

بررسی رفتار ستون تقویت شده مدور فولادی پر شده با بتن (CFT) تحت اثر آتش

سامان محمد علیزاده^۱ و کریم عابدی^{۲*}

^۱ کارشناس ارشد سازه، دانشگاه صنعتی سهند تبریز

^۲ استاد دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سهند تبریز

چکیده

ستون فولادی پر شده با بتن (CFT)، سیستمی است متشکل از بتن به عنوان هسته داخلی و فولاد به عنوان جدار خارجی. یکی از مهم‌ترین عوامل در رفتار این ستون‌ها، اثر محصورکنندگی جدار فولادی می‌باشد. هنگام رخداد آتش‌سوزی در سازه، جدار فولادی منبسط می‌شود و زودتر از هسته بتنی تسلیم خواهد شد و اثر محبوس‌کنندگی خود را بر هسته بتنی از دست خواهد داد. بنابر این هسته داخلی باید بار محوری سازه را تحمل کند. پس از اتمام آتش‌سوزی در سازه، در هنگام کاهش دمای محیط، بتن ترک خورده است و نمی‌تواند مقاومت خود را بازیابد. همچنین فولاد منبسط شده و تغییر شکل داده است. پس نمی‌تواند به شکل اولیه خود بازگردد و هسته بتنی را محصور کند. در مطالعه حاضر، رفتار ستون‌های تقویت شده مدور CFT تحت اثر آتش مورد بررسی قرار گرفته است. مهم‌ترین مشخصه ستون‌های CFT تقویت شده، سخت‌کننده‌های طولی متقارن قرار گرفته داخل ستون می‌باشند. مدل‌سازی عناصر محدود ستون‌های مذکور با استفاده از نرم‌افزار ANSYS انجام شده و صحت آن مورد ارزیابی قرار گرفته است. جهت اعمال حرارت روی ستون، از منحنی استاندارد ISO-834 استفاده شده است. نتایج به دست آمده، افزایش اثر محبوس‌کنندگی جدار فولادی را در هنگام کاهش دمای محیط (مرحله سرمایش) نشان داده اند. همچنین ظرفیت باربری ستون با استفاده از سخت‌کننده‌ها بالاتر رفته است.

واژگان کلیدی: محصورشدگی ستون CFT، آتش‌سوزی در سازه، عناصر محدود، سخت‌کننده‌های طولی، افزایش ظرفیت باربری.

۱- مقدمه

از این ستون‌ها در سازه‌ها، و نیز ذکر این نکته که آتش‌سوزی در سازه‌ها، سالانه تلفات جبران‌ناپذیری به بار می‌آورد، لذا در این مقاله، به بررسی رفتار این ستون‌ها در برابر حرارت پرداخته شده است.

ستون پر شده با بتن، در مرحله اول بارگذاری حرارتی، دچار افزایش طول و سپس کوتاه می‌شود تا این‌که کاملاً مقاومت خود را از دست می‌دهد. این ستون‌ها می‌توانند بار را پس از دست دادن مقاومت جدار فولادی، از طریق بتن تحمل کنند. همچنین صلبیت در اتصال تیر به ستون کاهش می‌یابد، زیرا بارگذاری گرمایی باعث کاهش انتقال ممان خمشی از تیر به ستون می‌شود [۲].

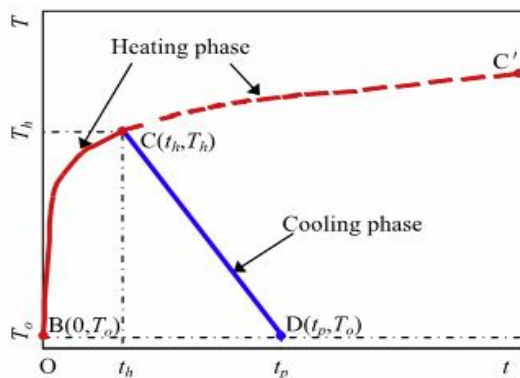
در سال‌های اخیر، مطالعات گسترده‌ای بر روی ستون‌های CFT در برابر حرارت صورت پذیرفته است. به عنوان نمونه می‌توان به تحقیقات Kodur اشاره نمود. وی نشان داد که ستون CFT پر شده با بتن تقویت شده با الیاف فولادی، مقاومت بسیار بالاتری نسبت به ستون‌های پر شده با بتن معمولی و بتن با مقاومت بالا دارا می‌باشد [۳]. Han و همکارانش با اعمال لایه محافظ روی ستون CFT، آن را تحت اثر بار حرارتی قرار داده و نتیجه گرفتند که از دست دادن مقاومت در برابر حرارت در

سیستم‌های سازه‌ای مختلف، همواره با توجه به نوع و کاربرد سازه، طراحی و اجرا می‌شوند. در سال‌های اخیر استفاده از ستون‌های مرکب^۱ در سازه‌ها رواج زیادی پیدا کرده است. این ستون‌ها به طور عمده به منظور ساخت سازه با دهانه بزرگ، ارتفاع طبقه زیاد به کار می‌روند [۱].

ستون‌های CFT^۲ یکی از انواع ستون‌های مرکب می‌باشند که امروزه با توجه به دارا بودن مزایای بی‌شمار رواج پیدا کرده‌اند. از جمله این مزایا می‌توان به اثر متقابل فولاد و بتن و به تأخیر افتادن کمانش موضعی، مقاومت در برابر آتش، پلاستیک شدن جداره فولادی خارجی، صرفه‌جویی در هزینه به دلیل حذف قالب‌بندی موقت در سازه، قابلیت استفاده و نصب در انواع آب و هوا و تحمل بار بحرانی بیشتر نسبت به ستون‌های معمولی اشاره نمود [۲].

ستون‌ها از اجزای مهم سازه به حساب می‌آیند. در هنگام آتش‌سوزی، آسیب دیدن ستون‌ها، منجر به انهدام و خرابی سازه می‌شود. با توجه به مزایای ستون‌های CFT و استفاده روزافزون

1- Composite columns
2- Concrete filled steel tube



شکل ۱- منحنی استاندارد افزایش و کاهش حرارت

[۱۳] ISO-834

$$T = T_0 + 345 \text{Log}(8t + 1) \quad (1)$$

که در آن داریم:

 T_0 : دمای اولیه محیط t : زمان (بر حسب دقیقه) T : دمای محیط در زمان t

در هنگام کاهش دمای محیط (مرحله سرمایش)، این آیین‌نامه با توجه به نمودار حرارت ذکر شده، رابطه دیگری ارائه داده است. این رابطه به صورت خطی می‌باشد (رابطه (۲)).

$$T = \begin{cases} T_h - 10.417(t - t_h) & t_h \leq 30 \\ T_h - 4.167 \left(3 - \frac{t_h}{60}\right)(t - t_h) & 30 < t_h \leq 120 \\ T_h - 4.167(t - t_h) & t_h > 120 \end{cases} \quad (2)$$

که در آن داریم:

 T_0 : دمای اولیه محیط (20°C) t : زمان (بر حسب دقیقه) T : دمای محیط در زمان t بر حسب $^\circ\text{C}$ T_h : حداکثر درجه حرارت بر حسب $^\circ\text{C}$ t_h : زمان اعمال حرارت بر حسب دقیقه t_p : زمان کلی قرار گرفتن در معرض حرارت بر حسب دقیقه

(B-C-C'): مرحله گرمایش

(C-D): مرحله سرمایش

C: مرحله آغاز سرد شدن

در هنگام کاهش دمای محیط و پس از اتمام مرحله گرمایش (آغاز مرحله سرمایش)، Yang [۱۲] روابطی را برای فولاد و بتن ارائه داده است. وی این روابط را بر این اساس ارائه کرده

ستون‌های بدون اعمال لایه محافظ، به طور چشم‌گیری بیشتر از ستون‌های با لایه محافظ بوده است. آن‌ها همچنین در آزمایشی دیگر به این نتیجه رسیدند که بهترین عملکرد برای لایه محافظ روی فولاد، دمای زیر 550°C خواهد بود و افزایش ضخامت لایه محافظ بر مقاومت ستون در برابر آتش تأثیر بسزایی دارد [۴] و [۵]. Zha با استفاده از مدل اجزاء محدود و اعمال حرارت در شرایط دو بعدی بر روی ستون CFT به این نتیجه رسید که افزایش ابعاد مقطع، کاهش ضخامت جدار فولادی و استفاده از بتن مسلح، مقاومت ستون را در برابر حرارت افزایش می‌دهد [۶]. Han و همکارانش [۷] در آزمایشی دیگر ستون CFT را تحت اثر بار لرزه‌ای و حرارت قرار داده و نتیجه گرفتند که شکل‌پذیری نمونه‌ها با افزایش بار محوری کاهش می‌یابد و اتلاف انرژی مقاطع مدور نسبت به مقاطع مربعی به مراتب بیشتر است. Yin و همکارانش [۸] نیز در یک مطالعه آزمایشگاهی نتیجه گرفتند که ستون‌های با مقطع مدور، مقاومت بالاتری در مقایسه با مقطع مربع در مقابل آتش از خود نشان می‌دهند. در آزمایشی دیگر Taoa و همکارانش، ستون CFT مقاوم‌سازی شده با ورق‌های کربنی را تحت حرارت قرار داده و نتیجه گرفتند که قرار گرفتن در معرض آتش، مقاومت و سختی نمونه‌ها را با افزایش تعداد لایه‌ها افزایش خواهد داد [۹]. Chung و همکاران [۱۰] نیز نتیجه‌گیری نمودند که بهبود مصالح بتن و فولاد، مقاومت آن را در برابر آتش بالاتر می‌برد، ولی تأثیر بهبود مصالح بتن بر مقاومت در برابر آتش به مراتب بیشتر از فولاد است. با استفاده از یک مدل عددی، Song و همکاران ستون‌های مربع و مدور را به ترتیب با افزایش و کاهش حرارت تحت بار محوری قرار داده و نتیجه گرفتند که ستون‌های مدور قادر به کسب تنش طولی بالاتر و در نتیجه بار بیشتر می‌باشد. با افزایش دما، ظرفیت باربری ستون مدور نسبت به دمای محیط بالاتر می‌رود [۱۱].

