دما

مطابق شکل (۹) چهار نقطه از سطح مقطع ستون مربعی در ارتفاع میانی در نظر گرفته شده است تا توزیع دما در مقطع ستون نشان داده شود. شکل (۱۰) تغییرات درجه حرارت هر یک از چهار نقطه درون سطح مقطع ستون‌های  $C_{2-1}$ ,  $C_{2-2}$  را نشان می‌دهد. همانطور که از شکل (۱۰) پیداست، پوشش IFC بصورت یک عایق حرارتی خوب عمل کرده و رشد دمایی نقاط درونی مقطع محافظت شده نسبت به نقاط درونی مقطع محافظت نشده کاهش چشمگیری را نشان می‌دهد. در مورد اختلاف دمایی نقطه‌ی ۱ نسبت به بقیه نقاط داخلی در مقطع محافظت شده و محافظت نشده، می‌توان گفت که چون نقطه‌ی ۱ روی تیوب فولادی قرار دارد و با توجه به رسانش بالای فولاد و گرمای مخصوص کمتر آن نسبت به بتن، دمای آن به سرعت بالا رفته و نسبت به نقاط دیگری که درون بتن انتخاب شده‌اند، تا انتهای تحلیل اختلاف دمایی قابل توجهی دارد. همانطور که از شکل (۹) و (۱۰) مشخص است، چون آتش بطور یکنواخت به ستون اعمال می‌شود، بدلیل تقارن بارگذاری حرارتی، گرادیان دمایی از سطح خارجی به سمت مرکز بتن ایجاد شده است. این پدیده موجب می‌شود که مرکز سختی جابجا نشده و تنها موردی که موجب انهدام ستون می‌شود کاهش مقاومت مصالح در اثر افزایش دما می‌باشد.



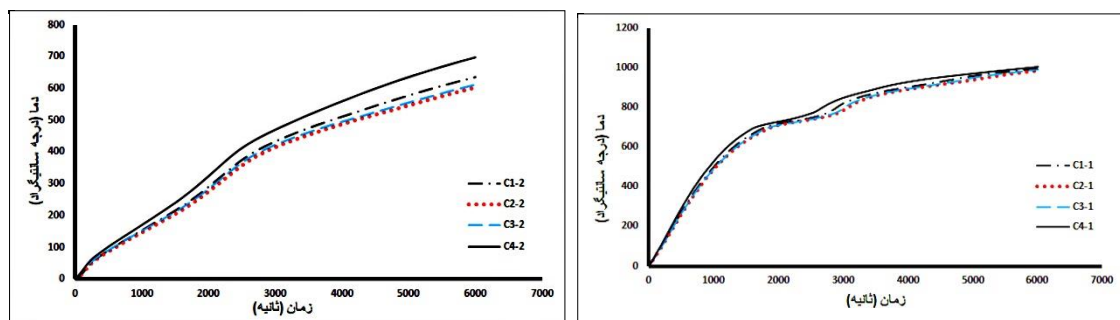
شکل ۹: نقاط مورد بررسی برای توزیع حرارت در سطح مقطع ستون‌های (الف) C2-1 و (ب) C2-2



شکل ۱۰: توزیع حرارت نقاط در سطح مقطع ستون‌های C2-1 و C2-2

در ادامه مقایسه‌ای بین تغییرات دما در نقاط روی جدار فولادی و مرکز هسته‌ی بتنی نمونه‌های محافظت شده و محافظت نشده که در شکل‌های (۱۱) و (۱۲) نشان داده شده، صورت گرفته است. با توجه به شکل (۱۱)، روند تغییرات دما روی تیوب فولادی مقاطع تقریباً یکسان است، دلیل این پدیده رسانش حرارتی بالای فولاد و ضخامت یکسان جداره‌ی فولادی تمام مقاطع است. در شکل (۱۱) که تغییرات دمای نقطه روی تیوب فولادی مقاطع محافظت شده با IFC را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که بجز مقطع C4-2 که دمای آن نسبت به سایر مقاطع مقداری بالاتر است، در سایر مقاطع مقداری تقریباً یکسان دارد. اما در شکل (۱۲) که روند تغییرات دما در هسته‌ی بتنی را نشان می‌دهد، مشاهده می‌شود که تغییرات دما بین نمونه‌های مورد بررسی نسبت به تغییرات دما روی جداره‌ی فولادی نمونه‌ها بسیار متفاوت می‌باشد. که این می‌تواند به علت رسانش حرارتی پایین بتن نسبت به تیوب فولادی و رفتار پیچیده بتن باشد. همانطور که در شکل (۱۲) مشخص است، توزیع دما در مرکز هسته‌ی بتنی در نمونه‌های ذکر شده در جدول (۱) دارای اختلاف می‌باشد، به طور مثال در ثانیه‌ی ۶۰۰۰، اختلاف دمای نمونه‌های C2-1، C4-1، حدود ۳۳۰ درجه سانتیگراد رسیده است، که مقدار قابل ملاحظه‌ای است. این اختلاف دمایی در نمونه‌های C2-2، C4-2، نیز وجود دارد. با بررسی شکل‌های (۱۱) و (۱۲) می‌توان مشاهده کرد که وجود پوشش IFC تاثیر قابل توجهی روی گرادیان دمایی مقطع دارد. به گونه‌ای که در ثانیه ۶۰۰۰ که دمای تیوب فولادی به ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد می‌رسد، دمای

