

بررسی آزمایشگاهی ستون‌های لوله‌ای

فولادی پر شده با بتن (CFST) پس از قرار گرفتن در معرض دمای بالا

فاطمه کمائی^۱، سعید بختیاری^{۲*}، علی مزروعی^۳، سید محمد میرحسینی^۴

۱- دانشجوی دکتری عمران گرایش سازه دانشگاه آزاد اسلامی اراک

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

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

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

*bakhtiyari@bhrc.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۳/۲۱

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۰/۳۰

چکیده

پیش‌بینی ظرفیت باربری باقی‌مانده ستون‌های لوله‌ای فولادی پر شده با بتن (CFST) آسیب‌دیده در اثر آتش‌سوزی، با توجه به آثار خروج از مرکزیت بزرگ بار، از جمله موضوعاتی است که کارهای پژوهشی کمی انجام گرفته است. در این پژوهش، نتایج یک سری از آزمایش‌ها ظرفیت باقی‌مانده پس از آتش، برای ستون‌های CFST با سطح مقطع مختلف (دایره‌ای و مربعی)، تحت بارمحوری و با خروج از مرکزیت‌های بزرگ تا مرحله شکست، ارائه شده است. در این برنامه آزمایشگاهی تأثیر پارامترهای از جمله: نوع مقطع عرضی، نسبت لاغری، خروج از مرکزیت بار، پوشش محافظتی در برابر آتش بررسی قرار گرفته است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که ظرفیت باقی‌مانده با افزایش خروج از مرکزیت کاهش می‌یابد در این پژوهش، ضرایب کاهش برای برآورد ظرفیت باقی‌مانده ستون‌های CFST با خروج از مرکزیت بار، براساس نتایج آزمایش‌های قبلی پیشنهاد شده است. با افزایش دما سطح مقطع ستون‌های CFST به‌طور ویژه سختی محوری و ظرفیت بارمحوری کاهش می‌یابد.

در نهایت، بر اساس نتایج آزمایش‌های صورت گرفته، قابلیت روش‌های پیش‌بینی ظرفیت باربری باقی‌مانده ستون‌های توخالی پر شده با بتن پس از قرار گرفتن در معرض آتش استاندارد ایزو ۸۳۴، بر اساس روش‌های اصلاح‌شده طراحی موجود در یورو کد ۴ در وضعیت آتش و دمای محیط ارزیابی شده است. بررسی‌ها نشان داد که روش پیشنهادی اصلاح‌شده یورو کد ۴، برای پیش‌بینی مقاومت باقی‌مانده ستون‌ها CFST پس از قرار گرفتن در معرض آتش، تحت بارگذاری با خروج از مرکز و مرکزی بهترین روش پیش‌بینی را ارائه می‌نماید. بر اساس این روش میانگین درصد خطا پیش‌بینی مقاومت باقی‌مانده ستون‌ها CFST برای بارگذاری به‌صورت بدون خروج از مرکز و با خروج از مرکز به ترتیب به‌طور میانگین ۵/۵۱٪ - و ۳/۰۶٪ - کمتر از حد پیش‌بینی، به‌طور محافظه‌کارانه است. به عبارتی، خطای میانگین رویکرد پیش‌بینی به ترتیب ۰/۲۵ و ۰/۱۷ انحراف معیار، پایین تراز خط ۱:۱ است.

واژگان کلیدی: ستون لوله‌ای فولادی پر شده با بتن (CFST)، ظرفیت باقی‌مانده، پس از آتش، پیش‌بینی، خروج از مرکزیت.

۱- مقدمه

از آنجاکه این نوع ستون ترکیبی از فولاد و بتن با یکدیگر هست بنابراین، از مزایای سودمند هر دو مصالح برخوردار است. لوله فولادی در این نوع ستون‌ها، CFST تأمین‌کننده مزیت‌های ازجمله: خاصیت نرمی (شکل‌پذیری)، مقاومت کششی بالا، اثر حفاظتی از هسته بتن در معرض مستقیم آتش و ممانعت از پوسته‌پوسته شدن بتن، قالب‌بندی برای هسته بتنی در حین ساخت است و همچنین هسته بتنی با ویژگی‌های ذاتی ازجمله اثر فروکشی‌کنندگی حرارت، مقاومت در برابر آتش را افزایش می‌دهد؛ بنابراین، ضخامت پوشش محافظتی موردنیاز در برابر آتش کاهش می‌یابد، به علاوه سختی قابل توجه بتن از کماتش کلی مقطع توخالی جلوگیری می‌نماید. درحالی‌که رفتار ستون CFST در دمای اتاق به‌خوبی قابل پیش‌بینی و شناخته‌شده است؛ اما پیش‌بینی تعیین لحظه فروریزش سازه برای سازه‌های که در معرض آتش قرار می‌گیرند، یکی از مسائل چالش‌برانگیز در مهندسی آتش هست. از آنجا که مقدار آسیب برای سازه‌های در معرض آتش تا حدودی قابل تحمل هست، در آیین‌نامه BS 5950 [1] معیارهای برای تعیین خرابی سازه به هنگام آتش‌سوزی ارائه‌شده است. به عنوان نمونه: برای تیرها، در صورتی‌که خیز تیرها به بیشینه $\frac{1}{40}$ دهانه برسد یا برای خیزهای بزرگ‌تر از $\frac{1}{30}$ دهانه، آهنگ خیز تیر از مجذور دهانه تقسیم بر ۹۰۰۰ برابر عمق عضو تجاوز نکند و همچنین برای ستون‌ها، در صورتی‌که بیشینه تغییر شکل جانبی ستون در حدود ۱۲۰ میلی‌متر رخ دهد. بررسی‌ها نشان می‌دهد، تحلیل رفتاری ستون‌های CFST و پیش‌بینی مدهای شکست احتمالی در وضعیت پس از آتش با توجه به تخریب خواص مواد در اثر آتش با دشواری بیشتری همراه است. با توجه به اینکه در دستورالعمل‌های طراحی موجود، پیش‌بینی مقاومت ستون‌های CFST در برابر آتش و دمای محیط موردتوجه بوده است و نه ظرفیت باربری باقی‌مانده و از طرفی دیگر کارهای انجام‌شده در مورد پیش‌بینی مقاومت باقی‌مانده ستون‌های مرکب CFST پس از آتش نسبتاً کم هست به‌عنوان نمونه، پژوهش‌های انجام‌شده توسط هان و همکاران (۲۰۰۲-۲۰۰۵) [2-4] هست که با توسعه مدل‌های مصالح باقی‌مانده، شاخصی را برای پیش‌بینی

مقاومت باقی‌مانده، RSI_2 ستون‌های CFST ارائه داده‌اند و یا پژوهش‌های انجام‌گرفته توسط لی‌یو [5] و راش [6] که سعی کرده‌اند با توسعه روش‌های پیش‌بینی مقاومت ستون‌های CFST در دمای محیط و در دمای بالاتر طبق آیین‌نامه یورو کد ۴، روشی را برای پیش‌بینی مقاومت باقی‌مانده پس از آتش ارائه دهند که در کل نشان‌دهنده ضرورت و اهمیت پرداختن به این موضوع هست.

۲- برنامه آزمایشگاهی

در این پژوهش ۱۲ آزمون با سطح مقطع مربعی و دایره‌ای به ترتیب با عرض مقطع ۱۰۰ میلی‌متر و ۱۱۴ میلی‌متر و ضخامت $\frac{2}{43}$ میلی‌متر و ۳ میلی‌متر آزمایش شده است. طول تمام آزمون‌ها (به جز آزمون ستون کوتاه ۳ که دارای طول ۳۰۰ میلی‌متر است)، ۱۰۰۰ میلی‌متر است، مقاومت تسلیم فولاد مقاطع فولادی مربعی ۲۵۸ مگا پاسکال و دایره‌ای ۳۱۹ مگا پاسکال است. لوله‌ها با بتن مقاومت معمولی (مقاومت فشاری ۲۸ روزه $\frac{44}{3}$ مگا پاسکال)، پرشده است. برای نام‌گذاری آزمون‌های از پارامترهای مؤثر بر مقاومت باقی‌مانده پس از آتش شامل: شکل سطح مقطع، اثر خروج از مرکزیت بار، لاغری نسبی، پوشش محافظتی استفاده‌شده است، جدول (۱) شیوه نام‌گذاری را نشان داده است.