۲- بارگذاری حرارتی

به منظور اعمال بارگذاری حرارتی، از نمودار زمان - حرارت آیین‌نامه ISO-834 استفاده شده است (شکل (۱)). Song [۱۱] و Yang [۱۲] نیز این منحنی را روی مدل‌های خود اعمال کرده‌اند. نحوه اعمال حرارت روی این مدل آزمایشگاهی، منطبق بر منحنی ISO-834 (1980) [۱۳] می‌باشد. مرحله گرمایش این نمودار در رابطه (۱) آورده شده است.

می‌شود. در محل تماس بین فولاد و بتن نیز در ستون‌های CFT، این پدیده رخ خواهد داد. به همین جهت با کسر اندک حرارت اتلاف شده، با استفاده از رابطه (۴) ارائه شده توسط Zha [۱۵]، دمای سطح بتن محاسبه خواهد شد.

$$q = \alpha(T_s - T_c) \quad (4)$$

$$\alpha = \sqrt{kC_c \rho_c / \pi t}$$

که در آن داریم:

α : ضریب اتلاف حرارت

k : ضریب انتقال حرارت فولاد

t : زمان بر حسب ساعت

T_s : دمای سطح داخلی جدار فولادی

T_c : دمای سطح خارجی هسته بتنی

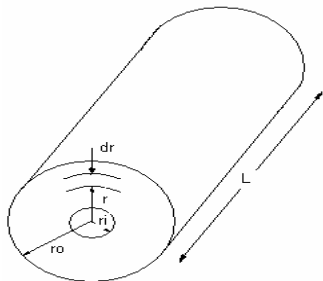
C_c : ظرفیت گرمایی ویژه بتن

ρ_c : چگالی بتن

پ) **دمای داخلی هسته بتنی:** در اجسام استوانه‌ای شکل، در صورت قرار گرفتن محیط استوانه در آتش، انتقال حرارت در مختصات شعاعی انجام خواهد گرفت. به همین منظور، جهت محاسبه دما در نقاط داخلی استوانه، رابطه انتقال حرارت هدایتی (قسمت اول رابطه (۳))، باید در سیستم استوانه‌ای بیان شود (شکل (۲)). بنابر این رابطه (۶) به دست می‌آید. بنابر این با قرار دادن شعاع دلخواه هسته بتنی، مقدار دمای هر نقطه با فاصله شعاعی دلخواه تعیین شده است [۱۶].

$$q = -hA_r \frac{\partial T}{\partial r}, \quad (A_r = 2\pi rL) \quad (5)$$

$$q = \frac{2\pi kL(T_i - T_o)}{\ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)} \quad (6)$$



شکل ۲- انتقال حرارت هسته بتنی در دستگاه استوانه‌ای

است که با کاهش دما، مشخصات مکانیکی فولاد تا حدی بازیابی می‌شود، ولی بتن پس از ترک خوردن و کاهش ظرفیت باربری، این قابلیت را از دست خواهد داد.

Song [۱۱] در سال ۲۰۰۹، روابط مربوط به مرحله سرمایه‌ش Yang [۱۲] برای بتن را جهت استفاده در نرم‌افزار ABAQUS تا حدی اصلاح کرده و روابط جدیدی ارائه نموده است. در مطالعه حاضر، به دلیل تشابه نرم افزارهای ANSYS و ABAQUS، از این روابط اصلاح شده استفاده شده است.

۲-۱- انتقال حرارت در ستون

انتقال حرارت در ستون و محاسبه دمای قسمت‌های مختلف ستون، دارای ۳ مرحله است که عبارتند از:

الف) دمای سطح خارجی و داخلی جداره فولادی: گرما

به صورت هدایتی از جسم با دمای بالاتر به جسم با دمای پایین‌تر انتقال می‌یابد. همچنین با توجه به آن که جریان گرمایی در فضای اتاق حرکت می‌کند، انتقال گرما به ستون به طریقه تابشی نیز انجام می‌پذیرد. بنابراین، انتقال حرارت از فضای اطراف به ستون CFT، تحت اثر هم‌زمان تابش و هدایت می‌باشد. رابطه (۳) که توسط Wang [۱۴] ارائه شده است، بیانگر این مطلب می‌باشد:

$$q = h(T_f - T_s) + \varepsilon\sigma(\theta_f^4 - \theta_s^4) \quad (3)$$

که در آن داریم:

q : جریان گرمایی

h : ضریب انتقال هدایتی گرما که برابر $25W/(m^2C)$

T_f : دمای نسبی آتش

T_s : دمای نسبی سطح ستون

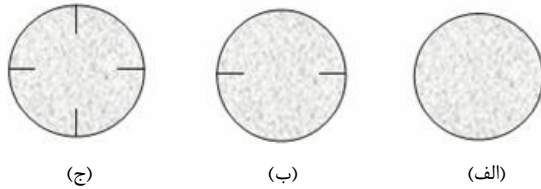
θ_f : دمای مطلق آتش بر حسب کلوین

θ_s : دمای مطلق سطح ستون بر حسب کلوین

σ : ضریب تناسب که به ثابت استفان بولتزمن معروف است و مقدار آن برابر $5.669 \times 10^{-8} W/m^2.k^4$ است. دمای سطح داخلی فولاد نیز از قسمت اول رابطه (۳) با جای‌گذاری دمای سطح خارجی جدار فولادی به دست می‌آید.

ب) دمای سطح خارجی هسته بتنی: در داخل ستون،

انتقال حرارت از نوع هدایت می‌باشد. همواره در انتقال گرمایی، هدایتی، در محل تماس دو ماده با مشخصات حرارتی متفاوت، مقداری از گرما به دلیل عدم انتقال حرارت با یک نرخ ثابت تلف



شکل ۳- مقاطع ستون‌های CFT پیشنهادی: الف) ساده، ب) تقویت شده با ۲ سخت کننده، ج) تقویت شده با ۴ سخت کننده

در مورد فشردگی ستون‌ها (D/t) ، آیین‌نامه ACI پیشنهاد می‌دهد که این مقدار کوچک‌تر از ۴۰ باشد. ابعاد سخت‌کننده‌ها نیز از ۳۰٪ سطح مقطع فولاد تجاوز نمی‌کنند که ضوابط آیین‌نامه EC4 و ACI را ارضا می‌نماید [۱۸]. جهت انجام تحلیل، انتهای ستون‌ها دو سر گیردار در نظر گرفته و مدل شده است. همچنین بارگذاری به صورت گسترده در دو انتهای ستون، هم‌زمان بر فولاد و بتن، بر گره‌ها اعمال می‌شود (همانند دو صفحه صلب).

۴- مدل‌سازی عناصر محدود و صحت‌سنجی آن

مدل‌سازی نمونه‌های پیشنهادی با نرم‌افزار ANSYS11 [۱۹] صورت پذیرفته است. این نرم‌افزار قابلیت اعمال تغییر شکل‌های بزرگ ورقه فولادی، نحوه شکست و ترک خوردگی بتن در فشار و کشش، کمناش ستون و اعمال حرارت را دارد. المان‌های به کار رفته در مدل‌سازی ستون CFT، شامل المان‌های هسته بتنی (Solid 65)، جداره فولادی (Shell 43) و المان تماسی (Contact 178) می‌باشند. المان تماسی به منظور برقراری تماس و لغزش بین دو گره از هر نوع المان به کار می‌رود و دارای سه درجه آزادی (U_x, U_y, U_z) در هر گره می‌باشد. همچنین قابلیت تحمل فشار و اصطحاک را داراست. شکل (۴) مدل تحلیل شده در نرم‌افزار به همراه شبکه‌بندی و المان‌های تماسی را نشان می‌دهد. به منظور بررسی رفتارهای غیرخطی بتن و فولاد پس از ترک خوردگی، انجام تحلیل‌های غیرخطی یک امر اجتناب‌ناپذیر می‌باشد. همان‌گونه که عنوان شد، المان‌های انتخاب شده قابلیت تغییر شکل غیرخطی را دارا می‌باشند. در مطالعه حاضر از تحلیل‌های غیرخطی هندسی و مصالح استفاده شده است. در نمونه‌های آزمایشگاهی انتخاب شده جهت صحت‌سنجی، ستون‌ها از دو سمت گیردار بوده و بارگذاری استاتیکی به صورت گام به گام و افزایشی بر نمونه‌ها اعمال شده‌اند. به همین ترتیب، این نوع بارگذاری در مطالعه حاضر، روی ستون‌ها اعمال شده است.

۳- مقاطع پیشنهادی

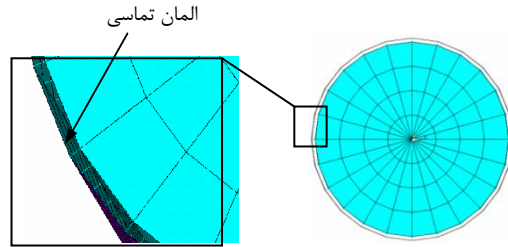
با توجه به مطالب عنوان شده، می‌توان دریافت که ستون‌های مدور دارای مقاومت بالاتری نسبت به مقاطع دیگر در برابر حرارت می‌باشند. همچنین یکی از علل عمده کاهش مقاومت ستون CFT در برابر حرارت، جدایی جداره فولادی از بتن پس از انبساط بوده است. جداره فولادی که در اثر افزایش دما از بتن جدا شده است، با انقباض مجدد در اثر کاهش دما، نمی‌تواند به طور کامل به شرایط اولیه خود بازگردد. فولاد در اثر حرارت منبسط می‌شود که نتیجه آن افزایش کرنش‌های طولی و شعاعی است. حاصل این فرآیند، از بین رفتن محبوس‌شدگی بتن توسط جداره فولادی در اثر افزایش دما خواهد بود و مابقی وزن وارده را هسته بتنی تحمل می‌کند. برای این منظور، با ارائه مدلی از ستون CFT تقویت شده با سخت‌کننده و درگیری بیشتر جداره فولادی با بتن، هسته بتنی از محبوس‌شدگی بیشتری برخوردار بوده است که از مزیت‌های عمده این نوع ستون نسبت به ستون معمولی CFT می‌باشد.

