

## مطالعه مقایسه‌ای بین ستون‌های لوله‌ای فولادی پرشده از بتن (CFST) با مقاطع دایره‌ای و مربعی پس از آتش

فاطمه کمانی<sup>۱</sup>، سعید بختیاری<sup>۲</sup>، علی مزروعی<sup>۳\*</sup>، سید محمد میرحسینی<sup>۴</sup>

۱- دانشجوی دکتری، مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اراک، اراک

۲- استادیار، مهندسی شیمی، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی تهران، تهران

۳- استادیار، مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکز، تهران

۴- استادیار، مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اراک، اراک

\* تهران، صندوق پستی ۸۶۸۳۱-۱۴۶۷۶، [ali.mazroi@iauctb.ac.ir](mailto:ali.mazroi@iauctb.ac.ir)

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۸/۲۳، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۰/۳۰)

### چکیده

هدف از این مقاله پیش‌بینی ظرفیت باربری باقی‌مانده ستون‌های لوله‌ای فولادی پرشده از بتن (CFST)، با توجه به اثرات خروج از مرکزیت بار که کارهای تحقیقاتی نسبتاً کمی انجام گرفته است. تأثیر پارامترهای از جمله: شکل سطح مقطع، نسبت لاغری، خروج از مرکزیت بار (۲۰ و ۵۰ میلی‌متر)، پوشش محافظتی در برابر آتش مورد بررسی قرار گرفته است. در این مقاله، ضرایب کاهش برای برآورد ظرفیت باقی‌مانده ستون‌های CFST با خروج از مرکزیت، براساس نتایج آزمایش‌های قبلی پیشنهاد شده است. در نهایت، بر اساس نتایج آزمایش قابلیت روش‌های پیش‌بینی ظرفیت باربری باقی‌مانده ستون‌های CFST با مقطع مربعی و دایره‌ای پس از قرار گرفتن در معرض آتش، بر اساس روش‌های اصلاح‌شده طراحی موجود در یورو کد ۴ در وضعیت آتش و دمای محیط ارزیابی شده است. بررسی‌ها نشان می‌دهد، روش پیشنهادی اصلاح‌شده یورو کد ۴، برای پیش‌بینی مقاومت باقی‌مانده پس از آتش ستون‌های CFST با مقطع مربعی و دایره‌ای به‌عنوان بهترین روش پیش‌بینی شناخته شده است.

### واژگان کلیدی

تیر مرکب، پیش‌تنیده، کابل، عرشه بتنی، تیر فولادی  
لوله‌های فولادی پرشده از بتن (CFST)، مقاومت باقی‌مانده، مقاطع مربعی و دایره‌ای

## Comparative study between circular and square concrete-filled steel tube (CFST) columns post-fire

F. Kamani, S. Bakhtiyari, A. Mazroi, M. Mirhoseini

### Abstract

The issue of predicting the residual load-bearing capacity of damaged concrete-filled steel tube (CFST) columns subject eccentricities is not widely assessed. The post-fire behavior of CFST columns is experimentally assessed here by running tests with different cross sections (circular and square), subject to eccentric axial loads. Here, the focus is on the influence of cross-sectional shape, load eccentricity (25 and 50 mm), slenderness and fire protective coating parameters on the post-fire bearing capacity of CFST sections. In this paper, the reduction factors are proposed to estimate the residual capacity of the CFST columns with the load eccentricity based on the previous experimental results. The modified design methods based on Eurocode 4 are applied in predicting the residual load-bearing capacity of the concrete-filled hollow tube columns after being exposed to fire. The assessments reveal that the simplified method of Eurocode 4, in the ambient temperature, subject to both the concentric and eccentric loading conditions and yield safe results, thus, a better prediction method.

### Keywords

The concrete-filled steel tube (CFST), Residual strength, Circular and square sections

ستون‌های توخالی فولادی پر شده با بتن CFST، در دهه‌های اخیر به‌طور فزاینده مورد استفاده قرار گرفته‌اند. با توجه به عملکرد بسیار عالی سازه‌ای آن‌ها که ترکیبی از اثر فولاد و بتن با یکدیگر هست، باعث به وجود آمدن یک سری مزایای سودمندی برای ستون CFST شده است. از جمله این مزایای، مقاومت بالای ستون CFST در برابر آتش است که نیازی به محافظت خارجی در برابر آتش نیست. در واقع خاصیت ذاتی بتن پرکننده (اثر فروکش کردن حرارت) باعث به تأخیر انداختن افزایش دما در سطح مقطع ستون می‌شود. علاوه بر این، بتن با ایجاد سختی بیشتر، از کماتش موضعی الاستیک جداره فولادی ستون CFST جلوگیری نموده و فولاد اثر حفاظتی از هسته بتن دارد، از قرارگیری آن در معرض مستقیم آتش محافظت می‌کند. در حالی که رفتار ستون CFST در دمای اتاق به‌خوبی قابل پیش‌بینی و شناخته شده است؛ اما رفتار ستون CFST در وضعیت پس از آتش با توجه به تخریب خواص مواد در اثر آتش باعث شده است که پیش‌بینی مدهای شکست احتمالی و تحلیل رفتاری این ستون با دشواری همراه باشد. برای ساختمانی که مدت طولانی در برابر آتش دوام آورده‌اند، سؤالی که مطرح می‌شود این است که چه مقدار خسارت به سازه وارد شده است؟ و آیا ساختمان (احتمالاً شامل ستون‌های CFST) می‌تواند دوباره بازسازی شود و یا دوباره مورد استفاده قرار بگیرد؟ و همچنین سؤالاتی نظیر اینکه به چه سطح تعمیر و تقویت ممکن است نیاز باشد؟ با توجه به اینکه در دستورالعمل‌های طراحی موجود پیش‌بینی مقاومت ستون‌های CFST در برابر آتش و دمای محیط مورد توجه بوده است نه ظرفیت باربری باقی‌مانده، از طرفی کارهای انجام شده در مورد مقاومت باقی‌مانده ستون CFST پس از آتش نسبتاً کم هست که نشان‌دهنده ضرورت و اهمیت پرداختن به این موضوع هست.