۲-۱- در معرض آتش

آزمون‌ها در کوره مکعبی $1 \times 1 \times 1 \text{ m}$ در بخش مهندسی آتش مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی در معرض آتش قرار داده‌شده. دمای حاکم بر محیط قبل از آزمایش گرمایش ۲۰ درجه سلسیوس و دمای کوره بر اساس منحنی آتش استاندارد ایزو ۸۳۴ [7]، افزایش‌یافته است. جزئیات دمای سطح مقطع ستون‌های CFST که توسط ترموکوپل‌های نصب‌شده در لوله فولادی و در سه عمق درون بتن نسبت به مرکز ستون (سطح بتن، عمق ۲۵ میلی‌متر و مرکز بتن)، اندازه‌گیری و در جدول (۲) آورده شده است.

۲-۲- آزمایش‌های سازه‌ای

نمونه‌ها با جک هیدرولیکی ۱۰۰۰ کیلو نیوتنی به صورت بدون خروج از مرکزیت و با خروج از مرکزیت بارگذاری شده‌اند، تکیه گاه‌ها به صورت مفصلی (شکل ۱) است.

جدول ۱. جزئیات نام‌گذاری ستون‌های مورد آزمایش

T	W	X	Y	Z
Cross-section shape	Load Eccentricity	Slenderness ratio	Protection	Expose Fire
S = Square Column	1 (e/D (or B) = 0)	$\lambda=10.5$	1	N = Unheated
C = Circle Column	2 (e/D (or B) = 0.25)	$\lambda=35$	2	I = ISO 834
SS = Square stub	3 (e/D (or B) = 0.5)		N= Unprotected Co= Coating	
CS = Circle stub				

Table 1. Details naming scheme for the columns tested (for example T-W-X-Y-Z: C-2-2-N-I)

جدول ۲. جزئیات مصالح، بیشینه دماهای ثبت‌شده در جداره مقطع فولادی و هسته بتنی در طی آزمایش آتش.

Specimen label	Size (B or D) (mm)	Wall thick. (t_s) (mm)	length (L) (mm)	Coating thick. (Co) (mm)	T^a (min)	Peak temperature ($^{\circ}C$) ^b			
						Steel	Conc. face	25 mm	Conc. cent.
C-1-2-N-U	114	3	1000	0	N ^c	20	20	20	20
C-1-2-C0-I	114	3	1000	19	120	441	398	396	394
C-1-2-N-I	114	3	1000	0	120	1068	1024	988	953
C-2-2-N-I	114	3	1000	0	120	1062	1018	984	951
C-3-1-N-I	114	3	1000	0	120	1061	1022	979	958
CS-1-1-N-I	114	3	300	0	120	*	*	*	*
S-1-2-N-U	100	2.43	1000	0	N	20	20	20	20
S-1-2-C0-I	100	2.43	1000	17	120	526	501	489	477
S-1-2-N-I	100	2.43	1000	0	120	1078	1043	1008	974
S-2-2-N-I	100	2.43	1000	0	120	1071	1028	999	970
S-3-2-N-I	100	2.43	1000	0	120	1056	1031	978	966
SS-1-1-N-I	100	2.43	300	0	120	*	*	*	*

 Table 2. Testing matrix and maximum temperatures recorded in steel tube and the concrete core during fire testing.^a The duration of the exposure to the fire, ^b average maximum temperature at thermocouples, ^c the unheated columns, * the thermocouple is not used in these specimens.

۲-۴ مطالعه پارامتری آزمایشگاهی

به منظور درک بهتر ظرفیت باقیمانده ستون‌های توخالی پرشده با بتن پس از آتش، پارامترهای کلیدی مؤثری مانند شکل سطح مقطع ستون، نسبت خروج از مرکزیت بار، نسبت لاغری و پوشش محافظت در برابر آتش بررسی شده است.

۲-۵ شکل سطح مقطع

ظرفیت فشاری محوری ستون‌های CFST تحت تأثیر عوامل زیادی از جمله: ابعاد هندسی، اشکال، ویژگیهای ماده و ... است [8]. بر طبق جدول (۳) ظرفیت باربری ستون‌های CFST با سطح مقطع دایره‌ای در حالت‌های: بدون گرمایش، در معرض آتش با پوشش محافظت‌شده و بدون محافظت به ترتیب ۱۷٪، ۵۶٪ و ۳۷٪ بیشتر از ستون‌های CFST با مقطع مربعی شکل است. در دمای محیط، می‌توان این امر را ناشی از

در آزمون سازه دو تغییر مکان‌سنج (LVDT)، 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 روی سطح بیرونی نمونه‌ها در وسط ارتفاع ستون برای اندازه‌گیری کرنش طولی نصب شده است. جزئیات چیدمان آزمایش سازه در شکل (۱) نشان داده شده است.

۲-۳ پاسخ کلی سازه

مشاهدات و نتایج منتخب، آزمایش‌های ظرفیت باقی‌مانده شامل: N_{ue} ، بار شکست؛ $\delta_{lateral}$ ، تغییر مکان جانبی در لحظه شکست؛ δ_{axial} ، تغییر مکان محوری در لحظه شکست؛ ϵ_{ave} ، میانگین کرنش محوری در وسط ارتفاع در لحظه شکست، در جدول (۳) آورده شده است.

شکل ۱. جزئیات چیدمان آزمایش سازه

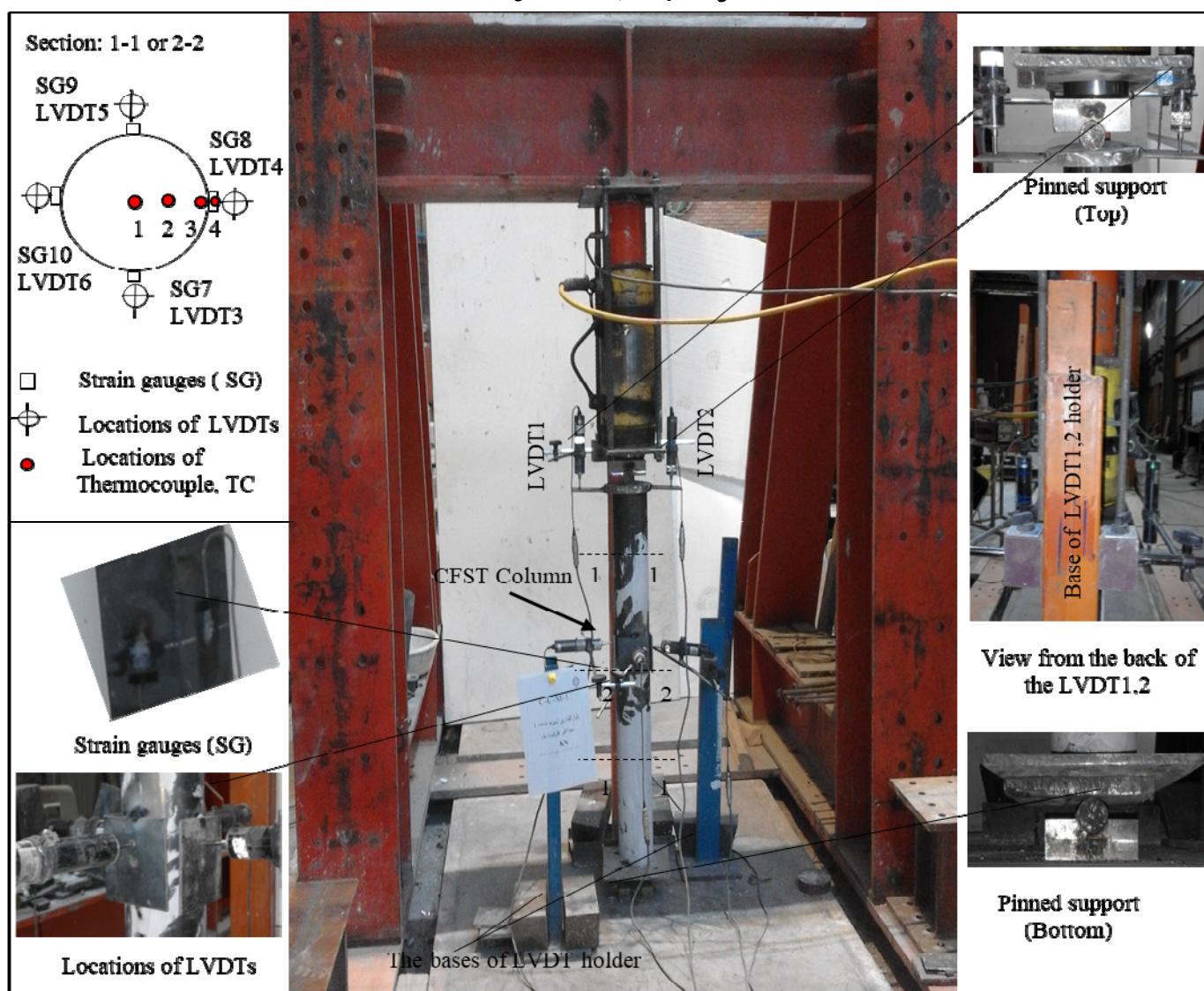


Fig. 1. Structural testing setup details

مساحت مقطع هسته بتن، (با تفاوت کمتر از $1/2\%$)، می‌توان دید که دما در ستون‌های با مقاطع مربعی بیشتر از دمای ستون‌های با مقاطع دایره‌ای است که می‌توان این امر را به کوتاه‌تر بودن فاصله هدایت گرمایی از سطح بتن به سمت مرکز بتن نسبت داد.