از جمله کسانی که طرح استفاده از سخت‌کننده‌ها را در ستون‌های CFT پیشنهاد داده‌اند، می‌توان به Tao [۱۷] اشاره نمود. وی با استفاده از تعداد ۲ و ۴ سخت‌کننده داخلی و خارجی، به بررسی رفتار مقاطع مربع و مستطیلی و مقایسه آن با مقاطع معمولی ستون CFT پرداخته است. همچنین فردوسی در سال ۲۰۰۸ [۱۸]، به بررسی اثر ۸ سخت‌کننده در مقاطع هشت ضلعی، مدور و مربع در ستون CFT تحت بار استاتیکی و لرزه‌ای پرداخته است. در مجموع، استفاده از سخت‌کننده‌ها در ستون‌های CFT در مطالعات ذکر شده، مزایای زیر را در بر داشته است:

- افزایش ظرفیت باربری ستون
- افزایش اثر محبوس‌شدگی جدار فولادی
- افزایش شکل‌پذیری ستون

هر چند استفاده از سخت‌کننده‌های بیشتر در ستون، موجب افزایش اثر محبوس‌کنندگی جداره فولادی می‌شود، ولی پیش‌بینی می‌شود که در هنگام آتش‌سوزی، این سخت‌کننده‌ها حرارت را سریع‌تر به هسته بتنی منتقل کرده و سرعت کاهش مقاومت بتن را در برابر حرارت افزایش دهند. به همین جهت، در مقطع پیشنهادی برای ستون CFT، از سخت‌کننده‌های کمتری نسبت به دو طرح قبلی استفاده شده است. لذا دو نوع ستون با ۲ و ۴ سخت‌کننده در این پروژه تحلیل و رفتار آن با مقطع معمولی ستون CFT مقایسه شده است. این مقاطع در شکل (۳) نشان داده شده‌اند.

همان طور که در شکل (۵) ملاحظه می‌گردد، اختلاف جزئی در انطباق دو نمودار به چشم می‌خورد. دلایل ایجاد این اختلاف را می‌توان سختی بیشتر مدل عناصر محدود به دلیل مش‌بندی‌های کمتر نسبت به مدل واقعی و وجود ناکاملی‌های احتمالی، نبود شرایط ایده‌آل در آزمایشگاه و خطاهای احتمالی در اختلاط بتن و ساخت نمونه آزمایشگاهی نام برد.



شکل ۴- مدل سازی ستون در نرم‌افزار به همراه المان تماسی

۴-۲- صحت‌سنجی مدل سازی عناصر محدود ستون CFT

تحت بارگذاری هم‌زمان بار محوری و حرارتی

مطالعات آزمایشگاهی و تحلیلی بسیاری در زمینه تأثیر حرارت روی ستون‌های CFT ارائه شده است. در اکثر مدل‌های تحلیلی، به جای اعمال مستقیم حرارت بر روی نمونه‌ها، از یک سری روابط تئوریک به منظور تبدیل مشخصات بتن و فولاد از دمای محیط به دمای مورد نظر که توسط افراد و آیین‌نامه‌ها پیشنهاد شده است، استفاده می‌شود. از جمله این روابط می‌توان روابط ارائه شده توسط Lie [۲۱]، LV [۲۲] و Han [۲۳] و آیین‌نامه EC4 [۲۴ و ۲۵] اشاره کرد.

روابط فوق‌الذکر جامع می‌باشند. بدین جهت، از روابط ارائه شده توسط Han [۲۳] برای تعریف مشخصات بتن محصور شده در دمای محیط (روابط (۷) تا (۱۰)) و Lie [۲۶] برای بتن محصور شده و فولاد در دماهای بالاتر (روابط (۱۱) تا (۱۴)) استفاده شده است.

الف) روابط تنش - کرنش برای بتن محصور شده در دمای محیط (20°C).

$$y = \begin{cases} 2x - x^2 & x \leq 1 \\ \frac{x}{\beta_0(x-1)^n + x} & x > 1 \end{cases} \quad (7)$$

$$\eta = \begin{cases} 2x \leq 1 & \text{مقاطع مدور} \\ 1.6 + 1.5/x & x > 1 \quad \text{مقاطع مربع} \end{cases} \quad (8)$$

$$\beta_0 = \begin{cases} (2.36 \times 10^{-5})^{[0.25 + (\xi - 0.5)^{0.7}]} \times (f'_c)^{0.5} \times 0.5 \geq 0.12 & \text{مقاطع مدور} \\ \frac{(f'_c)^{0.1}}{1.2\sqrt{1 + \xi}} & \text{مقاطع مربع} \end{cases} \quad (9)$$

$$\xi = \frac{A_s f_y}{A_c f_{ck}} \quad (10)$$

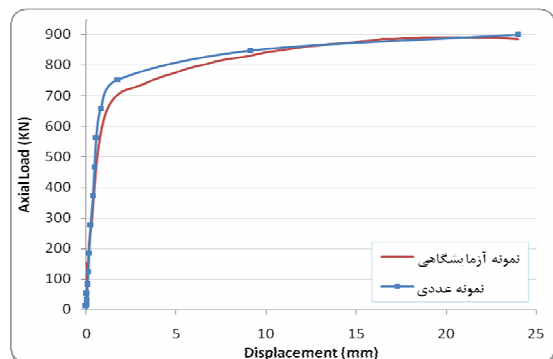
۴-۱- صحت‌سنجی مدل سازی عناصر محدود ستون CFT

تحت اثر بار محوری و بدون اعمال حرارت

به منظور بررسی صحت مدل ارائه شده، در ابتدا نتایج حاصل از تحلیل مدل سازی ستون CFT تحت بار محوری و بدون اعمال حرارت با نتایج تجربی مدلی مشابه مقایسه شده است. نمونه آزمایش انتخاب شده در سال ۱۹۹۸ توسط Schneider [۲۰] تحت آزمایش قرار گرفته است. ستون تحت آزمایش، از هر دو طرف گیردار و بارگذاری به صورت گام به گام افزایشی بوده است. مدل عددی مورد مطالعه با ستون CI از آزمایش فوق مقایسه شده است (جدول (۱)). مقایسه رفتار نمونه عددی و تجربی، در شکل (۵) آورده شده است.

جدول ۱- مشخصات ستون آزمایش شده توسط Schneider

نام ستون	بعد واقعی D(mm)	ضخامت جدار فولادی (t)	D/t	L/D	
CI	۱۴۰/۸	۳	۴۷	۴/۳	
بتن		فولاد			
Ec (Mpa)	f _c (Mpa)	Ac (mm ²)	Es (Mpa)	Fy (Mpa)	As (mm ²)
۲۵/۵۹	۲۸/۱۸	۱۴/۲۵۸	۱۸۹/۷۵	۲۸۵	۱/۲۹۷

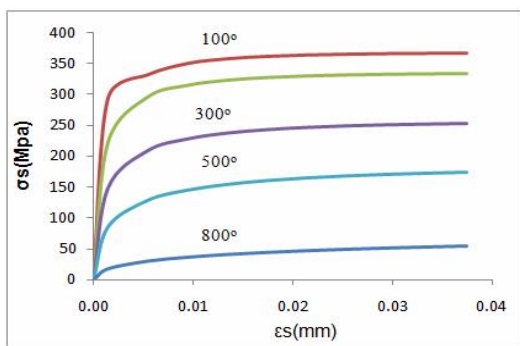


شکل ۵- مقایسه نمودار تغییر مکان - بار محوری نمونه‌های تجربی و عددی Schneider

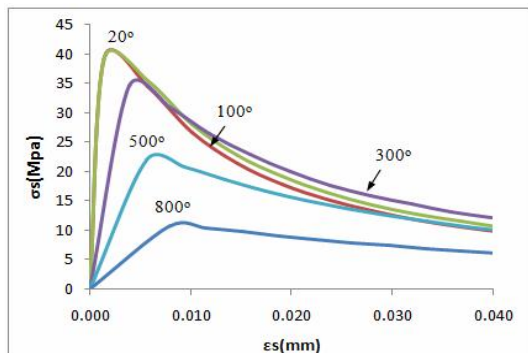
جدول ۲- مشخصات نمونه ستون آزمایش شده توسط Han [۵]

نام ستون	قطر خارجی (mm)	ضخامت جدار		زمان اعمال حرارت (min)	حداکثر حرارت اعمال		
		فولادی	بتن				
C1-1	۴۷۸	۸	بتن	۲۹	۵۶۷		
						فولاد	
						E_s (MPa)	F_y (MPa)
			E_c (MPa)	f_c (MPa)			
			۱۸۹۴۷۵	۳۹/۶	۲۵۵۹۹		

نمونه تا دمای ۵۶۷ درجه سانتیگراد به مدت ۲۹ دقیقه (لحظه شکست) تحت اعمال بار حرارتی بوده است. منحنی‌های تنش - کرنش اعمال شده به مدل تحلیلی برای فولاد و بتن که از روابط (۷) الی (۱۴) در دماهای مختلف استخراج شده‌اند، در اشکال (۶) و (۷) آورده شده‌اند. ملاحظه می‌گردد که با افزایش دمای محیط، از مقاومت فولاد و بتن کاسته شده است. به منظور بررسی رفتار دقیق ستون تحت افزایش دما، به اعمال واقعی درجه حرارت روی مدل تحلیلی پرداخته شده است. ابتدا باید مشخصات حرارتی بتن و فولاد ستون CFT تحت افزایش دما به نمونه اعمال شود. بدین منظور از روابط به دست آمده توسط Lie و Stringer [۲۶] استفاده شده است.