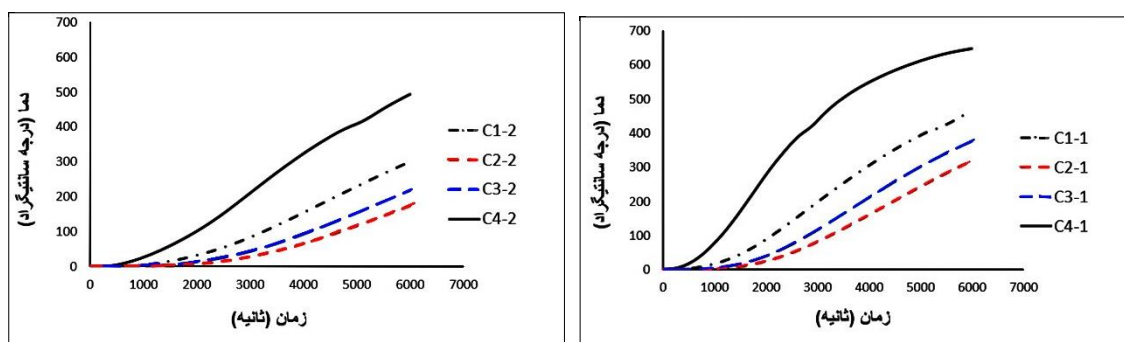
مرکز هسته‌ی بتنی در مقاطع دارای پوشش IFC بسیار پایین تر است. بطور مثال دمای مقطع C<sub>4-2</sub> حداکثر به ۵۰۰ درجه سانتیگراد و دمای مقطع C<sub>2-2</sub>، حداکثر به ۱۸۰ درجه سانتیگراد می‌رسد. با بررسی این نمودارها می‌توان مشاهده کرد که پوشش IFC تا حد قابل ملاحظه‌ای توانسته مانع رشد سریع دمای مقطع شود و در نتیجه از کاهش بیش از حد مقاومت مصالح تشکیل دهنده‌ی اجزای سازه‌ای در اثر حرارت بالا جلوگیری کند.



(ب)

(الف)

شکل ۱۱: مقایسه تغییرات دمایی نقطه روی تیوب فولادی مقاطع



(ب)

(الف)