۲-۶ خروج از مرکزیت بار

روابط کرنش در مقابل بار برای وسط دهانه ستون با نسبت خروج از مرکزیت‌های مختلف e/D یا e/B برابر 0.05 ، 0.25 ، 0.5 ، 1.0 ، 1.5 ، 2.0 ، 2.5 ، 3.0 ، 3.5 ، 4.0 ، 4.5 ، 5.0 ، 5.5 ، 6.0 ، 6.5 ، 7.0 ، 7.5 ، 8.0 ، 8.5 ، 9.0 ، 9.5 ، 10.0 ، 10.5 ، 11.0 ، 11.5 ، 12.0 ، 12.5 ، 13.0 ، 13.5 ، 14.0 ، 14.5 ، 15.0 ، 15.5 ، 16.0 ، 16.5 ، 17.0 ، 17.5 ، 18.0 ، 18.5 ، 19.0 ، 19.5 ، 20.0 ، 20.5 ، 21.0 ، 21.5 ، 22.0 ، 22.5 ، 23.0 ، 23.5 ، 24.0 ، 24.5 ، 25.0 ، 25.5 ، 26.0 ، 26.5 ، 27.0 ، 27.5 ، 28.0 ، 28.5 ، 29.0 ، 29.5 ، 30.0 ، 30.5 ، 31.0 ، 31.5 ، 32.0 ، 32.5 ، 33.0 ، 33.5 ، 34.0 ، 34.5 ، 35.0 ، 35.5 ، 36.0 ، 36.5 ، 37.0 ، 37.5 ، 38.0 ، 38.5 ، 39.0 ، 39.5 ، 40.0 ، 40.5 ، 41.0 ، 41.5 ، 42.0 ، 42.5 ، 43.0 ، 43.5 ، 44.0 ، 44.5 ، 45.0 ، 45.5 ، 46.0 ، 46.5 ، 47.0 ، 47.5 ، 48.0 ، 48.5 ، 49.0 ، 49.5 ، 50.0 ، 50.5 ، 51.0 ، 51.5 ، 52.0 ، 52.5 ، 53.0 ، 53.5 ، 54.0 ، 54.5 ، 55.0 ، 55.5 ، 56.0 ، 56.5 ، 57.0 ، 57.5 ، 58.0 ، 58.5 ، 59.0 ، 59.5 ، 60.0 ، 60.5 ، 61.0 ، 61.5 ، 62.0 ، 62.5 ، 63.0 ، 63.5 ، 64.0 ، 64.5 ، 65.0 ، 65.5 ، 66.0 ، 66.5 ، 67.0 ، 67.5 ، 68.0 ، 68.5 ، 69.0 ، 69.5 ، 70.0 ، 70.5 ، 71.0 ، 71.5 ، 72.0 ، 72.5 ، 73.0 ، 73.5 ، 74.0 ، 74.5 ، 75.0 ، 75.5 ، 76.0 ، 76.5 ، 77.0 ، 77.5 ، 78.0 ، 78.5 ، 79.0 ، 79.5 ، 80.0 ، 80.5 ، 81.0 ، 81.5 ، 82.0 ، 82.5 ، 83.0 ، 83.5 ، 84.0 ، 84.5 ، 85.0 ، 85.5 ، 86.0 ، 86.5 ، 87.0 ، 87.5 ، 88.0 ، 88.5 ، 89.0 ، 89.5 ، 90.0 ، 90.5 ، 91.0 ، 91.5 ، 92.0 ، 92.5 ، 93.0 ، 93.5 ، 94.0 ، 94.5 ، 95.0 ، 95.5 ، 96.0 ، 96.5 ، 97.0 ، 97.5 ، 98.0 ، 98.5 ، 99.0 ، 99.5 ، 100.0 ، 100.5 ، 101.0 ، 101.5 ، 102.0 ، 102.5 ، 103.0 ، 103.5 ، 104.0 ، 104.5 ، 105.0 ، 105.5 ، 106.0 ، 106.5 ، 107.0 ، 107.5 ، 108.0 ، 108.5 ، 109.0 ، 109.5 ، 110.0 ، 110.5 ، 111.0 ، 111.5 ، 112.0 ، 112.5 ، 113.0 ، 113.5 ، 114.0 ، 114.5 ، 115.0 ، 115.5 ، 116.0 ، 116.5 ، 117.0 ، 117.5 ، 118.0 ، 118.5 ، 119.0 ، 119.5 ، 120.0 ، 120.5 ، 121.0 ، 121.5 ، 122.0 ، 122.5 ، 123.0 ، 123.5 ، 124.0 ، 124.5 ، 125.0 ، 125.5 ، 126.0 ، 126.5 ، 127.0 ، 127.5 ، 128.0 ، 128.5 ، 129.0 ، 129.5 ، 130.0 ، 130.5 ، 131.0 ، 131.5 ، 132.0 ، 132.5 ، 133.0 ، 133.5 ، 134.0 ، 134.5 ، 135.0 ، 135.5 ، 136.0 ، 136.5 ، 137.0 ، 137.5 ، 138.0 ، 138.5 ، 139.0 ، 139.5 ، 140.0 ، 140.5 ، 141.0 ، 141.5 ، 142.0 ، 142.5 ، 143.0 ، 143.5 ، 144.0 ، 144.5 ، 145.0 ، 145.5 ، 146.0 ، 146.5 ، 147.0 ، 147.5 ، 148.0 ، 148.5 ، 149.0 ، 149.5 ، 150.0 ، 150.5 ، 151.0 ، 151.5 ، 152.0 ، 152.5 ، 153.0 ، 153.5 ، 154.0 ، 154.5 ، 155.0 ، 155.5 ، 156.0 ، 156.5 ، 157.0 ، 157.5 ، 158.0 ، 158.5 ، 159.0 ، 159.5 ، 160.0 ، 160.5 ، 161.0 ، 161.5 ، 162.0 ، 162.5 ، 163.0 ، 163.5 ، 164.0 ، 164.5 ، 165.0 ، 165.5 ، 166.0 ، 166.5 ، 167.0 ، 167.5 ، 168.0 ، 168.5 ، 169.0 ، 169.5 ، 170.0 ، 170.5 ، 171.0 ، 171.5 ، 172.0 ، 172.5 ، 173.0 ، 173.5 ، 174.0 ، 174.5 ، 175.0 ، 175.5 ، 176.0 ، 176.5 ، 177.0 ، 177.5 ، 178.0 ، 178.5 ، 179.0 ، 179.5 ، 180.0 ، 180.5 ، 181.0 ، 181.5 ، 182.0 ، 182.5 ، 183.0 ، 183.5 ، 184.0 ، 184.5 ، 185.0 ، 185.5 ، 186.0 ، 186.5 ، 187.0 ، 187.5 ، 188.0 ، 188.5 ، 189.0 ، 189.5 ، 190.0 ، 190.5 ، 191.0 ، 191.5 ، 192.0 ، 192.5 ، 193.0 ، 193.5 ، 194.0 ، 194.5 ، 195.0 ، 195.5 ، 196.0 ، 196.5 ، 197.0 ، 197.5 ، 198.0 ، 198.5 ، 199.0 ، 199.5 ، 200.0 ، 200.5 ، 201.0 ، 201.5 ، 202.0 ، 202.5 ، 203.0 ، 203.5 ، 204.0 ، 204.5 ، 205.0 ، 205.5 ، 206.0 ، 206.5 ، 207.0 ، 207.5 ، 208.0 ، 208.5 ، 209.0 ، 209.5 ، 210.0 ، 210.5 ، 211.0 ، 211.5 ، 212.0 ، 212.5 ، 213.0 ، 213.5 ، 214.0 ، 214.5 ، 215.0 ، 215.5 ، 216.0 ، 216.5 ، 217.0 ، 217.5 ، 218.0 ، 218.5 ، 219.0 ، 219.5 ، 220.0 ، 220.5 ، 221.0 ، 221.5 ، 222.0 ، 222.5 ، 223.0 ، 223.5 ، 224.0 ، 224.5 ، 225.0 ، 225.5 ، 226.0 ، 226.5 ، 227.0 ، 227.5 ، 228.0 ، 228.5 ، 229.0 ، 229.5 ، 230.0 ، 230.5 ، 231.0 ، 231.5 ، 232.0 ، 232.5 ، 233.0 ، 233.5 ، 234.0 ، 234.5 ، 235.0 ، 235.5 ، 236.0 ، 236.5 ، 237.0 ، 237.5 ، 238.0 ، 238.5 ، 239.0 ، 239.5 ، 240.0 ، 240.5 ، 241.0 ، 241.5 ، 242.0 ، 242.5 ، 243.0 ، 243.5 ، 244.0 ، 244.5 ، 245.0 ، 245.5 ، 246.0 ، 246.5 ، 247.0 ، 247.5 ، 248.0 ، 248.5 ، 249.0 ، 249.5 ، 250.0 ، 