شکل ۶- نمودار تنش - کرنش فولاد در دماهای مختلف با استفاده از روابط ارائه شده



شکل ۷- نمودار تنش - کرنش بتن در دماهای مختلف با استفاده از روابط ارائه شده

(ب) روابط تنش - کرنش برای فولاد و بتن محصور شده در دمای بالاتر از محیط ($>20^{\circ}C$).
- فولاد:

$$\sigma_s = \quad (11)$$

$$\sigma_s = \quad (11)$$

$$\frac{f(T, 0.001)}{0.001} \varepsilon_s \quad \varepsilon_s \leq \varepsilon_y$$

$$\frac{f(T, 0.001)}{0.001} \varepsilon_s + f[T, (\varepsilon_s - \varepsilon_y + 0.001)] -$$

$$f(T, 0.001) \quad \varepsilon_s > \varepsilon_y$$

$$\varepsilon_y = E_s \cdot f_y, \quad f(T, x) = (50 - 0.04T) \cdot \{1 - \exp(-30 + 0.03T)\} \cdot x^{0.5} \times 6.9.$$

- بتن:

$$\sigma_T = f'_c [1 + 1.986(T-20)^{3.21} \times 10^{-9}] \quad (12)$$

$$\varepsilon_c = (1300 + 12.5f'_c + 800\xi^{0.2}) \times 10^{-6} \quad (13)$$

$$(1.03 + 3.6 \times 10^{-4}T + 4.22 \times 10^{-6}T^2)$$

$$\xi = \frac{A_s f_y(T)}{A_c f_{ck}} \quad (14)$$

که در آن‌ها داریم:

$$\varepsilon_o = (1300 + 12.5f'_c + 800\xi^{0.2})10^{-6}, \quad x = \varepsilon_c / \varepsilon_o, \quad y = \sigma_c / \sigma_o, \quad f_{ck} = 67\% \cdot f'_c.$$

f'_c : حداکثر مقاومت ۲۸ روزه نمونه استوانه‌ای بتن

f_y : تنش تسلیم فولاد در دمای محیط

$f_y(T)$: تنش تسلیم فولاد در دمای بالاتر از محیط

ε_o : کرنش حداکثر بتن در دمای محیط

ε_c : کرنش بتن پس از اعمال بار

σ_o : حداکثر تنش بتن که در دمای محیط $f'_c = \sigma_o$

A_s : سطح مقطع جدار فولادی

A_c : سطح مقطع هسته بتنی

به منظور بررسی مدل عناصر محدود، از آزمایشی که در سال ۲۰۰۳ توسط Han [۵] انجام گرفته است، استفاده شده است. وی در این آزمایش به بررسی رفتار ستون‌های CFT با مقاطع مدور و مربع تحت اثر هم‌زمان بارهای حرارتی و محوری پرداخته است. در این آزمایش نیز ستون‌ها در تکیه‌گاه‌ها گیردار می‌باشند. مشخصات ستون مدل شده با مشخصات ستون C-1-1 آزمایش منطبق است که در جدول (۲) آورده شده است.

- نحوه بارگذاری: شامل بارگذاری‌های استاتیکی و حرارتی که در سه زمان مختلف به نمونه‌ها اعمال شده است؛
- مشخصات هندسی: شامل اثر تغییر ابعاد ستون، اثر تغییر ضخامت ورق فولادی و اثر تغییر نسبت D/t ستون. همچنین بررسی‌ها و مقایسه‌های انجام شده بر روی مدل‌های عناصر محدود به شرح زیر می‌باشند:
- بررسی تأثیر قطر مقطع و ضخامت جدار فولادی در ظرفیت باربری ستون‌های CFT قرار گرفته در معرض حرارت؛
- مقایسه ظرفیت باربری ستون‌های CFT با مقاطع ساده با ستون‌های دارای سخت کننده در مدت زمان‌های مختلف قرارگیری ستون در برابر حرارت؛
- بررسی شاخص RSI^1 (نسبت حداکثر ظرفیت باربری ستون در معرض حرارت، به ستون قرار گرفته در دمای محیط)
- ابعاد و مشخصات پیشنهادی برای تحلیل، در جداول (۳-۱) الف) و (۳-۲) آورده شده است:
- گروه اول: ستون‌ها با داشتن ضخامت جدار مقطع فولادی ثابت، قطر و به تبع آن، نسبت D/t آن‌ها افزایش می‌یابد.
- گروه دوم: ستون‌ها با داشتن قطر ثابت، ضخامت جدار مقطع فولادی آن‌ها کاهش و به تبع آن، نسبت D/t آن‌ها افزایش می‌یابد.

جدول ۳- مشخصات ستون‌های تحلیل شده:

الف) با ضخامت جدار ثابت، ب) با قطر ثابت

Num	Labels	D (mm)	ts (mm)	D/t	Time (min)	T (°C)
1	C21-10	500	14.65	34.14	10	680
	C21-20	500	14.65	34.14	20	780
	C21-30	500	14.65	34.14	30	840
2	C22-10	500	13.21	37.86	10	680
	C22-20	500	13.21	37.86	20	780
	C22-30	500	13.21	37.86	30	840
3	C23-10	500	12.73	39.29	10	680
	C23-20	500	12.73	39.29	20	780
	C23-30	500	12.73	39.29	30	840

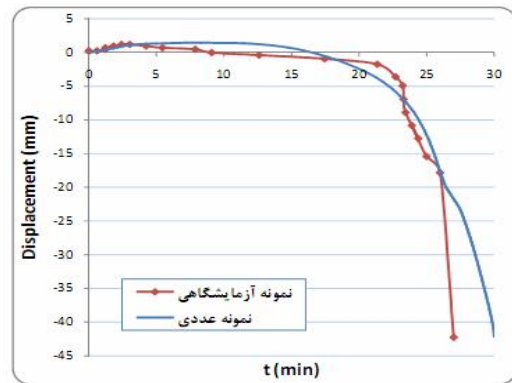
(الف)

Num	Labels	D (mm)	ts (mm)	D/t	Time (min)	T (°C)
1	C11-10	478	14	34.14	10	680
	C11-20	478	14	34.14	20	780
	C11-30	478	14	34.14	30	840
2	C12-10	530	14	37.86	10	680
	C12-20	530	14	37.86	20	780
	C12-30	530	14	37.86	30	840
3	C13-10	550	14	39.29	10	680
	C13-20	550	14	39.29	20	780
	C13-30	550	14	39.29	30	840

(ب)

با استفاده از این روابط می‌توان ضریب انتقال حرارت (K_s)، ظرفیت گرمایی ویژه (C_s)، ضریب انبساط حرارت (α_s) را برای فولاد و بتن در دماهای مختلف محاسبه نمود. همچنین در این روابط، تبخیر آب بتن پس از قرارگیری در برابر حرارت و کاهش مقاومت آن نیز منظور گردیده است.

دمای قسمت‌های مختلف ستون نیز چنانچه ذکر گردید از روابط (۳) تا (۶) محاسبه گشته و پس از اعمال آن‌ها همراه با بارگذاری استاتیکی، ستون تحلیل شده است. مدل تحت منحنی‌های حرارتی و گام‌های بارگذاری استاتیکی متناسب با آزمایش، (افزایش بار با گام‌های مساوی)، تحلیل شده است. همانند آزمایش ذکر شده، در مطالعه حاضر بارگذاری محوری و حرارتی، هم‌زمان از صفر شروع شده و تا حداکثر ظرفیت باربری ستون افزایش داده شده‌اند. نتایج این تحلیل در شکل (۸) آورده شده است. انبساط نمونه در اثر حرارت در این شکل کاملاً مشهود است. ملاحظه می‌شود که اعمال حرارت، رفتار ستون را همانند لحظه آتش‌سوزی در سازه شبیه‌سازی می‌نماید. چنانچه ملاحظه گردید، علی‌رغم اختلافات جزئی که در صحت‌سنجی نمونه تحلیلی ملاحظه گردید، مدل‌سازی‌های عناصر محدود از دقت بالایی برخوردار بودند.



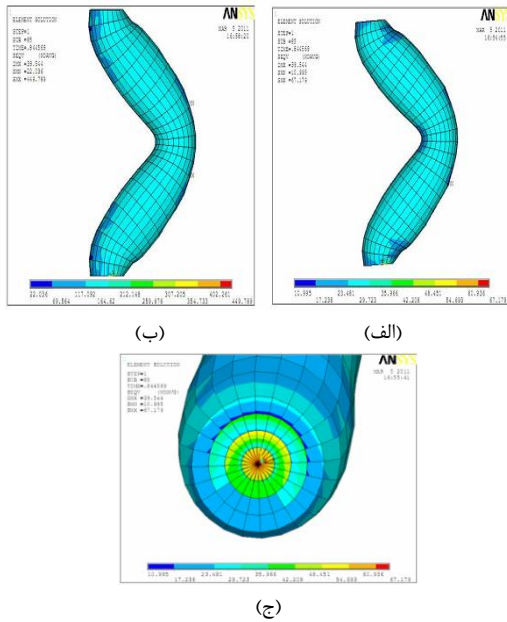
شکل ۸- مقایسه نمودار تغییر شکل محوری - زمان نمونه‌های

تجربی و تحلیلی با اعمال مستقیم حرارت Han [۵]

۵- نتایج تحلیل عددی ستون CFT تحت حرارت و بار

محوری

با توجه به مطالب ارائه شده در بخش (۱)، عوامل تأثیرگذار بر رفتار ستون‌های CFT در برابر آتش عبارتند از: مشخصات مصالح به کار رفته در ستون، نوع و نحوه بارگذاری بر روی آن، چسبندگی جداره فولاد به بتن، نوع و ابعاد مقطع ستون. از این رو، پارامترهای مورد بررسی که در مطالعه حاضر در نظر گرفته شده است، عبارتند از:



شکل ۱۰- کانتور تنش در بتن و فولاد در مرحله تسلیم کامل بتن برای ستون C12 ساده قرار گرفته به مدت ۱۰ دقیقه در معرض حرارت: الف) جدار فولادی، ب) هسته بتنی، ج) مقطع کلی ستون

۵-۱- مقایسه ظرفیت باربری ستون‌های CFT با افزایش قطر (D) ستون

به منظور بررسی تأثیر افزایش نسبت قطر مقطع ستون روی ظرفیت باربری، ستون‌های گروه اول (با ضخامت جدار ثابت) با یکدیگر مقایسه شده‌اند. در شکل (۱۱)، نمودار تغییرمکان - بار محوری برای ستون‌های ساده و تقویت شده با ۲ و ۴ سخت کننده برای مدت زمان قرارگیری ستون به مدت ۲۰ دقیقه در معرض حرارت به عنوان نمونه آورده شده است. نتایج حاصله نشان می‌دهد که در ستون‌های تقویت شده، با افزایش مدت قرارگیری ستون در برابر حرارت، افزایش قطر مقطع، بیشترین تأثیر را روی ظرفیت باربری نمونه‌ها داشته است. در شکل (۱۲)، ظرفیت باربری ستون‌های CFT ساده و تقویت شده در دمای محیط با افزایش قطر مقطع مقایسه شده‌اند. در شکل ذکر شده مشاهده می‌گردد که با افزایش ۱۱٪ و ۱۵٪ به نسبت D/t در ستون‌های ساده، ظرفیت باربری آن‌ها به ترتیب ۱۸٪ و ۲۴٪ افزایش یافته است. این نسبت برای ستون‌های تقویت شده با ۲ سخت کننده، ۶٪ و ۱۴٪ و ستون‌های تقویت شده با ۴ سخت کننده، ۱۸٪ و ۱۹٪ بوده است که کمتر از ستون قرار گرفته در معرض حرارت بوده است.