## ۲- برنامه آزمایشگاهی

در این برنامه آزمایشگاهی ۱۲ ستون CFST تحت فشار به صورت مرکزی و با خروج از مرکزیت تا مرحله شکست بارگذاری شده است، جزییات ابعاد و مشخصات نمونه‌ها در مراجع [۱ و ۲] آورده شده است. در این آزمایش، دو نمونه به عنوان نمونه شاهد در دمای محیط و سایر نمونه به مدت ۱۲۰ دقیقه در معرض آتش استاندارد ایزو ۸۳۴ [۳] قرار گرفته است. سطح در معرض آتش (دو نمونه) با پوشش ضد حریق پاششی از نوع گچ-

ورمیکولیت (Vermifire-G) با ضخامت اسمی ۱۷ و ۱۹ میلی‌متر محافظت شده است. ضخامت پوشش محافظت‌کننده در برابر آتش، بر اساس جداول مندرج در گزارش گواهی‌نامه فنی پوشش معدنی پایه گچی شرکت گیلان میکا، تهیه شده توسط مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی با توجه به ضریب شکل و دمای طراحی انتخاب شده است. طول تمام نمونه‌ها (به‌غیر از یک نمونه ستون کوتاه<sup>۱</sup> که دارای طول ۳۰۰ میلی‌متر هست)، ۱۰۰۰ میلی‌متر هست، مقاومت تسلیم فولاد مقاطع فولادی دایره‌ای ۳۱۹ مگا پاسکال هست. لوله‌ها با بتن با مقاومت معمولی (مقاومت فشاری ۲۸ روزه ۴۴/۳ مگا پاسکال) پر شده‌اند.

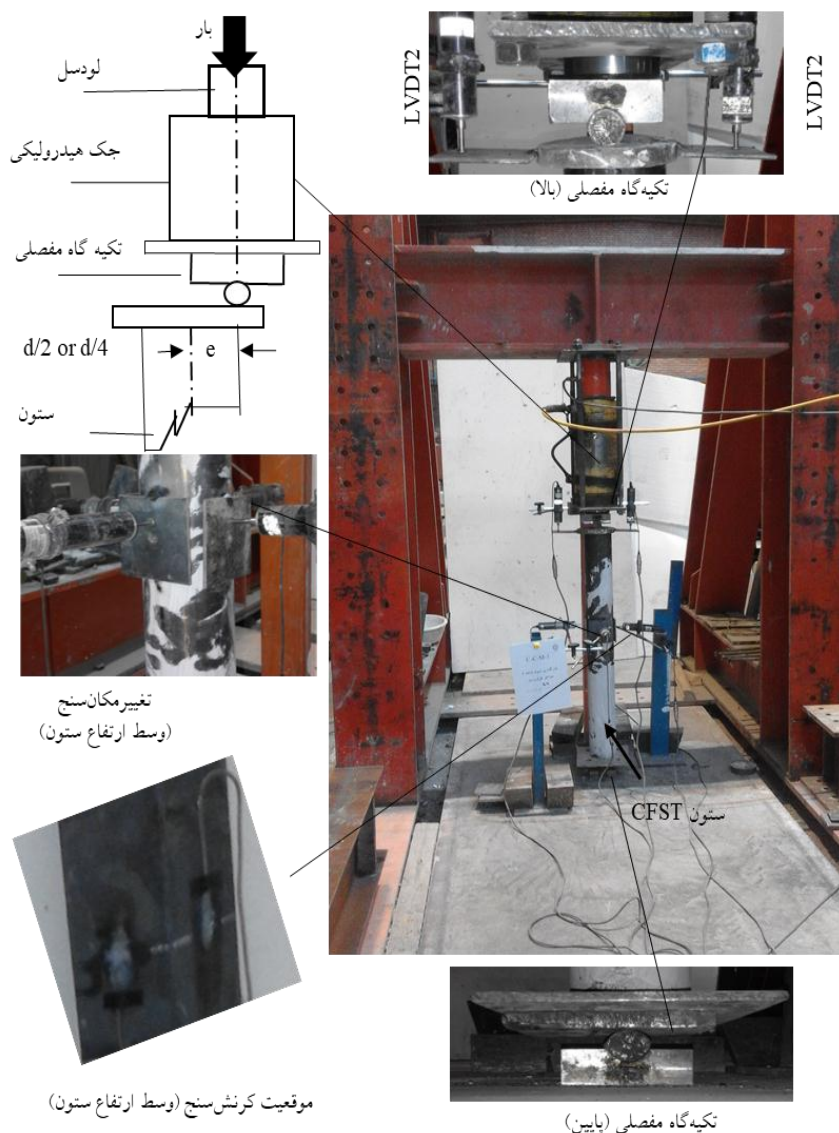
## ۳- در معرض آتش

نمونه‌ها در کوره مکعبی  $1 \times 1 \times 1 \text{ m}^3$  در بخش مهندسی آتش مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی تهران در معرض آتش قرار داده شده است. به منظور کاهش فشار بخار آب تولید شده در طول آزمایش کوره، دوره عمل‌آوری بتن ستون‌های CFST ۱۵۰ روز لحاظ شده است. دمای نمونه‌های CFST در فازهای گرمایش و سرمایش توسط ترموکوپل‌ها نصب شده در لوله فولادی و در سه عمق درون بتن نسبت به مرکز ستون (سطح بتن، عمق ۲۵ میلی‌متر و مرکز بتن) اندازه‌گیری و ثبت گردیده‌اند.

## ۴- آزمایش سازه‌ای

در این آزمایش نمونه‌ها با استفاده از جک هیدرولیکی ۱۰۰۰ کیلو نیوتنی تا رسیدن به مرحله شکست بارگذاری شده‌اند، شرایط انتهایی تکیه‌گاه به صورت مفصلی در نظر گرفته شده است؛ بنابراین، فقط امکان دوران حول یک محور به‌طور آزاد برای نمونه‌ها وجود دارد. در این آزمایش طول مؤثر،  $L_e$  نمونه‌های به صورت  $L_e = L + (2 \times 20 \text{ mm})$  تعریف شده است که  $L$  طول نمونه و ۲۰ میلی‌متر ضخامت صفحات انتهایی هست. در آزمون سازه دو تغییر مکان‌سنج، LVDT<sup>۲</sup> در بالای صفحه فوقانی، برای اندازه‌گیری تغییر مکان محوری کلی ستون و چهار LVDT در میانه ارتفاع ستون برای اندازه‌گیری تغییر مکان جانبی قرار داده شده است. کرنش‌سنج‌ها بر روی سطح بیرونی نمونه‌ها در وسط ارتفاع ستون برای اندازه‌گیری کرنش طولی نصب شده است. در طی آزمایش، بارمحوری، تغییر مکان محوری و کرنش‌های طولی در نمونه‌های مورد آزمایش اندازه‌گیری و ثبت گردیده‌اند، شکل (۱).