250.5 ، 251.0 ، 251.5 ، 252.0 ، 252.5 ، 253.0 ، 253.5 ، 254.0 ، 254.5 ، 255.0 ، 255.5 ، 256.0 ، 256.5 ، 257.0 ، 257.5 ، 258.0 ، 258.5 ، 259.0 ، 259.5 ، 260.0 ، 260.5 ، 261.0 ، 261.5 ، 262.0 ، 262.5 ، 263.0 ، 263.5 ، 264.0 ، 264.5 ، 265.0 ، 265.5 ، 266.0 ، 266.5 ، 267.0 ، 267.5 ، 268.0 ، 268.5 ، 269.0 ، 269.5 ، 270.0 ، 270.5 ، 271.0 ، 271.5 ، 272.0 ، 272.5 ، 273.0 ، 273.5 ، 274.0 ، 274.5 ، 275.0 ، 275.5 ، 276.0 ، 276.5 ، 277.0 ، 277.5 ، 278.0 ، 278.5 ، 279.0 ، 279.5 ، 280.0 ، 280.5 ، 281.0 ، 281.5 ، 282.0 ، 282.5 ، 283.0 ، 283.5 ، 284.0 ، 284.5 ، 285.0 ، 285.5 ، 286.0 ، 286.5 ، 287.0 ، 287.5 ، 288.0 ، 288.5 ، 289.0 ، 289.5 ، 290.0 ، 290.5 ، 291.0 ، 291.5 ، 292.0 ، 292.5 ، 293.0 ، 293.5 ، 294.0 ، 294.5 ، 295.0 ، 295.5 ، 296.0 ، 296.5 ، 297.0 ، 297.5 ، 298.0 ، 298.5 ، 299.0 ، 299.5 ، 300.0 ، 300.5 ، 301.0 ، 301.5 ، 302.0 ، 302.5 ، 303.0 ، 303.5 ، 304.0 ، 304.5 ، 305.0 ، 305.5 ، 306.0 ، 306.5 ، 307.0 ، 307.5 ، 308.0 ، 308.5 ، 309.0 ، 309.5 ، 310.0 ، 310.5 ، 311.0 ، 311.5 ، 312.0 ، 312.5 ، 313.0 ، 313.5 ، 314.0 ، 314.5 ، 315.0 ، 315.5 ، 316.0 ، 316.5 ، 317.0 ، 317.5 ، 318.0 ، 318.5 ، 319.0 ، 319.5 ، 320.0 ، 320.5 ، 321.0 ، 321.5 ، 322.0 ، 322.5 ، 323.0 ، 323.5 ، 324.0 ، 324.5 ، 325.0 ، 325.5 ، 326.0 ، 326.5 ، 327.0 ، 327.5 ، 328.0 ، 328.5 ، 329.0 ، 329.5 ، 330.0 ، 330.5 ، 331.0 ، 331.5 ، 332.0 ، 332.5 ، 333.0 ، 333.5 ، 334.0 ، 334.5 ، 335.0 ، 335.5 ، 336.0 ، 336.5 ، 337.0 ، 337.5 ، 338.0 ، 338.5 ، 339.0 ، 339.5 ، 340.0 ، 340.5 ، 341.0 ، 341.5 ، 342.0 ، 342.5 ، 343.0 ، 343.5 ، 344.0 ، 344.5 ، 345.0 ، 345.5 ، 346.0 ، 346.5 ، 347.0 ، 347.5 ، 348.0 ، 348.5 ، 349.0 ، 349.5 ، 350.0 ، 350.5 ، 351.0 ، 351.5 ، 352.0 ، 352.5 ، 353.0 ، 353.5 ، 354.0 ، 354.5 ، 355.0 ، 355.5 ، 356.0 ، 356.5 ، 357.0 ، 357.5 ، 358.0 ، 358.5 ، 359.0 ، 359.5 ، 360.0 ، 360.5 ، 361.0 ، 361.5 ، 362.0 ، 362.5 ، 363.0 ، 363.5 ، 364.0 ، 364.5 ، 365.0 ، 365.5 ، 366.0 ، 366.5 ، 367.0 ، 367.5 ، 368.0 ، 368.5 ، 369.0 ، 369.5 ، 370.0 ، 370.5 ، 371.0 ، 371.5 ، 372.0 ، 372.5 ، 373.0 ، 373.5 ، 374.0 ، 374.5 ، 375.0 ، 375.5 ، 376.0 ، 376.5 ، 377.0 ، 377.5 ، 378.0 ، 378.5 ، 379.0 ، 379.5 ، 380.0 ، 380.5 ، 381.0 ، 381.5 ، 382.0 ، 382.5 ، 383.0 ، 383.5 ، 384.0 ، 384.5 ، 385.0 ، 385.5 ، 386.0 ، 386.5 ، 387.0 ، 387.5 ، 388.0 ، 388.5 ، 389.0 ، 389.5 ، 390.0 ، 390.5 ، 391.0 ، 391.5 ، 392.0 ، 392.5 ، 393.0 ، 393.5 ، 394.0 ، 394.5 ، 395.0 ، 395.5 ، 396.0 ، 396.5 ، 397.0 ، 397.5 ، 398.0 ، 398.5 ، 399.0 ، 399.5 ، 400.0 ، 400.5 ، 401.0 ، 401.5 ، 402.0 ، 402.5 ، 403.0 ، 403.5 ، 404.0 ، 404.5 ، 405.0 ، 405.5 ، 406.0 ، 406.5 ، 407.0 ، 407.5 ، 408.0 ، 408.5 ، 409.0 ، 409.5 ، 410.0 ، 410.5 ، 411.0 ، 411.5 ، 412.0 ، 412.5 ، 413.0 ، 413.5 ، 414.0 ، 414.5 ، 415.0 ، 415.5 ، 416.0 ، 416.5 ، 417.0 ، 417.5 ، 418.0 ، 418.5 ، 419.0 ، 419.5 ، 420.0 ، 420.5 ، 421.0 ، 421.5 ، 422.0 ، 422.5 ، 423.0 ، 423.5 ، 424.0 ، 424.5 ، 425.0 ، 425.5 ، 426.0 ، 426.5 ، 427.0 ، 427.5 ، 428.0 ، 428.5 ، 429.0 ، 429.5 ، 430.0 ، 430.5 ، 431.0 ، 431.5 ، 432.0 ، 432.5 ، 433.0 ، 433.5 ، 434.0 ، 434.5 ، 435.0 ، 435.5 ، 436.0 ، 436.5 ، 437.0 ، 437.5 ، 438.0 ، 438.5 ، 439.0 ، 439.5 ، 440.0 ، 440.5 ، 441.0 ، 441.5 ، 442.0 ، 442.5 ، 443.0 ، 443.5 ، 444.0 ، 444.5 ، 445.0 ، 445.5 ، 446.0 ، 446.5 ، 447.0 ، 447.5 ، 448.0 ، 448.5 ، 449.0 ، 449.5 ، 450.0 ، 450.5 ، 451.0 ، 451.5 ، 452.0 ، 452.5 ، 453.0 ، 453.5 ، 454.0 ، 454.5 ، 455.0 ، 455.5 ، 456.0 ، 456.5 ، 457.0 ، 457.5 ، 458.0 ، 458.5 ، 459.0 ، 459.5 ، 460.0 ، 460.5 ، 461.0 ، 461.5 ، 462.0 ، 462.5 ، 463.0 ، 463.5 ، 464.0 ، 464.5 ، 465.0 ، 465.5 ، 466.0 ، 466.5 ، 467.0 ، 467.5 ، 468.0 ، 468.5 ، 469.0 ، 469.5 ، 470.0 ، 470.5 ، 471.0 ، 471.5 ، 472.0 ، 472.5 ، 473.0 ، 473.5 ، 474.0 ، 474.5 ، 475.0 ، 475.5 ، 476.0 ، 476.5 ، 477.0 ، 477.5 ، 478.0 ، 478.5 ، 479.0 ، 479.5 ، 480.0 ، 480.5 ، 481.0 ، 481.5 ، 482.0 ، 482.5 ، 483.0 ، 483.5 ، 484.0 ، 484.5 ، 485.0 ، 485.5 ، 486.0 ، 486.5 ، 487.0 ، 487.5 ، 488.0 ، 488.5 ، 489.0 ، 489.5 ، 490.0 ، 490.5 ، 491.0 ، 491.5 ، 492.0 ، 492.5 ، 493.0 ، 493.5 ، 494.0 ، 494.5 ، 495.0