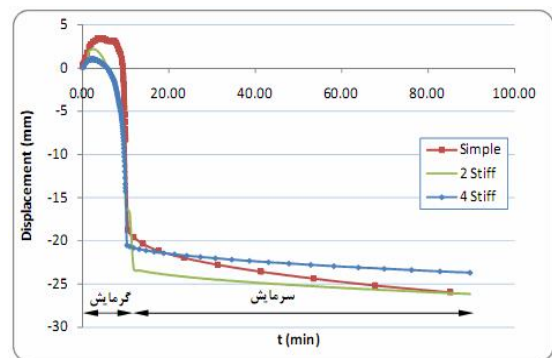
- نسبت D/t در هر دو گروه، در سه مرحله افزایش می‌یابد. این نسبت‌ها برای هر دو گروه مقداری برابر و ثابت در نظر گرفته شده است.

- در هر مقطع پیشنهادی، نمونه‌ها به مدت ۱۰، ۲۰ و ۳۰ دقیقه در معرض حرارت قرار داده شده‌اند. زمان‌های مذکور، برابر با حرارت‌های ۶۸۰، ۷۸۰ و ۸۴۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشند.

- ابعاد ستون‌ها همانند ستون‌های رایج اجرا شده انتخاب شده است (توضیح نحوه اعمال بار و شرایط تکیه‌گاهی در بخش (۳)). طول آن‌ها ۳۸۱۰ میلی‌متر و برای فولاد $F_y=293\text{MPa}$ و $E_s=2.01 \times 10^5$ و برای بتن $f'_c=39.6\text{MPa}$ و $E_c=27800$ در نظر گرفته شده است.

تحلیل‌ها بر روی سه تیپ ستون با مقاطع بدون سخت کننده، با ۲ و ۴ سخت کننده صورت پذیرفته است. در شکل (۹)، نمودارهای زمان - تغییرمکان یک نمونه ستون تحلیل شده در مرحله گرمایش و سرمایش آورده شده است. چنانچه مشاهده می‌شود، نمونه‌ها پس از اعمال حرارت و بارگذاری محوری، در ابتدا دچار انبساط می‌شوند. ملاحظه می‌گردد که انبساط اولیه ستون ساده (تقویت نشده) در اثر اعمال حرارت، به دلیل درگیری کمتر با بتن بیشتر از نمونه‌های تقویت شده می‌باشد.

معیار ظرفیت باربری ستون CFT در برابر حرارت، تسلیم کامل هسته بتنی است که معادل کمانش کلی ستون می‌باشد. بتن ظرفیت باربری نهایی را به تنهایی تحمل کرده و جداره فولادی با تسلیم سریع‌تر، از چرخه باربری خارج گشته است و تنها اثر محسوس کنندگی بر هسته بتنی اعمال می‌نماید (شکل (۱۰)).

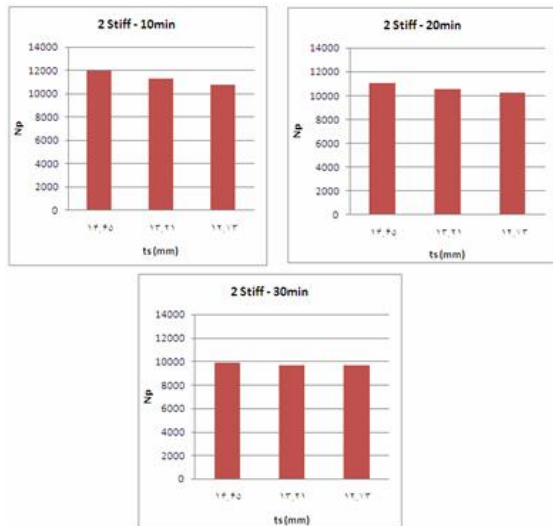


شکل ۹- نمودار زمان - تغییرمکان نمونه C11 برای قرارگیری ستون به مدت ۱۰ دقیقه در معرض حرارت

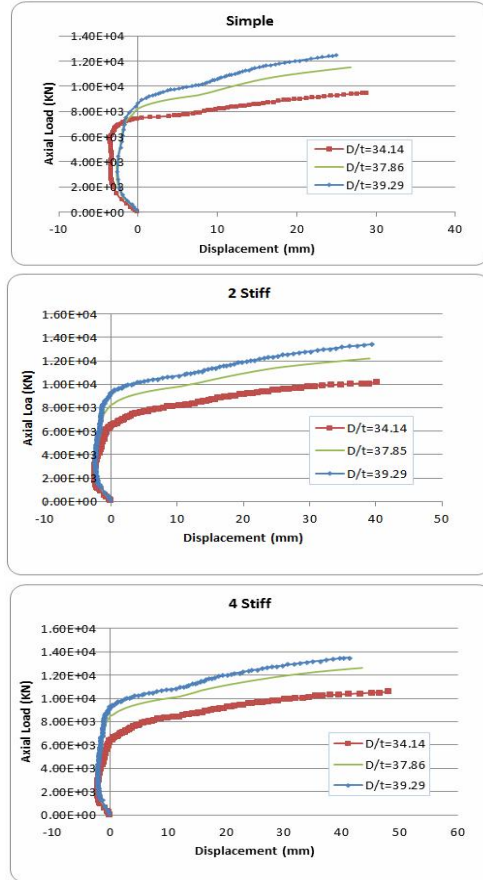
قابل ملاحظه‌تری بر روی ظرفیت باربری ستون CFT در برابر حرارت گذاشته است تا ستون قرار گرفته در دمای محیط.

۵-۲- مقایسه ظرفیت باربری ستون‌های CFT با کاهش ضخامت جدار فولادی (t_s)

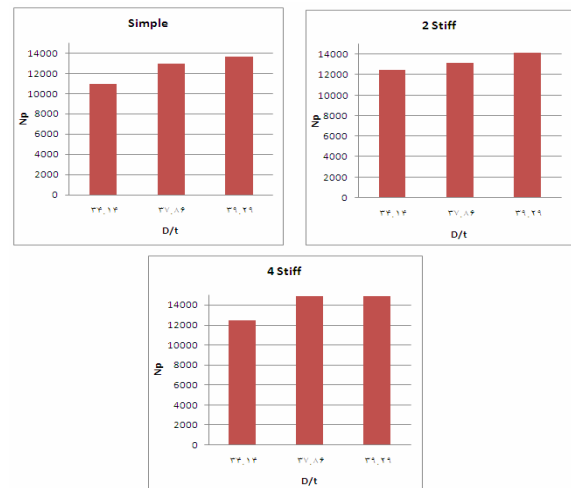
به منظور بررسی تأثیر ضخامت جدار فولادی در ظرفیت باربری ستون CFT در برابر حرارت، در این قسمت نمونه‌های گروه دوم (با قطر مقطع ثابت) با یکدیگر مقایسه شده‌اند. ظرفیت باربری ستون‌های تقویت شده با ۲ سخت کننده در برابر حرارت به عنوان نمونه در شکل (۱۳) آورده شده است. با توجه به نتایج فوق ملاحظه می‌گردد که با کاهش ضخامت جدار فولادی به میزان ۳٪، تغییر چندانی در ظرفیت باربری مقطع به وجود نیامده است. همچنین ملاحظه می‌گردد که کمترین کاهش ظرفیت باربری ستون‌ها، در مدت زمان قرارگیری ستون به مدت ۳۰ دقیقه در معرض حرارت بوده است. همچنین مقطع تقویت شده با ۲ سخت کننده، کمترین مقدار کاهش در ظرفیت باربری را دارا بوده است. در شکل (۱۴)، ظرفیت باربری ستون CFT با کاهش درصد فولاد مقطع در دمای محیط در مقاطع ساده و تقویت شده با یکدیگر و نتایج حاصله با ظرفیت باربری ستون در برابر حرارت مقایسه شده است. با مقایسه اشکال (۱۴) و (۱۵) ملاحظه می‌گردد که درصد کاهش مقاومت در ستون‌های قرار گرفته در معرض حرارت، بیشتر از ستون‌های قرار گرفته در دمای محیط بوده است.