شکل ۱- جزییات چیدمان آزمایش

## ۵- مدهای شکست

در این آزمایش مد شکست کلیه مقاطع دایره‌ای به صورت کمانش کلی بدون هیچ نشانه قابل توجهی از کمانش موضعی با تغییر مکان جانبی و محوری قابل توجه پس از اوج بار مشاهده شده است. مد اولیه شکست مقاطع مربعی عمدتاً به صورت برآمدگی مقطع فولادی توخالی به طرف خارج (کمانش موضعی) هست، این امر می‌تواند نشان‌دهنده این حقیقت باشد که بتن پرکننده، مانع از کمانش مقطع توخالی فولادی به طرف داخل شده است؛ بنابراین مقطع فولادی توخالی در ناحیه تحت فشار در مقابل این نیروی عکس‌العمل بتن به صورت برآمدگی خارجی واکنش نشان می‌دهد و در نهایت با

اعمال نیروی فشاری بیشتر نمونه با کمانش کلی به مرحله شکست می‌رسد. در بعضی از موارد مد شکست موضعی در محل سوراخ‌های تهویه واقع شده‌اند که می‌تواند ناشی از تمرکز تنش به طور موضعی در این ناحیه و تسلیم شدن فولاد اتفاق افتاده باشد که در نهایت باعث تسریع بخشیدن به کمانش کلی شده است. در این آزمایش مدهای شکست ستون‌های کوتاه از جهاتی مشابه ستون‌های لاغر هم مقطع خود مشاهده شده، این نوع ستون صرفاً تحت فشار به حد شکست رسیده‌اند و تأثیرپذیری کمتری از کمانش کلی مقطع توخالی فولادی داشته است. به عبارتی، فولاد و بتن تا زمان شکست در اندرکنش کامل می‌باشند.

## ۶- مطالعه پارامتری آزمایشگاهی

به منظور درک بهتر ظرفیت باقی مانده ستون‌های CFST پس از آتش پارامترهای کلیدی مؤثری نظیر شکل سطح مقطع، نسبت خروج از مرکزیت بار، نسبت لاغری و پوشش محافظت در برابر آتش مورد بررسی قرار گرفته شده است.

### ۶-۱- شکل سطح مقطع

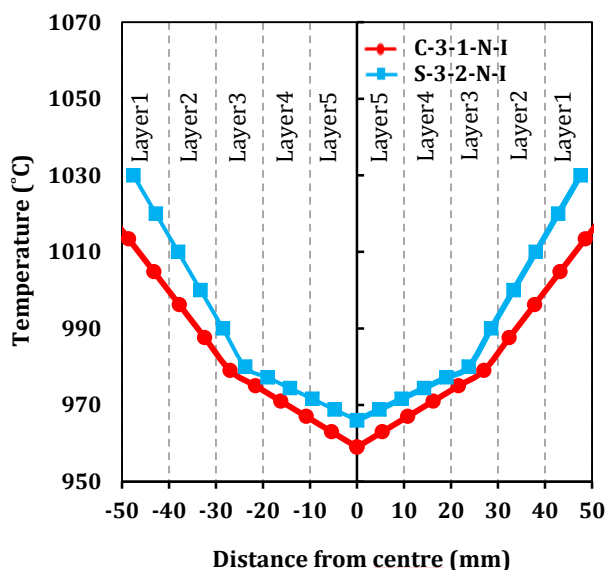
بر طبق نتایج به دست آمده از آزمایش کوره، توزیع دما در هسته بتنی دارای گرادین حرارتی هست. پروفیل دمایی در سطح مقطع هسته بتنی با برازش یک سهمی به صورت ذیل رسم گردیده است (شکل (۲)). با مقایسه پروفیل دمایی سطح مقطع ستون‌های محافظت نشده با ستون‌های محافظت شده می‌توان دریافت: ستون‌های محافظت شده با سطح مقطع دایره‌ای نسبت به مقاطع مربعی دمای کمتری را در آزمایش کوره به دست آورده‌اند، این در حالی است که هردو مقطع مدت زمان یکسانی در برابر آتش قرار گرفته‌اند. این امر می‌تواند ناشی از این مسئله باشد که ستون با مقطع مربعی محافظت شده دمای بیشتری (شکل (۲-الف)) کسب کرده است بنابراین تخریب بیشتر خواص مواد در سطح مقطع مربعی اتفاق افتاده باشد و در نهایت

منجر به کاهش قابل توجه بار نهایی شکست در این سطح مقطع شده است.

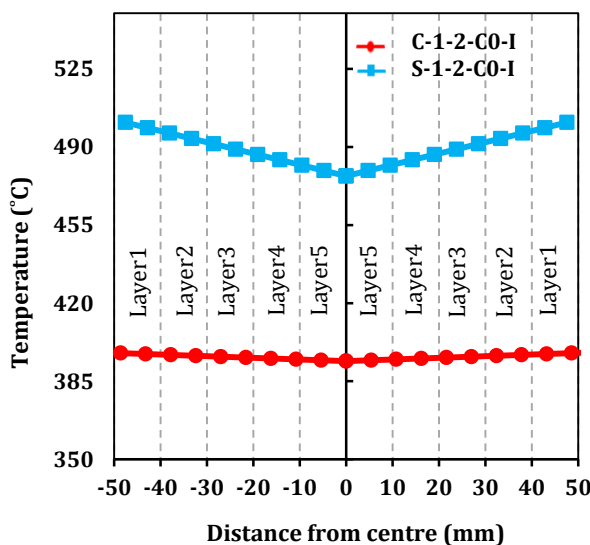
### ۶-۲- نسبت لاغری

نسبت لاغری،  $\lambda$  برای ستون‌های مرکب بر طبق رابطه Han برای ستون‌های مرکب با سطح مقطع دایره‌ای و مربعی به ترتیب با روابط  $\lambda_{Han} = 4L_e/d$  و  $\lambda_{Han} = 2\sqrt{3}L_e/b$  تعریف شده است که  $L_e$  طول مؤثر ستون است و  $d$  قطر کلی ستون دایره‌ای است و  $b$  عرض کلی ستون مربعی است. در این مطالعه پارامتری، نسبت لاغری ستون‌ها CFST بر طبق رابطه Han ۱۰/۵ و ۳۵ هست. تأثیر نسبت لاغری در رابطه بار در مقابل تغییر مکان جانبی وسط ارتفاع ستون (چپ) و تغییر مکان محوری (راست) با نسبت خروج از مرکزیت ۰، ۰/۲۵ و ۰/۵ و برای ستون‌ها CFST بدون محافظت با مقاطع مربعی و دایره‌ای در شکل (۳) نشان داده شده است.