جدول ۳. بارهای ثبت‌شده، تغییر مکان‌ها، کرنش‌ها در اوج بار در طی آزمون‌های پس از آتش

Column	e (mm)	e/D or e/B	λ	N_{ue} (KN)	δ_{axial} (mm)	$\delta_{lateral}$ (mm)	ϵ_{ave} μ
C-1-2-N-N	0	0	35.1	587.2	2.76	-7.57	-
C-1-2-C0-I	0	0	35.1	521.5	9.28	-20.93	-
C-1-2-N-I	0	0	35.1	199.8	1.52	-12.26	-4465.9
C-2-2-N-I	25	0.25	35.1	134.6	7.12	-12.2	-3369.8
C-3-2-N-I	50	0.5	35.1	104.8	8.75	-13.21	-3002.3
CS-1-1-N-I	0	0	10.5	381.3	29.4	-5.89	-
S-1-2-N-N	0	0	34.6	499.8	27.88	-4.55	-
S-1-2-Co-I	0	0	34.6	333.5	4.85	-8.93	-
S-1-2-N-I	0	0	34.6	145.4	9.32	-1.81	-2255.1
S-2-2-N-I	25	0.25	34.6	106.1	9.42	-15.75	-12143
S-3-2-N-I	50	0.5	34.6	74.4	10.38	-13.48	-2802.8
SS-1-1-N-I	0	0	10.5	209.8	15.53	-3.55	-

Table 3. Recorded loads, displacements and strains at peak during post-fire tests

شکل ۲. تأثیر نسبت خروج از مرکزیت در رابطه بار در مقابل کرنش برای مقاطع دایره‌ای و مربعی

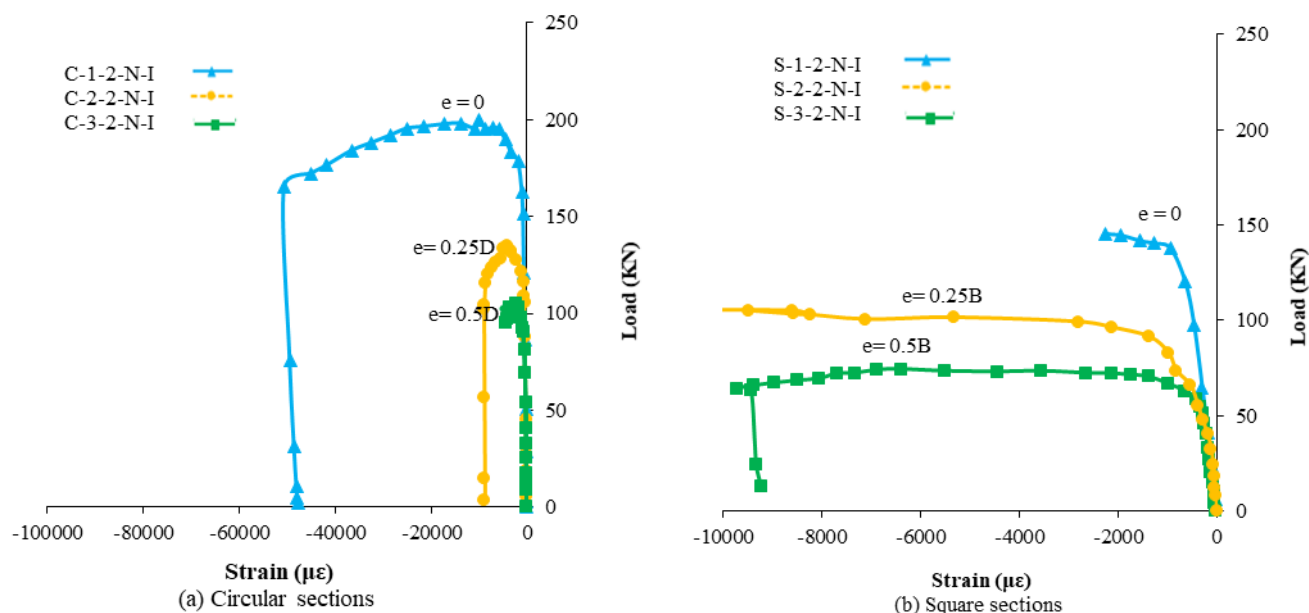


Fig. 2. The effect of the load eccentricity ratio in load-strain relations for circular sections, square sections

۲-۷ نسبت لاغری

نسبت لاغری، λ برای ستون‌های مرکب CFST بر طبق رابطه هان برای مقاطع دایره‌ای و مقاطع مربعی به ترتیب با رابطه $\lambda = L_e / 4D$ و $\lambda = 2\sqrt{3}L_e / B$ تعریف شده است که L_e طول مؤثر ستون است و B عرض کلی ستون مربعی و D قطر کلی ستون دایره‌ای است. در این مطالعه پارامتری، نسبت لاغری برای نمونه‌ها ۱۰/۵ و ۳۵ در نظر گرفته شده است. با افزایش

عرض ستون مربعی) برای ستون‌ها CFST دایره‌ای و مربعی در شکل (۲) نشان داده شده است. بر اساس منحنی‌های این شکل می‌توان دریافت روابط کرنش-بار قبل از شکست در نرخ اولیه به‌طور مشابه افزایش می‌یابد اما با نزدیک شدن به شکست با توجه به افزایش خروج از مرکزیت‌ها نرخ آن‌ها کاهش یافته است.

مربعی دارد، در حقیقت محصورشدگی لوله فولاد مربعی ضعیف‌تر از لوله فولادی دایره‌ای است.

محصورشده‌گی مناسب مقاطع توخالی دایره‌ای تمایل دارد تا اثر زیادی روی ستون‌های CFST از نظر مقاومت کمانش موضعی تحمیل شود، در واقع هسته بتنی در برابر تغییر شکل لوله فولادی به‌طرف داخل به‌طور کامل مقاومت کرده است. در نتیجه، کمانش موضعی لوله فولادی در مقاطع دایره‌ای به‌طور کامل حذف شده است؛ اما در مقاطع فولادی توخالی مربعی به علت محصورشدگی نامناسب (عدم توزیع مناسب تنش عرضی) تغییر شکلی به شکل پافیلی، در مقابل نیروی عکس‌العمل بتن مشاهده شده است (شکل ۴). در این آزمایش یکی از موارد کمانش موضعی مقاطع مربعی، از تمرکز تنش به‌طور موضعی در این ناحیه و تسلیم شدن فولاد است.

این امر نشان می‌دهد که سوراخ‌های تهویه که برای خروج بخار آب در دمای بالا پیش‌بینی شده می‌تواند به‌عنوان عاملی باشد که سبب کمانش ستون شود. مدهای شکست شکل‌های (e-1-4 و f-1-4) مربوط به ستون‌های کوتاه است. سازوکار شکست این ستون‌ها به صورت شکست برشی در بتن و به دنبال آن کمانش موضعی لوله فولادی مشاهده شده است.

۳- پیش‌بینی مقاومت باقی‌مانده پس از آتش

برای محاسبه مقاومت باقی‌مانده ستون‌های CFST، از روش‌های متعددی می‌توان استفاده کرد [9-16]. در مطالعه کنونی اصلاح روش‌های متداول و ساده‌شده یورو کد 4 در دمای محیط و دمای بالا مورد توجه قرار گرفته است [18-17]. مزیت این روش‌ها که پیشتر توسط راش و هان [2-4-6] پیشنهاد شده است: عدم محدودیت نسبت به ساین نمونه، نوع آتش و نوع پوشش نمونه است، با این وجود در این روش‌ها به اثر خروج از مرکزیت بار هیچ توجهی نشده است. روش اول پیشنهادی، بر اساس روش اصلاح‌شده یورو کد 4 [17] است. در این روش سطح مقطع ستون به یک‌لایه فولاد و پنج لایه بتن تقسیم شده است. با این تفاوت که به جای استفاده از خواص مواد در دمای محیط از خواص باقی‌مانده مصالح استفاده شده است.

نسبت لاغری، تغییر مکان محوری و جانبی در وسط ارتفاع ستون افزایش می‌یابد. علاوه بر این، با افزایش نسبت لاغری بار شکست نهایی ستون کاهش یافته است.