شکل ۱۳- مقایسه ظرفیت باربری ستون‌های در معرض حرارت با کاهش ضخامت جدار فولادی برای ستون 2Stiff



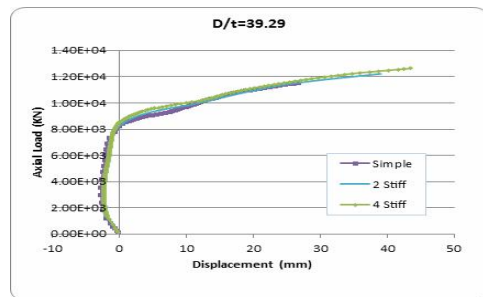
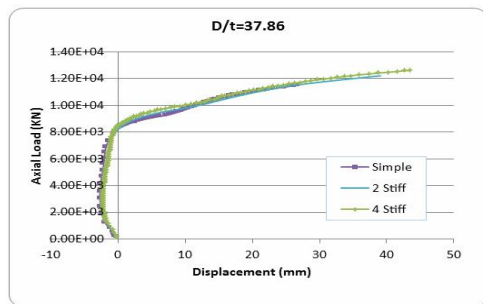
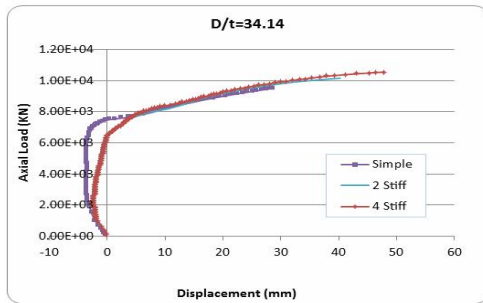
شکل ۱۱- مقایسه ظرفیت باربری نمونه‌های ساده، تقویت شده با ۲ و ۴ سخت کننده در زمان ۲۰ دقیقه



شکل ۱۲- مقایسه ظرفیت باربری با افزایش نسبت D/t در ستون‌های CFT در دمای محیط

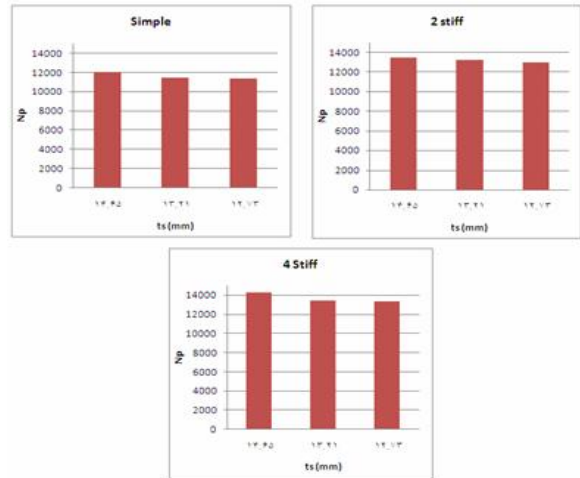
ملاحظه می‌گردد که با افزایش نسبت قطر ستون CFT، چنانچه ستون در برابر حرارت قرار داده شود، درصد افزایش ظرفیت باربری آن به مراتب بیش از هنگامی است که در دمای محیط قرار داشته باشد. به عبارت دیگر، افزایش قطر مقطع، تأثیر

ظرفیت باربری ستون CFT را در زمان اعمال حرارت و عدم اعمال آن، تقریباً به یک میزان افزایش داده‌اند.



شکل ۱۵- مقایسه ظرفیت باربری ستون‌ها با افزایش تعداد سخت‌کننده‌ها در زمان ۲۰ دقیقه با افزایش نسبت D/t

همچنین ملاحظه می‌شود که در مقاطع تقویت شده با سخت‌کننده، با افزایش تعداد سخت‌کننده‌ها از ۲ به ۴ عدد، ظرفیت باربری مقاطع افزایش چشم‌گیری پیدا خواهد کرد (حداکثر به میزان ۲٪). به همین دلیل، در ستون‌های CFT، به منظور افزایش ظرفیت باربری در برابر حرارت، استفاده از ستون‌های تقویت شده با ۲ سخت‌کننده، با توجه به درصد افزایش ظرفیت باربری، صرفه اقتصادی بیشتری نسبت به مقاطع تقویت شده با ۴ سخت‌کننده دارد.

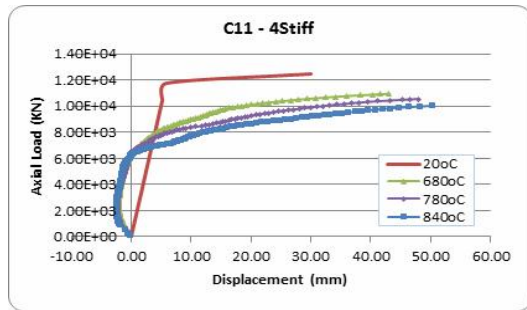
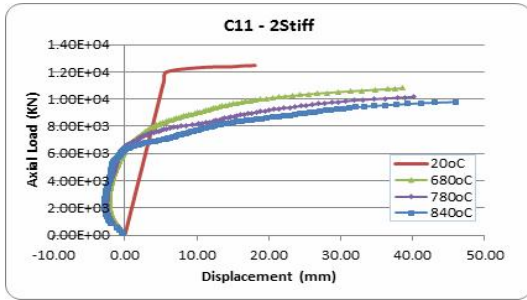
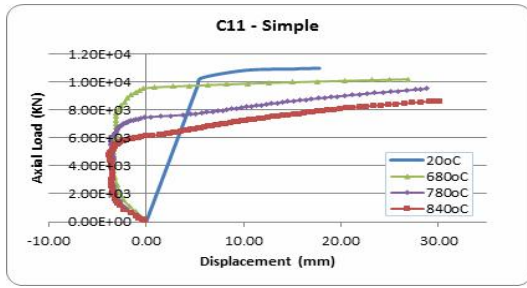


شکل ۱۴- مقایسه ظرفیت باربری ستون‌های در دمای محیط با کاهش ضخامت جدار فولادی

این اختلاف در ستون‌های تقویت شده با ۴ سخت‌کننده بیشتر از ستون‌های دیگر به چشم می‌خورد. علت آن است که در این ستون‌ها، تعداد بیشتر سخت‌کننده‌ها، موجب انتقال سریع‌تر حرارت به هسته بتنی شده و ستون مقاومت خود را سریع‌تر از دست خواهد داد.

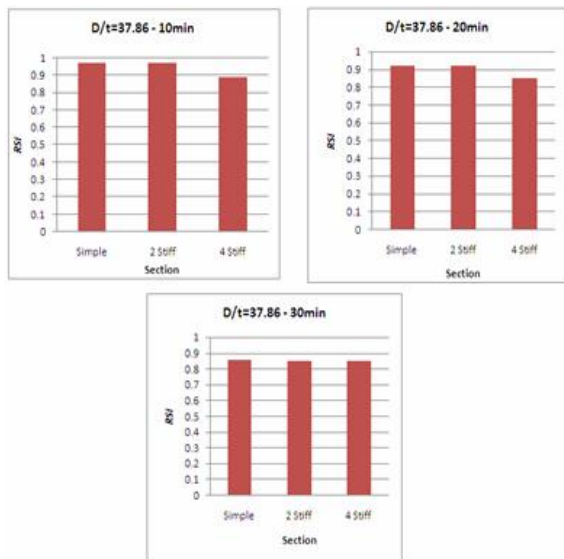
۵-۳- مقایسه ظرفیت باربری ستون‌های CFT با افزایش تعداد سخت‌کننده‌ها

با توجه به شکل (۱۵) که برای ستون قرار گرفته در معرض حرارت به مدت ۲۰ دقیقه به عنوان نمونه آورده شده است، ملاحظه شده است که با افزایش نسبت D/t در ستون‌ها، افزایش تعداد سخت‌کننده‌ها تأثیر کمتری بر افزایش ظرفیت باربری ستون داشته است. همچنین بیشترین تأثیر افزایش تعداد سخت‌کننده‌ها، در مدت زمان‌های قرارگیری دراز مدت ستون در برابر حرارت (۳۰ دقیقه) بوده است. ستون‌های تقویت شده با ۴ سخت‌کننده نیز، با آن‌که حرارت را از طریق سخت‌کننده‌ها سریع‌تر به هسته بتنی انتقال می‌دهند، دارای ظرفیت باربری بیشتری نسبت به ستون تقویت شده با ۲ سخت‌کننده بوده‌اند. در شکل (۱۶) نیز تأثیر افزایش تعداد سخت‌کننده‌ها در دمای محیط بر روی ظرفیت باربری نمونه‌ها نشان داده شده است. با مقایسه درصد‌های افزایش باربری در ستون‌های تحت اثر حرارت و ستون‌های قرارگرفته در دمای محیط، مشاهده می‌شود که با افزایش تعداد سخت‌کننده‌ها، ظرفیت باربری ستون‌ها، تقریباً به یک میزان افزایش داشته است. به عبارت دیگر، سخت‌کننده‌ها



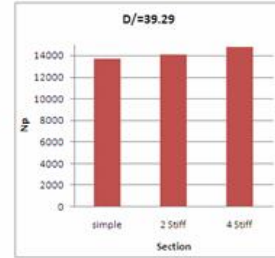
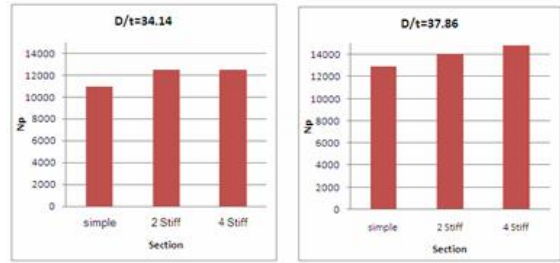
شکل ۱۷- مقایسه ظرفیت باربری ستون‌های گروه اول در دمای

محیط و افزایش دما در $D/t=37.86$



شکل ۱۸- مقایسه نسبت RSI ستون‌های CFT با افزایش

نسبت D/t



شکل ۱۶- مقایسه ظرفیت باربری ستون‌ها با افزایش تعداد سخت کننده‌ها در دمای محیط

۴-۵- شاخص RSI

یکی دیگر از معیارهای بررسی مقاومت ستون در برابر حرارت، محاسبه شاخص RSI برای ستون‌های CFT می‌باشد. شاخص RSI برابر نسبت حداکثر ظرفیت باربری ستون در معرض حرارت (N_p)، به حداکثر ظرفیت باربری ستون در دمای محیط (N_u) می‌باشد (رابطه (۱۵)) [۵]:

$$RSI = \frac{N_p}{N_u} \quad (15)$$

در این مرحله، ابتدا ظرفیت باربری ستون‌های CFT پیشنهادی در معرض حرارت (به مدت ۱۰، ۲۰ و ۳۰ دقیقه) محاسبه شده، سپس با تقسیم بر نتایج حاصل از محاسبه حداکثر ظرفیت باربری ستون‌های هم مقطع، تحت دمای محیط (20°C)، مقدار شاخص RSI تحت اثر پارامترهای مختلف بررسی شده است. به منظور بررسی شاخص RSI، تأثیر پارامترهایی از جمله قطر ستون و ضخامت جدار بر روی ظرفیت باربری ستون‌های CFT با یکدیگر مقایسه شده‌اند. این مقایسه‌ها به عنوان نمونه برای گروه اول و نسبت $D/t=37.86$ در شکل (۱۷) و (۱۸) آورده شده است.

با مشاهده شکل (۱۸)، ملاحظه می‌گردد که در ستون‌های تقویت شده با ۴ سخت کننده، استفاده از نسبت‌های D/t بالاتر از $37/86$ مقدار RSI را به میزان قابل توجهی افزایش نخواهد داد.