شکل ۱۲: مقایسه تغییرات دمایی مرکز هسته بتنی مقاطع

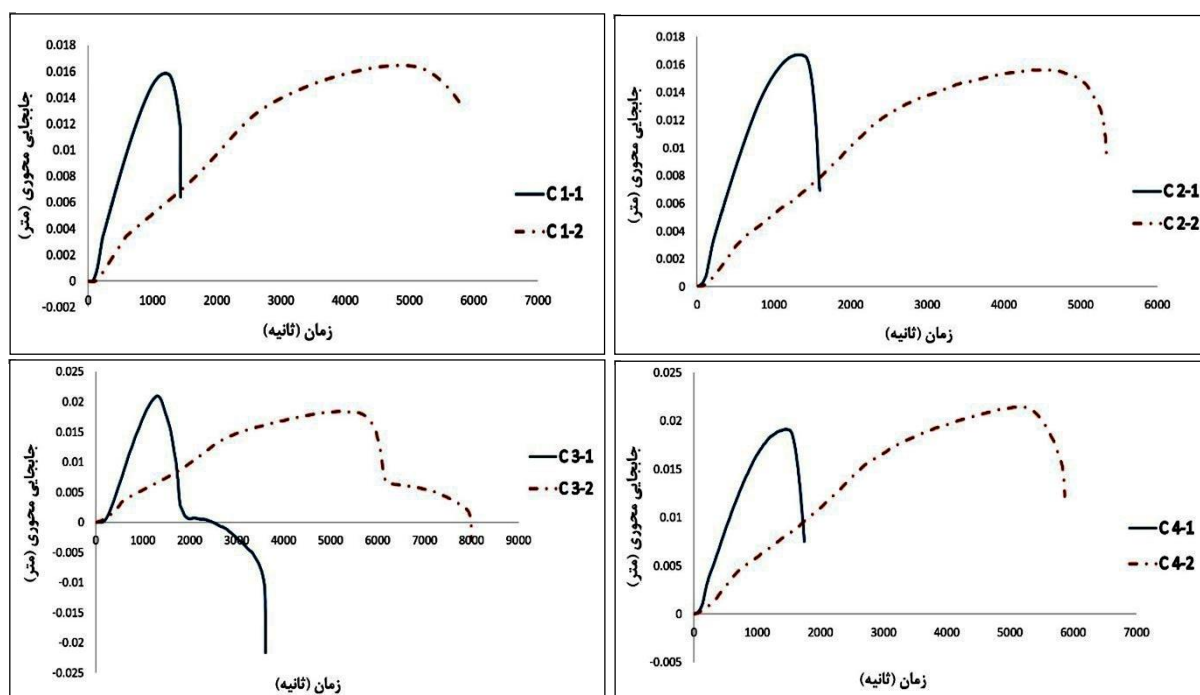
## ۴-۲- رفتار مکانیکی

به منظور بررسی تاثیر پوشش مقاوم در برابر آتش IFC تحت اثر بار حرارتی یکنواخت بر رفتار سازه‌ای ستون‌های CFST با مقاطع مختلف، زمان مقاومت در برابر آتش ستون‌ها محاسبه و با حالت بدون پوشش IFC مقایسه شده‌اند، نتایج در جدول (۵) نشان داده شده است.

جدول ۱: مقاومت در برابر آتش برای مدل‌های عددی

نمونه	ستون محافظت نشده				ستون محافظت شده			
	C <sub>1-1</sub>	C <sub>2-1</sub>	C <sub>3-1</sub>	C <sub>4-1</sub>	C <sub>1-2</sub>	C <sub>2-2</sub>	C <sub>3-2</sub>	C <sub>4-2</sub>
مقاومت در برابر آتش (ثانیه)	۱۴۰۰	۱۶۰۴	۳۶۱۵	۱۷۴۲	۵۸۰۶	۵۳۳۴	۷۹۸۹	۵۸۶۰

با توجه به جدول (۵)، وجود پوشش IFC، تاب آوری در برابر آتش ستون را بطور قابل توجهی افزایش داده است. دلیل اصلی این افزایش مقاومت، رسانش بسیار پایین پوشش IFC و تشکیل واکنش شیمیایی در این پوشش که باعث متورم شدن آن شده و بصورت یک عایق حرارتی عمل می‌کند. همانطور که از جدول ۵ مشخص است زمان مقاومت در برابر آتش مقاطع دایره‌ای نسبت به سایر مقاطع استفاده شده بیشتر از ۲ برابر است که به نظر می‌آید این موضوع به سبب خاصیت محصور کنندگی بالای مقطع دایره‌ای می‌باشد. تغییرات جابجایی محوری-زمان نمونه‌های محافظت شده و محافظت نشده در شکل (۱۳) نشان داده شده است. که در نمودارهای شکل ۱۳ منحنی قرمز رنگ تغییرات جابجایی محوری - زمان نمونه‌های محافظت شده با پوشش IFC و منحنی آبی رنگ تغییرات جابجایی محوری - زمان نمونه‌های فاقد پوشش IFC را نشان می‌دهد. همانطور که از نمودارها مشخص است وجود پوشش IFC به طور قابل ملاحظه‌ای تاب آوری در برابر آتش ستون‌ها را افزایش داده است.



شکل ۱۳: تغییرات جابجایی محوری - زمان نمونه‌ها

## ۵- نتیجه گیری

ستون‌های CFST به دلیل شکل پذیری زیاد بصورت گسترده‌ای در مناطق لرزه خیز در ساختمان‌های بلند مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این پژوهش رفتار حرارتی و مقاومت در برابر آتش ستون CFST با مقاطع دایره، مربع، مستطیل و بیضی به صورت محافظت شده با پوشش IFC و بدون پوشش محافظتی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج بدست آمده به صورت زیر می‌باشد.