۸-۲ پوشش محافظتی در برابر آتش

تفاوت موجود در روابط بار در مقابل تغییر مکان برای مقاطع مربعی و دایره‌ای (شکل ۳)، می‌تواند ناشی از تفاوت موده‌ای شکست تجربه‌شده توسط مقاطع باشد، بر طبق نتایج مشاهده شده مقاطع دایره‌ای بدون هیچ نشانه‌ای از کمانش موضعی فقط تحت کمانش کلی شکسته شده‌اند، این در حالی است که مقاطع مربعی با نشانه‌ای از کمانش موضعی و کمانش کلی شکسته شده‌اند، بنابراین کمانش موضعی را می‌توان سبب تفاوت پاسخ‌های بار در مقابل تغییر مکان دانست. با افزایش بیشینه دمای تجربه‌شده، تغییر مکان محوری و جانبی در وسط ارتفاع ستون افزایش یافته است. علاوه بر این، قرار گرفتن در معرض دمای بالا باعث تسریع بخشیدن به نرخ تسلیم‌شدگی ستون‌های CFST شده است. با بررسی منحنی‌های ستون‌های محافظت‌شده و محافظت نشده نسبت به ستون‌های بدون گرمایش می‌توان دریافت که ستون‌های محافظت‌شده بین ۷۰ تا ۹۰ درصد ظرفیت باربری ستون‌های بدون گرمایش را می‌توانند حفظ کنند. در صورتی که مقاطع محافظت نشده تنها ۳۰ درصد از ظرفیت باربری ستون‌های بدون گرمایش را می‌توانند حفظ کنند که می‌تواند نشان‌دهنده ضرورت نیاز ستون‌های CFST به پوشش‌های ضد حریق باشد. علاوه بر این می‌توان نشان‌دهنده تأثیر دما روی ظرفیت باربری نمونه‌های محافظت نشده باشد.

۹-۲ مود شکست

مود شکست کلیه مقاطع دایره‌ای فقط به‌صورت کمانش کلی مشاهده شده است شکل (a-4)، این در حالی است که مود-های شکست مقاطع مربعی بیشتر با ظهور نشانه‌های از کمانش موضعی و در نهایت کمانش کلی مشاهده شده است.

این امر می‌تواند نشان‌دهنده این حقیقت باشد که توزیع تنش‌های عرضی در مقاطع مربعی در گوشه‌های سطح مقطع بیشینه‌تر از لبه‌های آن هست، بنابراین توزیع نامتوازن تنش‌ها در سطح مقطع باعث عدم محصورشدگی مناسب است و اما در مقاطع دایره‌ای با توجه به توزیع یکنواخت تنش‌های عرضی در سطح مقطع اثر محصورشدگی مناسب‌تری نسبت به مقاطع

شکل ۳. بار-تغییر مکان‌های جانبی در وسط دهانه (چپ) یا تغییر مکان‌های محوری (راست) برای ستون‌های مربعی و دایره‌ای

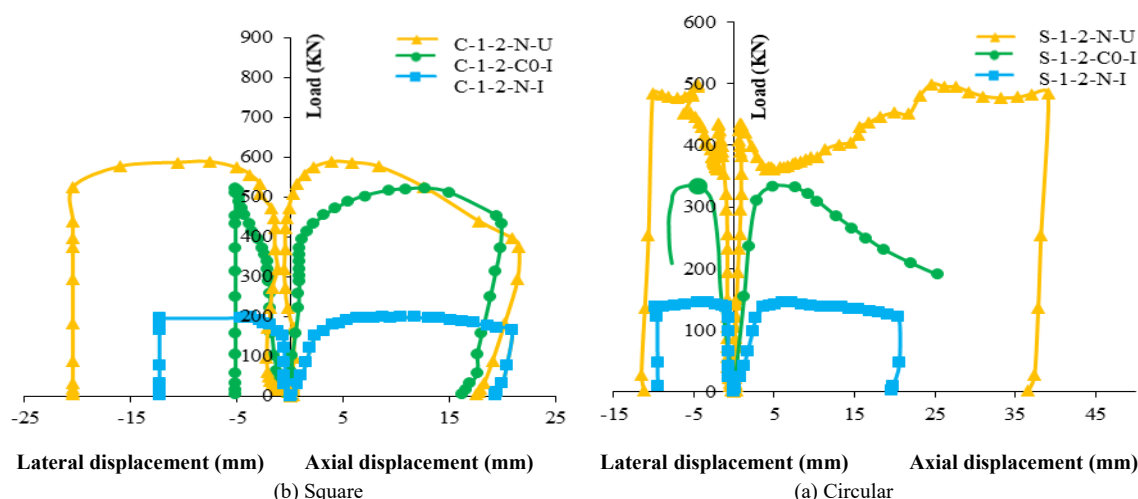


Fig. 3. Load versus lateral displacement at mid-span (left), or axial displacement (right) for square columns and circular columns

ستون‌های CFST پس از آتش پیشنهاد شده است که در این پژوهش برای ستون‌های با خروج از مرکزیت استفاده شده است، طبق این روش تنش در لایه‌های مختلف از روابط تنش- کرنش غیرخطی مصالح پس از آتش برحسب کرنش مرحله فعلی ستون در دمای محیط برآورد می‌شود.

۴- پیش‌بینی نتایج

می‌توان تفاوت بین مقادیر پیش‌بینی و مقادیر آزمایش را به صورت میانگین درصد خطا، MPE تعریف نمود (جدول ۴). طبق جدول (۴)، MPE پیش‌بینی بار شکست برای بارگذاری به صورت بدون خروج از مرکز و با خروج از مرکز بر اساس روش اول به ترتیب ۵۱٪ و ۳۰۶٪ کمتر از حد پیش‌بینی و برای روش دوم به ترتیب ۷۱٪ و ۶۳٪ کمتر از حد پیش‌بینی بار شکست به ترتیب ۱۷٪ و ۱۲٪ بالاتر از حد پیش‌بینی است. با مقایسه بین روش‌های پیشنهادی پیش‌بینی شده برای مقاومت باقی‌مانده پس از آتش، با در نظر گرفتن بارگذاری به صورت بدون خروج از مرکز و با خروج از مرکز مشاهده می‌شود:

در روش اول انحراف معیار خطای پیش‌بینی به ترتیب ۲۲٪ و ۱۸٪ است، به این معنی که خطای میانگین رویکرد پیش‌بینی

باید یادآوری کنیم که این روش قابلیت پیش‌بینی بارگذاری با خروج از مرکزیت را ندارد؛ بنابراین در روش اصلاح شده، برای پیش‌بینی ظرفیت باربری ستون با خروج از مرکزیت رابطه (۱) پیشنهاد شده است (ظرفیت سطح مقطع):

$$N_{axi,t} = X_b \times N_{u,T} \quad (1)$$

X_b ضریب کاهش، مستقیماً تابعی از ضریب لاغری است که بر طبق روابط پیشنهادی ۲ و ۳ بر اساس کارهای آزمایشی گذشته [9-16] پیشنهاد شده است.

$$X_b = 1 / (1 + (1/82 \times e/D)) \quad e/D < 0.5 \quad \lambda = 35 \quad (2)$$

$$X_b = 1 / (1 + (3/38 \times e/D)) \quad e/D < 0.5 \quad \lambda = 20 \quad (3)$$

روش دوم: در این روش نمونه‌ها تحت ترکیبی از فشار و خمش یک طرفه بر اساس تحلیل مرتبه دوم، طبق بند ۶-۷-۳-۶ یورو کد ۴ [17]، مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند؛ بنابراین، منحنی اندرکنش باید بر این اساس تعریف شود. برای ایجاد منحنی اندرکنش ساده، می‌توان از نمودار چندضلعی جایگزین استفاده نمود. روش سوم: برای محاسبه مقاومت در برابر آتش ستون‌ها با مقطع توخالی پرشده با بتن بدون محافظت CFST، در پیوست اچ یورو کد ۴ [18] به طور خاص، مدلی ساده ارائه شده است. این روش پیشتر توسط راش و همکاران [6] برای محاسبه مقاومت باقی‌مانده

به ترتیب ۰/۲۵ و ۰/۱۷ انحراف معیار، پایین تراز خط ۱:۱ است. به عبارتی این رویکرد محافظه‌کارانه محسوب می‌شود