بررسی‌ها نشان می‌دهد با افزایش نسبت لاغری و نسبت خروج از مرکزیت، تغییر مکان محوری و جانبی در وسط ارتفاع ستون افزایش می‌یابد. علاوه بر آن، با افزایش نسبت لاغری بار شکست نهایی ستون کاهش یافته است.

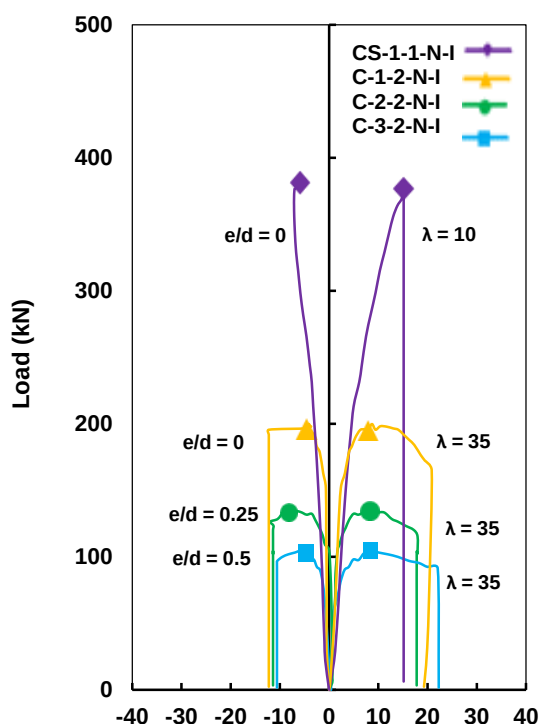


ب) محافظت نشده

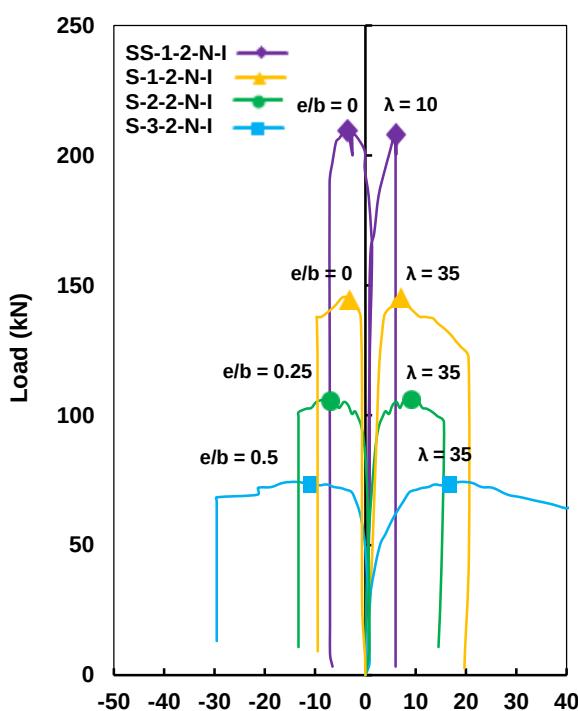


الف) محافظت شده

شکل ۲- پروفیل دمایی مشاهده شده برای نمونه‌های مربعی و دایره‌ای

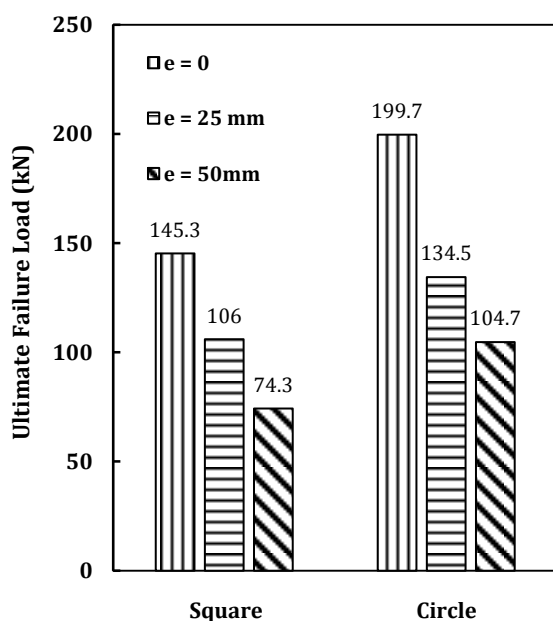


ب) مقاطع مربعی



الف) مقاطع دایره‌ای

شکل ۳- تأثیر نسبت لاغری در رابطه بار در مقابل تغییر مکان، برای مقاطع مربعی و دایره‌ای



شکل ۴- تأثیر خروج از مرکزیت، روی بار شکست نهایی ستون پس از آتش

محافظت‌شده و محافظت نشده با مقاطع دایره‌ای و مربعی نسبت به ستون‌های بدون گرمایش می‌توان دریافت (شکل ۵):

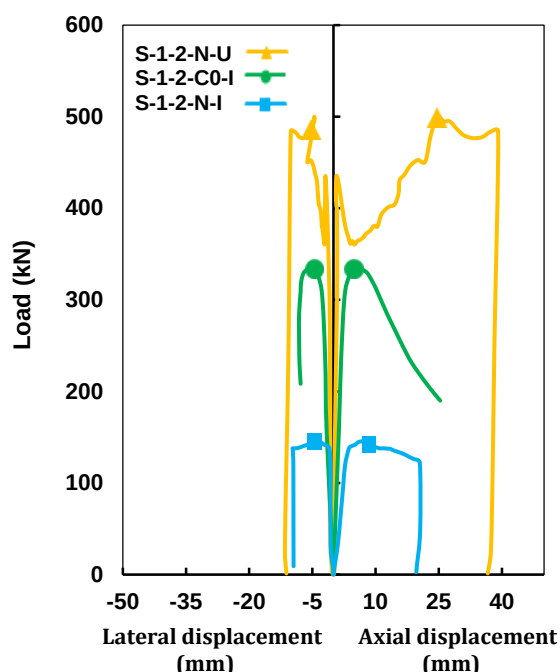
### ۳-۶- خروج از مرکزیت بار

در شکل (۴)، تأثیر خروج از مرکزیت بار، بر ظرفیت باربری ستون‌های CFST با مقاطع دایره‌ای و مربعی نشان داده شده است. مطابق این نمودار بار نهایی شکست ستون‌های CFST با نسبت خروج از مرکزیت ۰/۲۵ و ۰/۵ نسبت به ستون‌های CFST با بارگذاری متمرکز حدوداً ۵۰٪ کاهش یافته است. نکته قابل توجه دیگر در این نمودار، نزدیک بودن مقادیر بار نهایی شکست ستون باوجود تغییر در خروج از مرکزیت بار هست. به عنوان مثال، با افزایش ۲۵٪ نسبت خروج از مرکزیت، کاهش ۳۰٪ بار نهایی شکست ایجاد شده است، درحالی‌که با تغییرات دو برابری خروج از مرکزیت (افزایش ۵۰٪)، کاهش ۴۸٪ بار نهایی شکست مشاهده شده است که نشان‌دهنده تأثیر کمتر تغییر در مقدار نسبت خروج از مرکزیت نسبت به تأثیر نسبت خروج از مرکزیت بر کاهش بار نهایی شکست ستون‌های CFST پس از آتش هست.