۱. افزایش دمای تیوب فولادی و هسته بتنی ستون CFST محافظت شده با پوشش IFC تا حدود ۵۰٪ کمتر از ستون بدون پوشش می‌باشد.
۲. با توجه به نتایج بدست آمده از تحلیل نمونه ستون‌های محافظت شده با پوشش IFC مشاهده می‌شود که پوشش IFC باعث افزایش مدت زمان تاب آوری در برابر آتش ستون‌های CFST با سطح مقطع دایره، مربع، مستطیل و بیضی به ترتیب، ۳/۳، ۴/۱۴ و ۳/۳۶ برابری نسبت به نمونه‌های مذکور بدون پوشش IFC شده است.



۳. با بررسی نتایج مشاهده می‌شود که زمان مقاومت در برابر آتش مقاطع دایره‌ای نسبت به سایر مقاطع استفاده شده بیشتر از ۲ برابر است که به نظر می‌آید این موضوع به سبب خاصیت محصور کنندگی بالای مقطع دایره‌ای می‌باشد.

## مراجع

- [1] Song, Q. Y., Han, L. H., Zhou, K., & Feng, Y. (2018). Fire resistance of circular concrete-filled steel tubular (CFST) column protected by intumescent coating. *Journal of Constructional Steel Research*, 147, 154-170. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2018.03.038>
- [2] National Fire Protection Association, (2012). *Building construction and safety code*, NFPA 5000.
- [3] Wang, Yong C. (2014). *Steel and composite structures: Behaviour and design for fire safety*. CRC Press.
- [4] Lennon, T., Moore, D. B., & Bailey, C. (1999). The behaviour of full-scale steel-framed buildings subjected to compartment fires. *The Structural Engineer*, 77(8), 15 - 21.
- [5] Association for Specialist Fire Protection, (2014). *Fire protection for structural steel in buildings*, 5th Edition Ed: Association for Specialist Fire Protection, Steel Construction Institute, Fire Test Study Group.
- [6] China Association for Engineering Construction Standardization, (2006). *Technical Code for Fire Safety of Steel Structure in Buildings*, CECS200-2006, China Planning Press, Beijing.
- [7] Lucherini, A., Giuliani, L., & Jomaas, G. (2018). *Experimental study of the performance of intumescent coatings exposed to standard and non-standard fire conditions*. *Fire Safety Journal*, 95, 42-50. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2017.10.004>
- [8] Gillet, M., Autrique, L., & Perez, L. (2007). *Mathematical model for intumescent coatings growth: application to fire retardant systems evaluation*. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 40(3), 883. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/40/3/030>
- [9] Zhang, Y., Wang, Y. C., Bailey, C., & Taylor, A. P. (2012). Global modelling of fire protection performance of intumescent coating under different cone calorimeter heating conditions. *Fire Safety Journal*, 50, 51-62. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2012.02.004>
- [10] Cirpici, B. K., Wang, Y. C., Rogers, B. D., & Bourbigot, S. (2016). A theoretical model for quantifying expansion of intumescent coating under different heating conditions. *Polymer Engineering & Science*, 56(7), 798-809.
- [11] Cirpici, B. K., Wang, Y. C., & Rogers, B. (2016). Assessment of the thermal conductivity of intumescent coatings in fire. *Fire Safety Journal*, 81, 74-84. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2016.01.011>
- [12] Yew, M. C., & Sulong, N. R. (2012). Fire-resistive performance of intumescent flame-retardant coatings for steel. *Materials & Design*, 34, 719-724. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.05.032>
- [13] Han, L. H., He, S. H., & Liao, F. Y. (2011). Performance and calculations of concrete filled steel tubes (CFST) under axial tension. *Journal of Constructional Steel Research*, 67(11), 1699-1709. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2011.04.005>
- [14] Han, L. H., Yang, Y. F., & Xu, L. (2003). An experimental study and calculation on the fire resistance of concrete-filled SHS and RHS columns. *Journal of constructional steel research*, 59(4), 427-452. [https://doi.org/10.1016/S0143-974X\(02\)00041-X](https://doi.org/10.1016/S0143-974X(02)00041-X)
- [15] Lie, T. T. (1994). Fire resistance of circular steel columns filled with bar-reinforced concrete. *Journal of structural engineering*, 120(5), 1489-1509. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1994\)120:5\(1489\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1994)120:5(1489))
- [16] Tao, Z., Ghannam, M., Song, T. Y., & Han, L. H. (2016). Experimental and numerical investigation of concrete-filled stainless steel columns exposed to fire. *Journal of Constructional Steel Research*, 118, 120-134. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2015.11.003>
- [17] CEN, Eurocode 4, (2005). design of composite steel and concrete structures. part 1-2: general rules-structural fire design, EN 1994-1-2.
- [18] Albero, V., Espinos, A., Romero, M. L., Hospitaler, A., Bihina, G., & Renaud, C. (2016). Proposal of a new method in EN1994-1-2 for the fire design of concrete-filled steel tubular columns. *Engineering Structures*, 128, 237-255. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.09.037>