شکل ۴. نوع مدهای شکست برای ستون‌های CFST

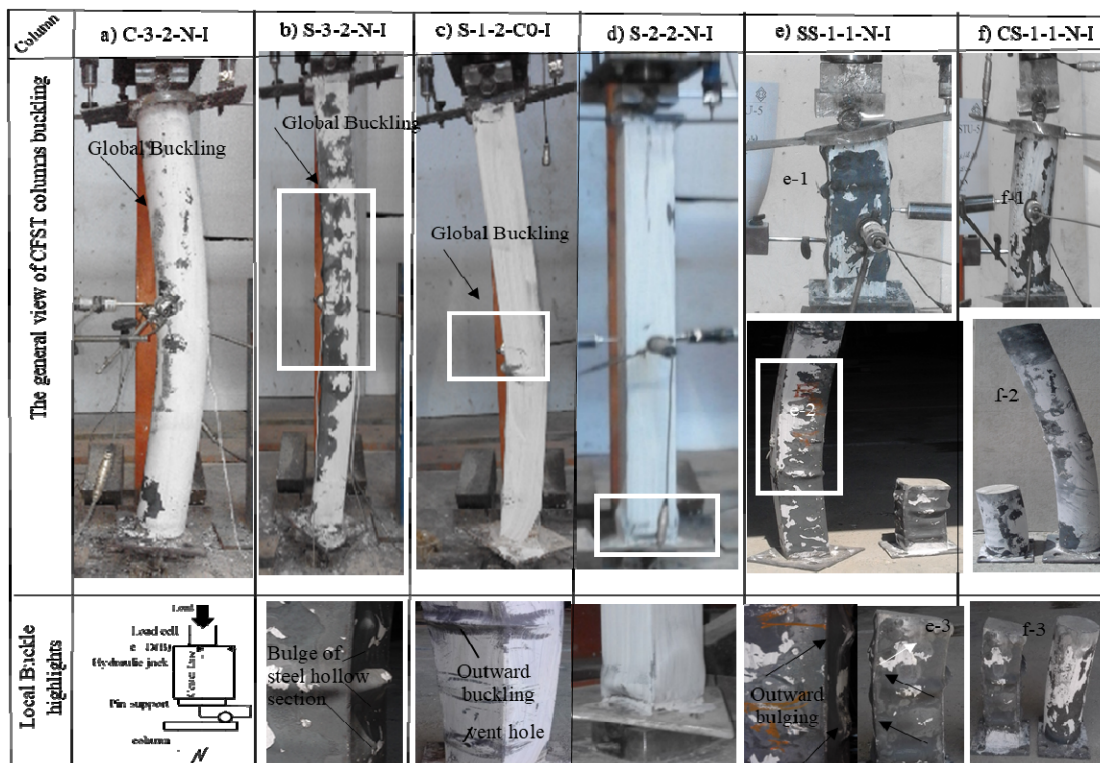


Fig. 4. Typical failure modes of the square and circular CFST columns

شکل ۵. ظرفیت باربری باقی‌مانده پس از آتش‌پیش‌بینی‌شده در مقابل بار مشاهده‌شده

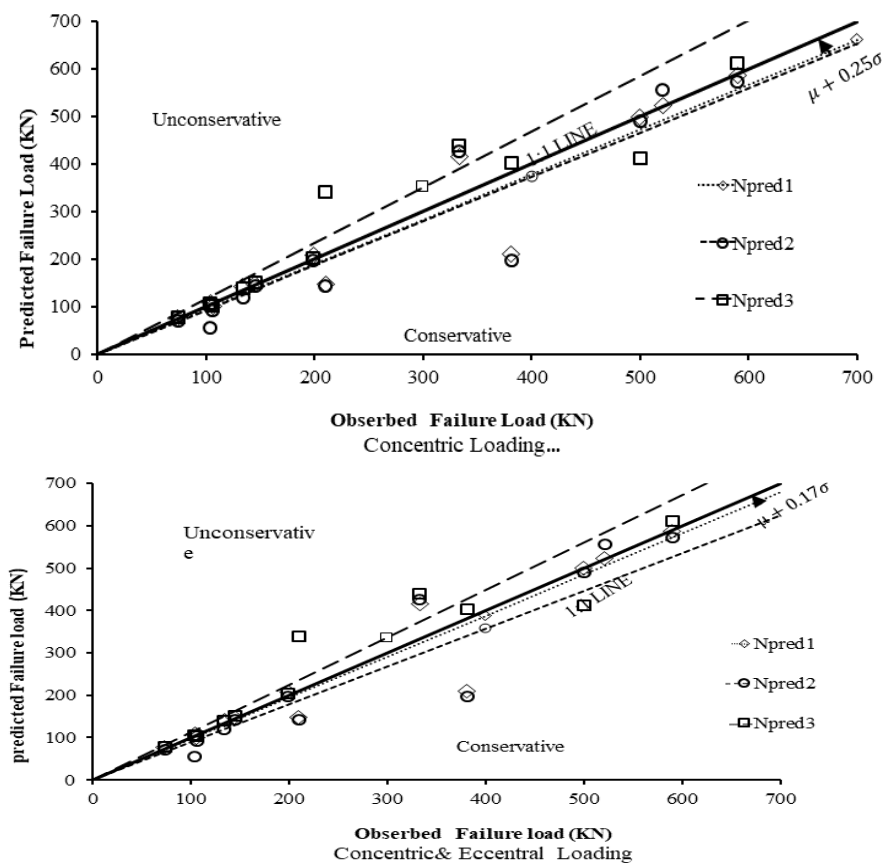


Fig. 5. Predicted versus observed post-fire residual axial load-bearing capacity

جدول ۴. مقایسه بین بارهای شکست پیش‌بینی شده و مشاهده شده در آزمایش

Specimen label	Test data	Predicted failure loads				Error%	
	N _{ue} (KN)	N _{pred1} (KN)	N _{pred2} (KN)	N _{pred3} (KN)	N _{pred1} (KN)	N _{pred2} (KN)	N _{pred3} (KN)
C-1-2-N-N	589.6	587	573	612	-0.44%	-2.82%	3.80%
C-1-2-Co-I	521	523	556	728	0.38%	6.72%	39.73%
C-1-2-N-I	199	208	196	203	4.52%	-1.51%	2.51%
C-2-2-N-I	134	141	120	139.4	5.55%	-10.45%	3.99%
C-3-2-N-I	104	108	56	106	4.00%	-46.15%	1.75%
CS-1-1-N-I	381.32	210	196	403	-44.93%	-48.60%	5.69%
S-1-2-N-N	499.8	499	489	413	-0.16%	-2.16%	-17.37%
S-1-2-Co-I	333	415	426	440	24.62%	27.93%	32.13%
S-1-2-N-I	145	147	143	151	1.38%	-1.38%	3.79%
S-2-2-N-I	106	-	92	-	-5.27%	-13.21%	-3.01%
S-3-2-N-I	74	-	71	-	3.04%	-4.05%	5.49%
SS-1-1-N-I	209.8	148	143	340	-29.46%	-31.84%	62.06%
Concentric loading	MPE				-5.51%	-6.71%	17%
	Stdeva deviation, % error				22%	23%	26%
Concentric & Eccentral loading	MPE				-3.06%	-10.63%	12%
	Stdeva deviation, % error				18%	22%	22%

Table. 4. Comparison of recorded and predicted failure loads

ظرفیت باربری را می‌توانند حفظ کنند. در صورتی که مقاطع محافظت نشده در برابر حریق تنها ۳۰ درصد از ظرفیت باربری را می‌توانند حفظ کنند. از نظر پیش‌بینی مقاومت باقی‌مانده ستون‌های CFST، روش اول، به‌عنوان بهترین روش پیش‌بینی شناخته شده است. طبق این روش برای بارگذاری به‌صورت بدون خروج از مرکز و با خروج از مرکز خطای میانگین رویکرد پیش‌بینی به ترتیب ۰/۲۵ و ۰/۱۷ انحراف معیار، پایین‌تر از خط ۱:۱ است. بر اساس روش منحنی اندرکنش (روش دوم)، روش اصلاح‌شده یورو کد ۴ [۱۷]، به ترتیب برای بارگذاری‌های بدون خروج از مرکز و با خروج از مرکز با خطای میانگین پیش‌بینی ۰/۲۹ و ۰/۴۸ انحراف معیار، پایین‌تر از خط ۱:۱ به‌عنوان روش محافظه‌کارانه مورد توجه قرار گرفته است. در صورتی که روش اصلاح‌شده پیوست اچ یورو کد ۴ [۱۸] (روش سوم) در هر دو حالت بارگذاری به‌صورت بدون خروج از مرکز و با خروج از انحراف معیار، بالاتر از خط ۱:۱ به‌عنوان روشی غیرمحافظه‌کارانه محسوب می‌گردد. در مورد مقاطع محافظت‌شده در برابر آتش، تأثیر شکل سطح مقطع بر ظرفیت مقاومت باقی‌مانده ستون نسبت به حالت‌های محیطی و محافظت نشده قابل توجه‌تر هست.