### ۴-۶- پوشش محافظتی در برابر آتش

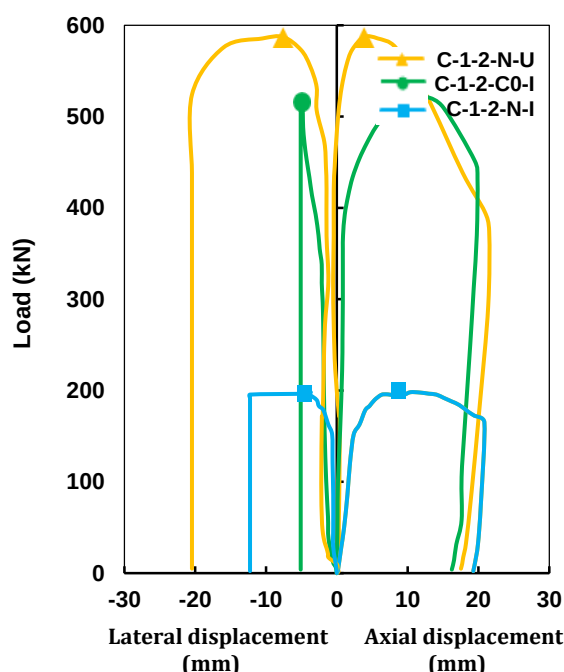
با مقایسه منحنی‌های بار در مقابل تغییر مکان جانبی وسط ارتفاع ستون (چپ) و تغییر مکان محوری (راست)، ستون‌های CFST

گرمایش حفظ شده است. در واقع با افزایش یافتن دمای بیشینه تجربه شده در مقاطع محافظت نشده تخریب بیشتر خواص مصالح در سطح مقطع اتفاق افتاده و در نهایت کاهش قابل توجه بار نهایی شکست ستون‌های CFST محافظت نشده در برابر آتش مشاهده شده است.



شکل ۵-ب) مقاطع مربعی

ستون‌های CFST محافظت شده با مقاطع دایره‌ای و مربعی در برابر آتش می‌توانند بین ۷۰ تا ۹۰ درصد ظرفیت باربری ستون‌های CFST بدون گرمایش را حفظ نمایند، در صورتی که در مقاطع محافظت نشده در برابر آتش با مقاطع دایره‌ای و مربعی تنها ۳۰ درصد از ظرفیت باربری ستون‌های بدون



شکل ۵-الف) مقاطع دایره‌ای

شکل ۵- بار در مقابل تغییر مکان‌های جانبی در وسط دهانه (چپ) یا تغییر مکان‌های محوری (راست) برای ستون‌های مربعی و دایره‌ای

از مرکزیت موجود در ادبیات [۴ و ۹-۱۱] با استفاده از تحلیل رگرسیون (شکل ۶) برای نمونه‌های با نسبت لاغری ۲۰ و ۳۵، ضرایب کاهش،  $X_r$ ، طبق رابطه (۱) و (۲) پیشنهاد شده است.

$$X_r = \frac{1}{(1 + 1/82 \times e/d)} \quad e/d < 0.5, \quad (1)$$

$$\lambda_{Han} = 35$$

$$X_r = \frac{1}{(1 + 3/38 \times e/d)} \quad e/d < 0.5, \quad (2)$$

$$\lambda_{Han} = 20$$

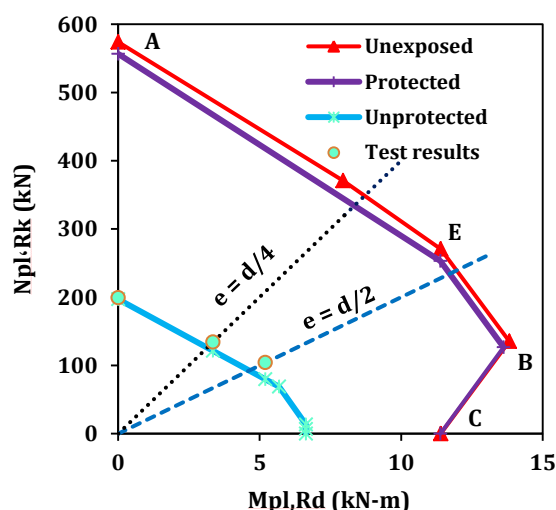
روش دوم: در این روش نمونه‌ها تحت ترکیبی از فشار و خمش یک‌طرفه بر اساس تحلیل مرتبه دوم، طبق بند ۶-۳-۷-۶ یورو کد ۴ بخش ۱-۱ [۸]، مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. منحنی اندرکنش بار در مقابل لنگر برای ستون‌های CFST تحت شرایط محیطی (بدون قرار گرفتن در معرض آتش) و در برابر آتش به صورت محافظت شده و محافظت نشده طبق بند ۶-۳-۷-۶ تعریف شده است (شکل ۷). بررسی‌ها نشان می‌دهد، هرچند

## ۷- پیش‌بینی مقاومت باقی‌مانده پس از آتش

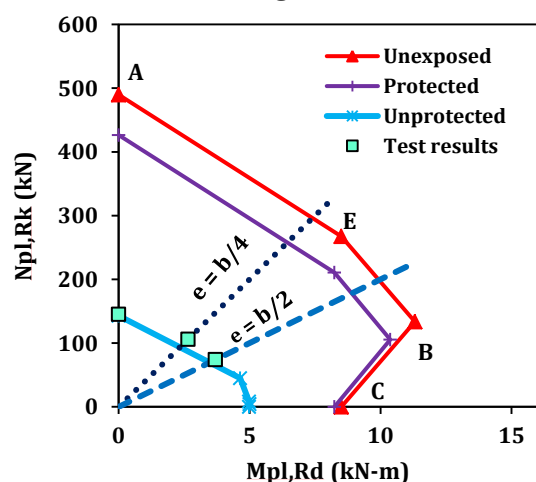
بر اساس ادبیات گذشته، محاسبه مقاومت باقی‌مانده ستون‌های CFST از روش‌های متعددی می‌تواند به دست آید [۴-۷]. مطالعه کنونی اصلاح روش‌های متداول و ساده‌شده بر اساس یورو کد ۴ در دمای محیط و دمای بالا مورد توجه قرار گرفته است.