- [19] Sakumoto, Y., Okada, T., Yoshida, M., & Tasaka, S. (1994). Fire resistance of concrete-filled, fire-resistant steel-tube columns. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 6(2), 169-184. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(1994\)6:2\(169\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(1994)6:2(169))
- [20] Edwards, M. (1998). The performance in fire of concrete filled SHS columns protected by intumescent paint. A. A. Balkema Publishers, Tubular Structures VIII(USA), 491-498.
- [21] Edwards, M. (2001). The performance in fire of fully utilised concrete filled SHS columns with external fire protection. TUBULAR STRUCTURES-INTERNATIONAL SYMPOSIUM-. Vol. 9.
- [22] Binh, CHU Thi. (2009). Hollow steel section columns filled with self-compacting concrete under ordinary and fire conditions. Diss. PhD thesis, University of Liege, Belgium.
- [23] Rush, D., Bisby, L., Gillie, M., Jowsey, A., & Lane, B. (2014). Design of intumescent fire protection for concrete filled structural hollow sections. *Fire safety journal*, 67, 13-23. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2014.05.004>
- [24] YAHYAI, M., REZAEIAN, A., & SAFAEIAN, M. (2017). RESPONSE OF STEEL BOX COLUMNS IN FIRE CONDITIONS. (in Persian). <http://dx.doi.org/10.22065/jsce.2017.44333>
- [25] Lie, T. T., & Irwin, R. J. (1995). Fire resistance of rectangular steel columns filled with bar-reinforced concrete. *Journal of structural engineering*, 121(5), 797-805. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1995\)121:5\(797\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1995)121:5(797))
- [26] Hong, S., & Varma, A. H. (2009). Analytical modeling of the standard fire behavior of loaded CFT columns. *Journal of Constructional Steel Research*, 65(1), 54-69. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2008.04.008>
- [27] CEN. EN 1992-1-2, Eurocode 2: (2004). design of concrete structures, part 1.2: general rules—structural fire design. Brussels (Belgium): Comité Européen de Normalisation.
- [28] CEN. EN 1993-1-2, Eurocode 3: (2005). design of steel structures, part 1.2: general rules—structural fire design. Brussels (Belgium): Comité Européen de Normalisation.
- [29] Wang, K., & Young, B. (2013). Fire resistance of concrete-filled high strength steel tubular columns. *Thin-Walled Structures*, 71, 46-56. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2013.05.005>
- [30] ISO (International Standards Organization). (1980). ISO 834: fire resistance tests, elements of building construction. Switzerland: International Standards Organisation.
- [31] CEN. EN 1991-1-2, Eurocode 1: (2002). actions on structures, part 1.2: general actions—actions on structures exposed to fire. Brussels (Belgium): Comité Européen de Normalisation.
- [32] Ghofjel, J. (2004). Experimental and analytical technique for estimating interface thermal conductance in composite structural elements under simulated fire conditions. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 28(4), 347-354. [https://doi.org/10.1016/S0894-1777\(03\)00113-4](https://doi.org/10.1016/S0894-1777(03)00113-4)
- [33] Gholhaki, M., Pachideh, G., & Rezaeafar, O. An experimental study on mechanical properties of concrete containing steel and polypropylene fibers at high temperatures. (in Persian). <http://dx.doi.org/10.22065/jsce.2017.77392.1072>
- [34] Espinos, A., Romero, M. L., Serra, E., & Hospitaler, A. (2015). Experimental investigation on the fire behaviour of rectangular and elliptical slender concrete-filled tubular columns. *Thin-Walled Structures*, 93, 137-148. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2015.03.018>
- [35] Dai, X. H., & Lam, D. (2014). A numerical study on the effect of concrete infill and intumescent coating to fire-resistant behaviour of stub elliptical steel hollow sections under axial compression. *Advanced Steel Construction*, 10(3), 310-324.
- [36] Mirza, O., & Uy, B. (2009). Behaviour of headed stud shear connectors for composite steel–concrete beams at elevated temperatures. *Journal of Constructional Steel Research*, 65(3), 662-674. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2008.03.008>