ستون قرار گرفته در معرض حرارت و ستون قرار گرفته در دمای محیط، تقریباً به یک میزان افزایش داده است.

۴- نسبت RSI ستون‌ها، با افزایش قطر ستون، افزایش یافته است به گونه‌ای که در بالاترین نسبت D/t (با ضخامت جدار ثابت)، RSI بیشترین مقدار را دارا بوده است. همچنین مقدار RSI با کاهش ضخامت جدار فولادی کاهش داشته است.

۵- افزایش تعداد سخت کننده‌ها در ستون CFT، از RSI مقطع کاسته است. بدین شرح که ستون‌های ساده، دارای بیشترین RSI و ستون‌های تقویت شده با ۴ سخت کننده دارای کمترین مقدار RSI بوده‌اند. دلیل این امر را می‌توان به انتقال سریع‌تر حرارت در ستون‌های تقویت شده عنوان نمود. به دلیل وجود سخت کننده‌ها، حرارت سریع‌تر به ستون‌های تقویت شده با ۴ سخت کننده منتقل شده و ظرفیت باربری این ستون‌ها را در دماهای بالا نسبت به دمای محیط، در مقایسه با ستون‌های تقویت نشده، کاهش بیشتری داده است.

۷- مراجع

- [1] Kim, D. K., "A Database for Composite Columns", MSc Thesis, Georgia Institute of Technology, USA, 2005.
- [۲] جاذبی، ف.، "سیستم ستون پرشده با بتن در آتش"، دانشجوی کارشناسی ارشد مدیریت ساخت - دانشگاه صنعتی امیرکبیر، سیویلیکا، www.civilica.com
- [3] Kodur, V. K. R., "Performance of High Strength Concrete-Filled Steel Columns Expose to Fire", NRC Canada, 975-981.
- [4] Han, L. H., Yang, Y. F., Yang, H., Huo, J. S., "Residual Strength of Concrete-Filled RHS Columns after Exposure to the ISO-834 Standard Fire", Thin-Walled Structures, 2002, 40, 991-1012.
- [5] Han, L. H., Yang, Y. F., Xu, L., "An Experimental Study and Calculation on the Fire Resistance of Concrete-Filled SHS and RHS Columns", Journal of Constructional Steel Research 2003, 59, 427-452.
- [6] Zha, X. X., "FE Analysis of Fire Resistance of Concrete Filled CHS Columns", Constructional Steel Research, 2003, 59, 769-779.
- [7] Han, L. H., Lin, X. K., "Tests on Cyclic Behavior of Concrete-Filled Hollow Structural Steel Columns after Exposure to the ISO-834 Standard Fire", Structural Engineering, 2004, 130 (11), 1807-1819.

همچنین در نسبت $D/t=39.29$ ، بیشترین شاخص RSI برای ستون‌های ساده و تقویت شده به دست آمده است. با افزایش تعداد سخت کننده‌ها نیز مقدار RSI روند نزولی دارد. دلیل این امر، انتقال حرارت سریع‌تر در ستون‌های تقویت شده می‌باشد که موجب تسلیم سریع‌تر هسته بتنی و کاهش ظرفیت باربری ستون نسبت به ظرفیت باربری در دمای محیط بوده است. همچنین با کاهش ضخامت جدار فولادی، شاخص RSI کاهش داشته است. بدین منظور، در ستون‌های CFT، با افزایش قطر و ضخامت جدار فولادی مقطع، می‌توان به نسبت‌های بالاتر RSI دست پیدا کرد.

۶- نتیجه‌گیری

هرچند نتایج و توصیه‌ها محدود به حالات در نظر گرفته شده برای تحلیل‌های انجام شده می‌باشند، اما انتظار می‌رود که این نتایج دارای حوزه عمل و کاربرد جامع‌تری از موارد در نظر گرفته شده در تحلیل‌های حاضر باشند. از عمده نتایج حاصل می‌توان به موارد ذیل اشاره نمود:

- ۱- افزایش قطر مقطع در ستون‌های ساده و تقویت شده، ظرفیت باربری را افزایش داده است. تأثیر افزایش قطر مقطع، بر ظرفیت باربری ستون CFT در برابر حرارت، چشم‌گیرتر از ستون قرار گرفته در دمای محیط بوده است.
- ۲- کاهش ضخامت جدار فولاد مقطع، موجب کاهش ظرفیت باربری ستون CFT گشته است. این نتیجه در مورد ستون‌های قرار گرفته در معرض حرارت و قرار گرفته در دمای محیط صادق است، با این تفاوت که کاهش ضخامت جدار مقطع فولادی، ظرفیت باربری ستون CFT را در برابر حرارت بیشتر از ستون قرار گرفته در دمای محیط پایین‌تر آورده است.
- ۳- افزایش تعداد سخت کننده‌ها، در ظرفیت باربری ستون CFT، تأثیر بسزایی داشته است. ستون تقویت شده با ۴ سخت کننده، دارای بیشترین ظرفیت باربری نسبت به ستون‌های با مقاطع دیگر بوده است، حتی با افزایش مدت قرارگیری ستون‌ها در معرض حرارت، ستون تقویت شده با ۴ سخت کننده، از ظرفیت باربری بالاتری برخوردار بوده است. همچنین افزایش تعداد سخت کننده‌ها از ۲ به ۴ عدد، ظرفیت باربری ستون را به میزان چشم‌گیری افزایش نداده است. لذا به منظور دست‌یابی به ظرفیت‌های بالا در ستون CFT، استفاده از مقطع تقویت شده با ۲ سخت کننده نیز جوابگو خواهد بود. همچنین مشاهده گردید که افزایش تعداد سخت کننده‌ها، ظرفیت باربری ستون را در

- Structural (HSS) Stub Columns", *Constructional Steel Research*, 2005, 61, 962-983.
- [18] Abedi, K., Ferdousi, A., Afshin, H., "A Novel Steel Section for Concrete-Filled Tubular Columns", *Thin-Walled Structures*, 2008, 46, 310-319.
- [19] ANSYS (Ver. 11), "Reference Manuals (Theory, Elements, Analysisguide, and Comments)", SAS IP Inc.
- [20] Schneider, S. P., "Axially Loaded Concrete Filled Steel Tubes", *Structural Engineering*, 1998, 124 (10), 1125-1138.
- [21] Lie, T. T., Chabot, M., "Experimental Studies on the Fire Resistance of Hollow Steel Columns Filled with Plain Concrete", Ottawa, Canada: NRC-CNRC Internal Report. No 611, 1992.
- [22] Lv, T. G., "Experimental Research on Strength and Deformation of Reinforcing Bars at High Temperatures", MSc Thesis Tsinghua University, 1996 [in Chinese].
- [23] Han, L. H., "Concrete Filled Steel Tubular Structures", Second Edition, China Science Press, Beijing, 2007 [in Chinese].
- [24] Eurocode 4, "Design of Composite Steel and Concrete Structures", Part 1: General rules and rules for building, CEN, 2001.
- [25] Eurocode 4, "Design of Composite Steel and Concrete Structures", Part 6.1: General rules and rules for building, CEN, 2001.
- [26] Lie, T. T., Stringer, D. C., "Calculation of the Fire Resistance of Steel Hollow Structure Section Columns Filled with Plain Concrete", *Journal of Civil. Engineering* 1994, 21 (3), 382-385.
- [8] Yin, J., Zha, X. X., Li, L. Y., "Fire Resistance of Axially Loaded Concrete Filled Steel Tube Tolumns", *Constructional Steel Research*, 2006, 62, 723-729.
- [9] Taoa, Zh., Han, L. H., Wang, L. L., "Compressive and Flexural Behaviour of CFRP-Repaired Concrete-Filled Steel Tubes After Exposure to Fire", *Constructional Steel Research*, 2007, 63, 1116-1126.
- [10] Chung, K., Park, S., Choi, S., "Material Effect for Predicting the Fire Resistance of Concrete-Filled Square Steel Tube Column under Constant Axial Load", *Constructional Steel Research*, 2008, 64, 1505-1515.
- [11] Song, T. Y., Han, L. H., Yu, H. G., "Concrete Filled Steel Tube Stub Columns under Combined Temperature and Loading", *Constructional Steel Research*, 2009, 66 (3), 366-384.
- [12] Yang, H., Han, L. H., Wang, Y. C., "Effects of Heating and Loading Histories on Post Fire Cooling Behaviour of Concrete Filled Steel Tubular Columns", *Journal of Constructional Steel Research*, 2008, 64 (5), 556-570.
- [13] ISO, "ISO-834 Fire-Resistance Tests-Elements of Building Construction", International Standard ISO834: Amendment 1, Amendment 2, 1980.
- [14] Wang, Y. C., "Some Considerations in the Design of Unprotected Concrete-Filled Steel Tubular Columns under Fire Conditions", *Journal of Constructional Steel Research Steel. Res.* 1997, 44 (3), 203-223.
- [15] Yu, M., Zha, X., Ye, J., Li Y., "Fire Responses and Resistance of Concrete-Filled Steel Tubular Frame Structures", *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 2009, 10 (2), 251-271.
- [۱۶] هولمن، جی. پی. "انتقال گرما"، نشر کتاب دانشگاهی، ۱۳۸۶، فصل دوم، ص. ۴۱.
- [17] Tao, Zh., Han, L. H., Wang, Z. B., "Experimental Behaviour of Stiffened Concrete-filled Thin-Walled Hollow Steel

EXTENDED ABSTRACT

Fire Resistance of Stiffened Circular Concrete-Filled Steel Tubular (CFT) Columns

Saman Mohammad Alizadeh, Karim Abedi *

Department of Civil Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran

Received: 14 March 2012; **Accepted:** 21 October 2012

Keywords:

Fire resistance, CFT columns, Confinement, Heat transfer, Stiffeners

1. Introduction

The concrete-filled steel tube (CFT) column is a composite system that is made with concrete as inner core and thin walled steel as outer tube. The enhancement of load capacity, increase in lateral stiffness, inherent ductility, use in high rise and long span buildings and fire resistance, are some benefits of CFT columns [1]. Columns are the most parts of buildings in fire that carry loads of structure. When fire happens in a structure with CFT columns, the steel tube is the first part of these columns, subjected to fire. Therefore, the steel tube expands and concrete core carries remaining loads. It's a main disadvantage of CFT columns [2]. In the present study, finite element modeling of stiffened circular CFT columns is presented. The main characteristic of the stiffened CFT column is internal longitudinal symmetric stiffeners its internal stiffeners that are longitudinal and symmetric. For predicting the load capacity of the proposed sections of CFT columns, the time – temperature curve is applied to the model.