روش اول: در این روش پیشنهادی، پیش‌بینی مقاومت باقی‌مانده پس از آتش ستون‌های CFST بر اساس بند ۷،۳،۶ یورو کد ۴ قسمت ۱-۱ [۸]، محاسبه شده است. بررسی‌های عددی Liu و همکارانش [۴] نشان داده است که ظرفیت باربری باقی‌مانده ستون‌های CFST تحت خروج از مرکزیت، به‌طور عمده به مقدار خروج از مرکزیت بار بستگی دارد. از طرفی نتایج آزمایشگاهی به دست آمده نشان می‌دهد، ظرفیت باقی‌مانده با افزایش نسبت لاغری کاهش قابل توجهی داشته است. در این پژوهش، بر اساس نتایج آزمایشگاهی ستون‌های CFST با خروج





الف) مقاطع دایره‌ای



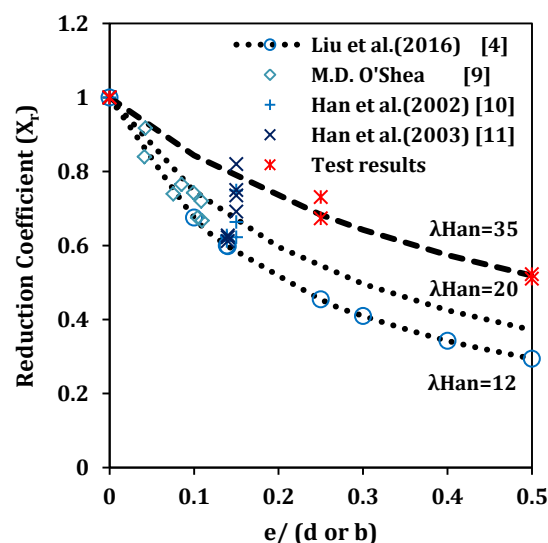
ب) مقاطع مربعی

شکل ۷- منحنی اندرکنش بار در مقابل لنگر برای ستون‌های CFST

برای ستون‌های CFST با مقاطع دایره‌ای و مربعی بر اساس روش اول به ترتیب ۵/۱۵٪ و ۰/۰۹٪ کمتر از حد پیش‌بینی و برای روش دوم به ترتیب ۱۷/۱۳٪ و ۱/۸۶٪ کمتر از حد پیش‌بینی هست؛ اما برای حالت سوم MPE، پیش‌بینی بار شکست به ترتیب ۹٪ و ۲۰٪ بالاتر از حد پیش‌بینی هست. با مقایسه بین روش‌های پیشنهادی پیش‌بینی مقاومت باقی‌مانده پس از آتش، مشاهده می‌شود: در روش اول انحراف معیار خطای پیش‌بینی برای ستون‌های CFST با مقاطع دایره‌ای و مربعی به ترتیب ۲۰٪ و ۲۲٪ هست، به این معنی که خطای میانگین رویکرد پیش‌بینی ۰/۲۵ و ۰/۰۴ انحراف معیار، پایین تراز خط ۱:۱ هست. به عبارتی این رویکرد محافظه‌کارانه محسوب می‌شود (شکل ۸).

در روش دوم مقدار انحراف معیار خطای پیش‌بینی برای

نتایج آزمایشگاهی در مقایسه با منحنی اندرکنش محافظه‌کارانه هست؛ اما پیش‌بینی منطقی برای ظرفیت باقی‌مانده نمونه‌های ستون‌های CFST محافظت نشده پس از آتش تحت خروج از مرکزیت مشاهده شده است.



شکل ۶- ضریب کاهش پیشنهادی مطابق با نتایج آزمایشگاهی

[۴ و ۹-۱۱]

روش سوم: برای محاسبه مقاومت در برابر آتش ستون‌های CFST بدون محافظت، در پیوست اچ یورو کد ۴ [۱۲] به‌طور خاص، مدلی ساده ارائه شده است. در این روش، کرنش محوری کل سطح مقطع ستون CFST (فولاد و بتن) یکسان فرض شده است. یعنی بدون خمش و حداقل خروج از مرکزیت هست. باید یادآوری کنیم که این روش قابلیت پیش‌بینی بارگذاری با خروج از مرکزیت را ندارد. بنابراین پیشنهاد شده برای پیش‌بینی ظرفیت باربری ستون با خروج از مرکزیت، رابطه  $N_{axi,t}$  (۳) بکار گرفته شود مقطع:

$$N_{axi,t} = X_r \times N_{U,T} \quad (3)$$

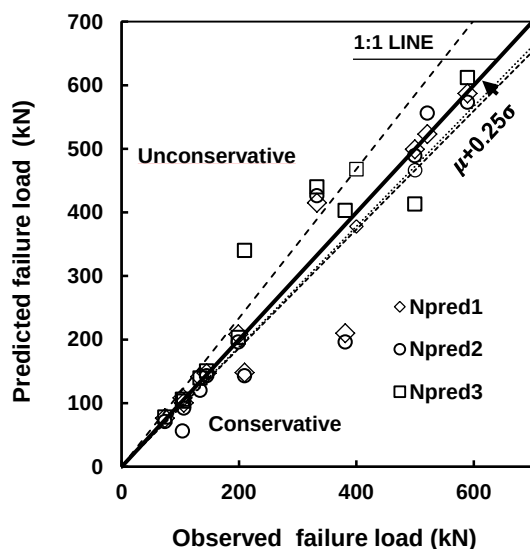
$N_{U,T}$ ، ظرفیت ستون CFST با بارگذاری متمرکز می‌باشد.