(شکل ۵). بر اساس روش دوم مقدار انحراف معیار خطای پیش‌بینی برای بارگذاری بدون خروج از مرکز و با خروج از مرکز به ترتیب ۲۳٪ و ۲۲٪ است. به این معنی که خطای میانگین رویکرد پیش‌بینی به ترتیب ۰/۲۹ و ۰/۴۸ انحراف معیار، پایین‌تر از ۱:۱ است که می‌توان این رویکرد و اما روش سوم، در این روش مشاهده شده است که مقدار انحراف معیار خطای پیش‌بینی برای بارگذاری بدون خروج از مرکز و با خروج از مرکز به ترتیب ۲۶٪ و ۲۲٪ است به عبارتی خطای میانگین رویکرد پیش‌بینی به ترتیب ۰/۶۵ و ۰/۵۴ انحراف معیار، بالاتر از خط ۱:۱ است که روشی نسبتاً غیر محافظه‌کارانه در مقایسه با سایر روش‌ها برشمرده می‌شود.

۵- بحث و نتیجه‌گیری

بیشینه دمای توزیع‌شده در سطح مقطع دایره‌ای نسبت به مقطع مربعی کمتر هست؛ بیشتر بودن دما در ستون‌های CFST با مقطع مربعی را می‌توان به کوتاه‌تر بودن فاصله هدایت گرمایی از سطح بتن به سمت مرکز بتن نسبت داد. با مقایسه ظرفیت باقی‌مانده ستون‌های CFST، محافظت‌شده و محافظت نشده نسبت به ستون‌های بدون گرمایش می‌توان دریافت: ستون‌های CFST محافظت‌شده ۷۰ تا ۹۰ درصد از

- [12] Wang Y.C. 2005 Performance of steel-concrete composite structures in fire. *Engng Mater.* 7:86–102.
- [13] Han L.H. Huo J.S. 2003 Concrete-filled hollow structural steel columns after exposure to ISO-834 fire standard. *Journal of Structural Engineering.* 129 (1): 68–78.
- [14] Han L.H. Huo J.S. Yang Y.F. 2002, Concrete-Filled HSS Columns after Exposure to the ISO-834 Standard Fire, *Advances in Steel Structures*, 1127-1135.
- [15] Zhong Tao, Xing-Qiang Wang, Brian Uy, 2013 Stress-strain curves of structural steel and reinforcing steel after exposure to elevated temperatures. *Journal of Materials in Civil Engineering* 25 (9): 1306-1316.
- [16] Faqi Liu, Leroy Gardner, Hua Yang, 2014 Post-fire behaviour of reinforced concrete stub columns confined by circular steel tubes. *Journal of Constructional Steel Research.* 102:82–103.
- [17] CEN. BS EN 1: 2004-1-1994; Eurocode 4, 2009, design of composite steel and concrete structures – Part 1-1: general rules and rules for buildings. Brussels, Belgium.
- [18] CEN. BS EN 2: 2005-1-1994: Eurocode 4, 2008, design of composite steel and concrete structures – Part 2-1: general rules – structural fire design. Brussels, Belgium

باید یادآوری شود که نتایج این پژوهش برای ستون‌های با سایز کوچک (ستون‌های مربعی با عرض ۱۰۰ میلی‌متر و دایره‌ای با قطر ۱۱۴ میلی‌متر) و نسبت لاغری هان با مقدار ۱۰/۵ و ۳۵ معتبر هست؛ بنابراین در مطالعات پارامتریک آینده می‌توان اثر سایزهای مختلف را، بررسی کرد.

۶- تشکر و قدردانی

نویسندگان لازم می‌دانند، از آقای مهندس جمالی و همکارانش در مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی قدردانی نمایند.

۷- منابع

- [1] Lawson, R.M. and Newman, G.M. 1990 Fire Resistant Design of Steel Structures - A Handbook to BS 5950: Part 8. SCI Publication, 80.
- [2] Han LH, Huo JS, Wang YC. 2005 Compressive and flexural behaviour of concrete filled steel tubes after exposure to standard fire. *J Constr Steel Res*;61(7):882–901.
- [3] Han LH, Yang YF, Yang H, Huo JS. 2002 Residual strength of concrete-filled RHS columns after exposure to the ISO-834 standard fire. *Thin-Wall Struct*;40(12):991–1012.
- [4] Han LH, Huo JS. 2003 Concrete filled hollow structural steel columns after exposure to ISO-834 standard fire. *J Struct Eng*;129(1):68.
- [5] Faqi Liu, Hua Yang, Leroy Gardner, 2016 Post-fire behaviour of eccentrically loaded reinforced concrete columns confined by circular steel tubes. *Journal of Constructional Steel Research* 122:495-510.
- [6] David I. Rush, Luke A. Bisby, Allan Jowsey, Barbara Lane, 2015 Residual capacity of fire-exposed concrete-filled steel hollow section columns. *Engineering Structures*, 100: 550–563.
- [7] ISO. ISO 834: 1999 fire resistance tests-elements of building construction. Geneva, Switzerland.
- [8] X.H. Dai, D. Lam 2012 Shape effect on the behaviour of axially loaded concrete filled steel tubular stub columns at elevated temperature”, *Journal of Constructional Steel Research* 73: 117-127.
- [9] M.D. O'Shea, R.Q. 2000 Bridge Design of circular thin-walled concrete filled steel tubes. *J. Struct. Eng.* 126(11):1295-1303.
- [10] Han LH, Zhao XL, Yang YF, Feng JB. 2003 Experimental study and calculation of fire resistance of concrete-filled hollow steel columns. *J Struct Eng*, 129(3):346-356.
- [11] Han LH, Yang H, Cheng SL. 2002 Residual strength of concrete filled RHS stub columns after high temperatures. *Advances in Structural Engineering.* 5(2):123–134.

Experimental study of Concrete-filled steel tube (CFST) columns after Exposure to High Temperature

Fatemeh Kamani¹, Saeed Bakhtiyari^{2*}, Ali Mazroi³, SM Mirhosayni⁴

1. PhD Candidate, Islamic Azad University, Arak, Department of Civil Engineering, Arak Branch, Islamic Azad University, Arak, Iran
2. Assistant Professor, Road, Housing & Urban Development Research Center (BHRC), Department of Fire Engineering, Road, Housing and Urban Development Research Center (BHRC), Tehran, Iran
3. Assistant Professor, Islamic Azad University, Tehran center, Department of Civil Engineering, Central Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran
4. SM Mirhosayni, Assistant Professor, Islamic Azad University, Arak, Department of Civil Engineering, Arak Branch, Islamic Azad University, Arak, Iran

*bakhtiyari@bhrc.ac.ir

Abstract:

Predicting the residual load-bearing capacity of damaged concrete-filled steel tube (CFST) columns exposed to fire, based on the effects of eccentricities, is a subject on which relatively little research has been done. This paper aims to present the results of a series of post-fire residual capacity tests for CFST columns with different cross sections (circular and square), under axial load, and different eccentricities in the event of a failure. In this experimental study, the influence of parameters such as cross-sectional shape, load eccentricity, slenderness and fire protective coating on the post-fire residual capacity of CFST sections was investigated. Based on the results of this study, the following conclusions were obtained in the scope of this research work: The results showed that eccentricity could be effective in reducing the residual capacity of the column, but the change in the amount of eccentricity cannot be as effective as reducing the residual capacity of the columns. The studies indicate that the residual capacity is significantly reduced by increasing the slenderness ratio. Therefore, in order to determine the residual capacity of the CFST columns under load eccentricity, a simplified equation for predicting the reduction factor was proposed, a comparison between the predicted and experimental results shows that there is a reasonably good agreement. The tests show that by increasing the temperature over a cross-section of CFST columns, the residual axial load capacity and the axial stiffness of the unprotected columns decreased significantly compared to the unheated columns. Comparison of the axial compressive capacity of CFST columns with square and circular have shown that for columns having the same concrete material, the circular column has slightly better structural post-fire behavior than the square column. To fire-protected sections, the effect of the cross-sectional shape on the residual strength is significant, relative to the unprotected sections is more. In fact, by comparing the temperature distribution on the surface of the circular and square sections, one can find that the maximum temperature distribution at the circular cross sections is less than the square cross sections. Therefore, with less degradation of the properties of the cross-sectional materials, the more residual load-bearing capacity is expected. Finally, based on the experimental results, the ability to predict the residual load-bearing capacity of the concrete-filled hollow tube columns after exposure to the ISO-834 standard fire as per the modified design method in Eurocode 4 for the fire and ambient conditions were evaluated. The investigation's results showed that the simplified method of Eurocode 4, in the ambient temperature produced safe results for predicting residual resistance of CFST columns after fire exposure, under both concentric and eccentric loading conditions. This approach was considered as a conservative method, with the MPEs for concentric loads, as well as both concentric and eccentric loads as -5.51% and -3.06% lower than the prediction, respectively.

Keywords: Concrete-filled steel tube (CFST), residual capacity, Predictions, load eccentricity, Post-fire.