2. Methodology

2.1. Fire exposure

The temperature of the column rises up (Eq. (1)) and cools down (Eq. (2)) according to the ISO-834 fire curve (Fig. 1) [3-5]. The temperature is applied to nodes of the columns.

$$T = T_0 + 345 \text{Log}(8t + 1) \tag{1}$$

$$\begin{cases} T = T_h - 10.417 (t - t_h) & t_h \leq 30 \\ T = T_h - 4.167(3 - t_h/60) (t - t_h) & 30 < t_h \leq 120 \\ T = T_h - 4.167(t - t_h) & t_h > 120 \end{cases} \tag{2}$$

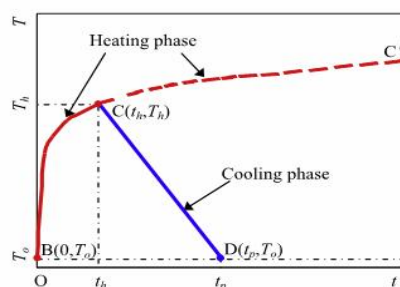


Fig. 1. ISO-834 (1980) standard fire curve

* Corresponding Author

E-mail addresses: Saman_M_Alizadeh@yahoo.com (Saman Mohammad Alizadeh), K_Abedi@sut.ac.ir (Karim Abedi)

where T is the fire temperature in $^{\circ}\text{C}$; t is fire exposure time in minute; “ $B-C-C$ ” is the heating phase; “ $C-D$ ” is the cooling phase; “ C ” is the starting point of cooling; T_o is the ambient temperature in $^{\circ}\text{C}$; t_h is the fire duration time in min; T_h is the maximum fire temperature in $^{\circ}\text{C}$ and t_p is the total fire exposure time in min.

2.2. Heat transfer analysis

The heat transfer process in concrete filled steel tubes includes radiation, convection and heat conduction, all of them are varying with time. There are four heat transfer processes, from fire to outer steel tube surface, from outer to inner steel tube surface, from inner steel tube surface to outer concrete surface and heat transfer into core of concrete from concrete surface [6,7].

2.3. Suggested sections

One of the main disadvantages of CFT columns is the expansion of the steel tube when subjected into the fire. Therefore, the confinement of core and finally, the load capacity of CFT column will be decreased. In order to improve the performance of CFT columns, subjected to the fire, a stiffened steel section is suggested in CFT columns as shown in Fig. 2. The stiffeners enhance the confinement of columns by increasing the contact area between steel and concrete. Hence, the confinement of CFT columns is preserved in heating and cooling stage of the fire exposure. Therefore, it is expected that the load carrying capacity of CFT column to be increased.

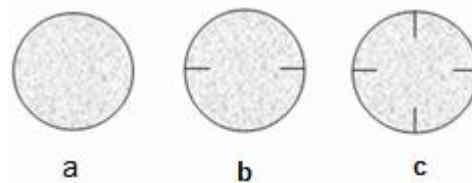


Fig. 2. Suggested sections for CFT columns: (a) Simple, (b) with 2 stiffeners, (c) with 4 stiffeners

2.4. Finite element modeling

In the present study, finite element modeling of stiffened circular CFT columns is presented. These models have been analyzed using ANSYS (Ver. 11) [8]. In order to investigate into the behavior of the stiffened CFT columns under axial and thermal loadings, FE analyses should be undertaken involving the geometric and material nonlinearities. Three-dimensional solid element (Solid 65) has been used for modeling of the concrete core, shell element (Shell 43) has been used for modeling of the steel tube. Three-dimensional node-to-node contact element (Contact 178) has been used to model the contact between steel wall and concrete core. Modeling of separation, sliding and contact between two nodes during the loading process are the capabilities of this element. Fig. 3 shows the CFT column, modeled in ANSYS.

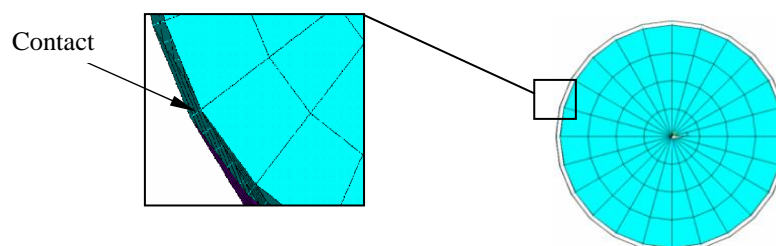


Fig. 3. FE modeling of CFT column

2.5. Verification of finite element modeling

The material properties of concrete and steel are changing when subjected to the fire. Therefore, some researchers define material properties in ambient temperature, heating and cooling phases. In order to verify the accuracy and validity of the finite element modeling, the numerical results, obtained from nonlinear static analysis, have been compared with the experimental results of the CFT columns. Regarding the axial loading, an experimental CFT column with circular section has been used according to the specifications undertaken by Schneider [9] and in order to verify the accuracy and validity of the equations used for applying fire to the CFT column, model specifications are according to Han [10]. Consequently, it has been found that the finite element

model is reliable enough to be used to undertake nonlinear analyses for comparative investigation into the behavior of the sections of CFT columns with and without stiffeners.

2.6. Material heat coefficients

The thermal coefficients in CFT columns have been investigated by many researchers. In the present paper, the coefficients for concrete and steel tube, provided by Lie and Stringer [11], are adopted. The thermal properties such as conductivity coefficient (k), specific heat (c), density (ρ) and coefficient of expansion (α) have been defined in these equations. Also, they considered the water evaporation of core concrete after being exposed to the fire. In the evaluation of temperature, k and α decrease, and c increases after a few minutes of fire exposure. They also considered these specifications of concrete and steel in their relations.

3. Results and discussions

A total of 54 CFT stub columns, in three types, including simple, 2 and 4 stiffened circular CFT columns, have been analyzed after subjected to fire. The specimens are divided into two groups (with the same wall thickness and with the same diameter). All of the specimens, have the same wall thickness and the D/t ratio increased in three steps. All of the specimens are subjected to real fire in ANSYS in three time durations, namely 10 minutes (680°C), 20 minutes (780°C) and 30 minutes (840°C) according to standard fire curve, shown in Fig. 2. In suggested sections the area of stiffeners, is 30% of total area of CFT column and $L=3810\text{mm}$. For steel, we have: $F_y=293\text{MPa}$ and $E_s=2.01e5\text{MPa}$. For concrete, we have: $f_c=39.6\text{MPa}$ and $E_c=27800\text{MPa}$.

4. Conclusions

In the present study, finite element modeling of stiffened circular CFT columns is presented. The main characteristic of the stiffened CFT column is its internal stiffeners that are longitudinal and symmetric. These models have been analyzed using ANSYS. Having verified the finite element modeling, several different analyses have been undertaken. Based on the results of analyses, the main conclusions are as follows:

- Increasing the tube diameter in simple and stiffened CFT columns has increased the load carrying capacity of columns. The increase rate of the load capacity in CFT columns during fire exposure is more considerable than ambient temperature.
- Decrease in the wall thickness of CFT columns, in simple and stiffened columns, decreases the load carrying capacity of columns. The decrease rate of the load capacity in CFT columns during fire exposure is more considerable than ambient temperature.
- Increasing the number of stiffeners has enhanced the load carrying capacity of CFT columns. However, increasing the number of stiffeners from 2 to 4 dose not have considerable effect on the load carrying capacity of CFT sections (only 2%). Therefore, the use of 2 stiffeners is more economic, and strongly recommended for CFT columns subjected to fire.
- The residual strength index (RSI) is defined to quantify the strength of the CFT columns to standard fire. RSI is the ratio of ultimate strength corresponding to the fire duration time into the ultimate strength at ambient temperature [10]. According to the analysis results, decreasing the number of stiffeners and increasing the tube diameter, has enhanced the RSI of CFT columns.

5. References

- [1] Kim, D. K., "A Database for Composite Columns", MSc Thesis, Georgia Institute of Technology, USA, 2005.
- [2] Jazebi, F., "The Column Filled Concrete System against the Fire", www.civilica.com.
- [3] Song, T. Y., Han, L. H., Yu, H. G., "Concrete Filled Steel Tube Stub Columns under Combined Temperature and Loading", *Constructional Steel Research*, 2009, 66 (3), 366-384.
- [4] Yang, H., Han, L. H., Wang, Y. C., "Effects of Heating and Loading Histories on Post Fire Cooling Behaviour of Concrete Filled Steel Tubular Columns", *Constructional Steel Research*, 2008, 64 (5), 556-570.
- [5] "ISO 834, "Fire Resistance Tests-Elements of Building Construction", Amendments 1 and 2, 1980.
- [6] Wang, Y. C., "Some Considerations in the Design of Unprotected Concrete-Filled Steel Tubular Columns under Fire Conditions", *Journal of Constructional Steel Research* 1997, 44 (3), 203-223.
- [7] Yu, M., Zha, X., Ye, J., Li Y., "Fire Responses and Resistance of Concrete-Filled Steel Tubular Frame Structures", *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 2009, 10 (2), 251-271.
- [8] ANSYS (Ver. 11), "Reference Manuals: Theory, Elements, Analysis Guide, and Comments", SAS IP Inc, USA.
- [9] Schneider, S. P., "Axially Loaded Concrete Filled Steel Tubes", *Structural Engineering*, 1998, 1125-1138.
- [10] Han, L. H., Yang, Y. F., Xu, L., "An Experimental Study and Calculation on the Fire Resistance of Concrete-Filled SHS and RHS Columns", *Journal of Constructional Steel Research*, 2003, 59, 427-452.
- [11] Lie, T. T., Stringer, D. C., "Calculation of the Fire Resistance of Steel Hollow Structure Section Columns Filled with Plain Concrete", *Journal of Civil Engineering* 1994, 21 (3), 382-385.