## ۸- پیش‌بینی نتایج

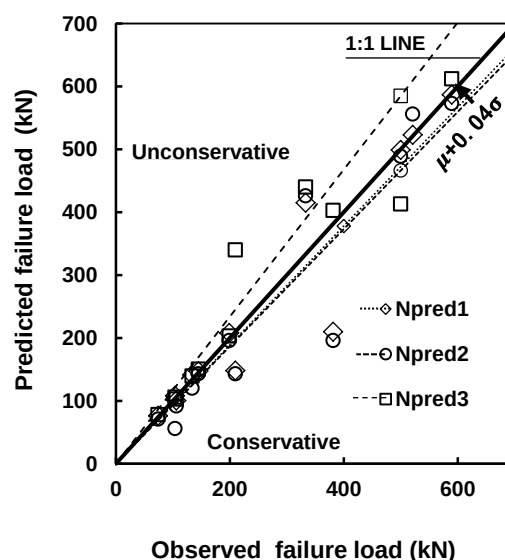
در این مطالعه، مقایسه بین رویکردهای مختلف پیش‌بینی ظرفیت باقیمانده ستون‌های CFST با مقاطع دایره‌ای و مربعی پس از آتش نسبت به خط ۱:۱ و بر اساس معیارهای آماری محافظه‌کاری، دقت و صحت به‌منظور انتخاب بهترین روش پیش‌بینی با صحت و دقت بالا، صورت گرفته است. طبق جدول (۱) میانگین درصد خطا، MPE<sup>۳</sup> پیش‌بینی بار شکست

جدول ۱- نتایج پیش‌بینی بار شکست برای ستون‌های CFST با مقاطع مربعی و دایره‌ای

| نام ستون*                                                                                                                                                    | آزمایش $N$<br>(kN) | آزمایش $N_{pred1}$<br>پیش‌بینی ۱<br>(kN) | آزمایش $N_{pred2}$<br>پیش‌بینی ۲<br>(kN) | آزمایش $N_{pred3}$<br>پیش‌بینی ۳<br>(kN) | پیش‌بینی ۱ | پیش‌بینی ۲ | پیش‌بینی ۳ |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|------------------------------------------|------------------------------------------|------------------------------------------|------------|------------|------------|
| مربعی                                                                                                                                                        | C-1-2-N-N          | ۵۸۷                                      | ۵۷۳                                      | ۶۱۲                                      | -۰/۴۴٪     | -۲/۸۲٪     | ۳/۸٪       |
|                                                                                                                                                              | C-1-2-C0-I         | ۵۲۱                                      | ۵۲۳                                      | ۷۲۸                                      | ۰/۳۸٪      | ۶/۷۳٪      | ۳۹/۷۳٪     |
|                                                                                                                                                              | C-1-2-N-I          | ۱۹۹                                      | ۲۰۸                                      | ۲۰۳                                      | ۴/۵۲٪      | -۱/۵۱٪     | ۲/۰۱٪      |
|                                                                                                                                                              | C-2-2-N-I          | ۱۳۴                                      | ۱۴۱/۴۴                                   | ۱۳۹                                      | ۵/۵۵٪      | -۱۰/۴۵٪    | ۳/۹۹٪      |
|                                                                                                                                                              | C-3-2-N-I          | ۱۰۴                                      | ۱۰۸/۱۶                                   | ۱۰۶                                      | ۴/۰۰٪      | -۴۶/۱۵٪    | ۱/۷۶٪      |
|                                                                                                                                                              | CS-1-1-N-I         | ۳۸۱/۳۲                                   | ۲۱۰                                      | ۱۹۶                                      | -۴۴/۹۳٪    | -۴۸/۶۰٪    | ۵/۶۹٪      |
| میانگین درصد خطا                                                                                                                                             |                    |                                          |                                          |                                          |            |            |            |
| انحراف معیار درصد خطا                                                                                                                                        |                    |                                          |                                          |                                          |            |            |            |
| دایره‌ای                                                                                                                                                     | S-1-2-N-N          | ۴۹۹                                      | ۴۸۹                                      | ۴۱۳                                      | -۰/۱۶٪     | -۲/۱۶٪     | -۱۷/۳۷٪    |
|                                                                                                                                                              | S-1-2-C0-I         | ۳۳۳                                      | ۴۱۵                                      | ۴۴۰                                      | ۲۴/۶۲٪     | ۲۷/۹۳٪     | ۳۲/۱۳٪     |
|                                                                                                                                                              | S-1-2-N-I          | ۱۴۵                                      | ۱۴۷                                      | ۱۵۱                                      | ۱/۳۸٪      | -۱/۳۸٪     | ۳/۷۹٪      |
|                                                                                                                                                              | S-2-2-N-I          | ۱۰۶                                      | -                                        | -                                        | -۵/۲۷٪     | -۱۳/۲۱٪    | -۳/۰۱٪     |
|                                                                                                                                                              | S-3-2-N-I          | ۷۴                                       | -                                        | -                                        | ۳/۰۴٪      | -۴/۰۵٪     | ۵/۴۹٪      |
|                                                                                                                                                              | SS-1-1-N-I         | ۲۰۹/۸                                    | ۱۴۸                                      | ۱۴۳                                      | -۲۹/۴۶٪    | -۳۱/۴۸٪    | ۶۲/۰۶٪     |
| میانگین درصد خطا                                                                                                                                             |                    |                                          |                                          |                                          |            |            |            |
| انحراف معیار درصد خطا                                                                                                                                        |                    |                                          |                                          |                                          |            |            |            |
| * نام ستون‌ها، با توجه به پارامترهای مؤثر بر مقاومت باقی‌مانده پس از آتش: شکل سطح مقطع، اثر خروج از مرکزیت بار، لاغری نسبی، پوشش محافظتی انتخاب شده است [۲]. |                    |                                          |                                          |                                          |            |            |            |



ب) مقاطع مربعی



الف) مقاطع دایره‌ای

شکل ۸- ظرفیت باربری باقی‌مانده پس از آتش پیش‌بینی شده در مقابل مشاهده شده برای ستون‌های CFST با مقاطع مربعی و دایره‌ای





ستون‌های CFST با مقاطع دایره‌ای و مربعی به ترتیب ۲۴٪ و ۲۴٪ هست، به این معنی که خطای میانگین رویکرد پیش‌بینی به ترتیب ۰/۷۱ و ۰/۰۸ انحراف معیار، پایین تراز خط ۱:۱ هست که می‌توان این رویکرد را هم به‌عنوان روشی محافظه‌کارانه در نظر گرفت و اما روش سوم، در این روش مشاهده‌شده است که مقدار انحراف معیار خطای پیش‌بینی برای ستون‌های CFST با مقاطع دایره‌ای و مربعی به ترتیب ۱۵٪ و ۳۵٪ هست به عبارتی خطای میانگین رویکرد پیش‌بینی به ترتیب ۰/۶٪ و ۰/۶٪ انحراف معیار بالاتر از خط ۱:۱ هست که روشی نسبتاً محافظه‌کارانه در مقایسه با سایر روش‌ها برشمرده می‌شود.

## ۹- نتیجه‌گیری

در این مقاله، رفتار پس از آتش ستون‌های لوله‌ای توخالی پرشده از بتن CFST، با مقاطع دایره‌ای و مربعی به‌طور آزمایشگاهی بررسی شده است. ۱۲ نمونه در این برنامه آزمایشگاهی پس از قرار گرفتن تحت شرایط آتش استاندارد ایزو ۸۳۴ شامل فاز گرمایش و سرمایش، بارگذاری شده‌اند.

در مورد مقاطع محافظت‌شده در برابر آتش، تأثیر شکل سطح مقطع بر ظرفیت مقاومت باقی‌مانده ستون نسبت به حالت‌های محیطی و محافظت نشده قابل‌توجه‌تر هست. با مقایسه دمای توزیع‌شده در سطح مقاطع دایره‌ای و مربعی می‌توان دریافت: بیشینه دمای توزیع‌شده در سطح مقطع دایره‌ای نسبت به مقطع مربعی کمتر هست؛ بنابراین با تخریب کمتر خواص مصالح سطح مقطع، انتظار ظرفیت باقی‌مانده بیشتری می‌رود.

برای تعیین ظرفیت باقی‌مانده ستون‌های CFST تحت بارگذاری با خروج از مرکزیت، ضریب کاهش  $X_r$  در قالب معادله‌ای ساده پیشنهادشده است.

با مقایسه ستون‌های CFST، محافظت‌شده و محافظت نشده با مقاطع دایره‌ای و مربعی نسبت به ستون‌های بدون گرمایش می‌توان دریافت: ظرفیت باقی‌مانده ستون محافظت‌شده با مقاطع دایره‌ای و مربعی بین ۷۰ تا ۹۰ درصد ظرفیت ستون‌های بدون گرمایش است. در صورتی که ظرفیت باقی‌مانده ستون CFST محافظت نشده با مقاطع دایره‌ای و مربعی تنها ۳۰ درصد ظرفیت ستون‌های بدون گرمایش است.

از نظر پیش‌بینی مقاومت باقی‌مانده ستون‌های CFST با مقاطع دایره‌ای و مربعی پس از آتش، روش اول بر اساس روش اصلاح‌شده یورو کد ۴ (۱-۱)، به‌عنوان بهترین روش پیش‌بینی شناخته‌شده است. در این مورد میانگین درصد خطا، ستون‌های

CFST برای مقاطع دایره‌ای و مربعی به ترتیب ۵/۱۵- و ۰/۹- هست، انحراف معیار خطای پیش‌بینی به ترتیب ۲۰٪ و ۲۲٪ هست، به‌طوری‌که میانگین خطای پیش‌بینی به ترتیب ۰/۲۵ و ۰/۰۴ انحراف معیار پایین تراز خط ۱:۱ هست که به‌عنوان روش پیش‌بینی، محافظه‌کارانه محسوب شده است.

## ۱۰- تقدیر و تشکر

در پایان نویسندگان این مقاله لازم می‌دانند، از همکاری آقای مهندس جمالی و همکاری‌اش در بخش مهندسی آتش و آقای مهندس رئیس قاسمی و همکاری‌اش در بخش بتن و آقای مهندس عباسی در بخش مهندسی سازه مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی در ارائه خدمات موردنیاز این کار تحقیقاتی قدردانی نمایند.

## ۱۱- مراجع

- [1] کامانی، ف. مزروعی، ع. و بختیاری، س. (۱۳۹۶)، "مطالعه آزمایشگاهی ستون‌های لوله‌ای فولادی پرشده با بتن (CFST) با مقطع مربعی پس از آتش"، هشتمین کنفرانس ملی سازه و فولاد.
- [2] کامانی، ف. مزروعی، ع. و بختیاری، س. (۱۳۹۶)، "مقاومت باقی‌مانده پس از آتش ستون‌های لوله‌ای فولادی پرشده با بتن (CFST) با مقطع دایره‌ای تحت خروج از مرکزیت‌های بزرگ"، هشتمین اجلاس ملی سازه و فولاد.
- [3] ISO 834, (1999), fire resistance tests-elements of building construction, Geneva, Switzerland.
- [4] Liu, F., Yang, H. and Gardner, L. (2016), "Post-fire behaviour of eccentrically loaded reinforced concrete columns confined by circular steel tubes", Journal of Constructional Steel Research, Vol. 122, pp. 495-510.
- [5] Han, L.H., Huo, J.S. and Yang, Y.F. (2002), "Concrete-filled HSS columns after exposure to the ISO-834 standard fire", Advances in Steel Structures, Vol. II, pp. 1127-1135.
- [6] Han, L.H. and Huo, J.S. (2003), "Concrete-filled hollow structural steel columns after exposure to ISO-834 fire standard", Journal of Structural Engineering, Vol. 129, pp. 68-78.
- [7] Rush, D.I., Bisby, L.A., Jowsey, A. and Lane, B. (2015), "Residual capacity of fire-exposed concrete-filled steel hollow section columns", Engineering Structures, Vol. 100, pp. 550-563.
- [8] CEN. BS EN 1994-1-1, (2009), Eurocode 4-design of composite steel and concrete structures-Part 1-1: General rules and rules for buildings, Brussels, Belgium.
- [9] O'Shea, M.D. and Bridge, R.Q. (2000), "Design of circular thin-walled concrete filled steel tubes", Journal of Structural Engineering, Vol. 126, pp. 1295-1303.
- [10] Han, L.H., Yang, Y.F., Yang, H. and Huo, J.S. (2002), "Residual strength of concrete-filled RHS columns after exposure to the ISO-834 standard fire", Thin-Wall Structures, Vol. 40, pp. 991-1012.
- [11] Han, L.H., Zhao, X.L., Yang, Y.F. and Feng, J.B. (2003), "Experimental study and calculation of fire resistance of concrete-filled hollow steel columns", Journal of



composite steel and concrete structures-Part 1-2:  
General rules-structural fire design, Brussels, Belgium.

Structural Engineering, Vol. 129, pp. 346-356.  
[12] CEN. BS EN 1994-1-2, (2008), Eurocode 4-design of

پی نوشت

<sup>1</sup> Stub

<sup>2</sup> Linear variable displacement transducer

<sup>3</sup> Mean percentage error

