



بررسی رفتار ستون های فولادی پر شده با بتن و تقویت شده با مقاطع فولادی (SR-CFT) تحت بارگذاری محوری خارج از مرکز

امیر بهشت آیین^۱، کریم عابدی^۲

۱- دانشگاه آزاد اسلامی واحد فسا

۲- دانشگاه صنعتی سهند تبریز

amir_behesht_aein@yahoo.com

خلاصه

نوع جدیدی از ستون های مرکب فولادی-بتنی، ستون های فولادی پر شده با بتن و تقویت شده با مقطع فولادی می باشند که به اختصار SR-CFT نامیده می شوند. در این مقاله با استفاده از روش عناصر محدود به بررسی رفتار این نوع جدید از مقاطع مرکب تحت بارگذاری محوری خارج از مرکز پرداخته شده است. از نتایج بدست آمده روابطی برای تخمین منحنی اندرکنش بار محوری- لنگر این ستون ها ارایه شده و توصیه هایی برای طراحی این مقاطع تحت بارگذاری محوری خارج از مرکز پیشنهاد گردیده است.

کلمات کلیدی: ستون های مرکب، ستون های CFT، بارگذاری محوری خارج از مرکز، ستون های SR-CFT

مقدمه

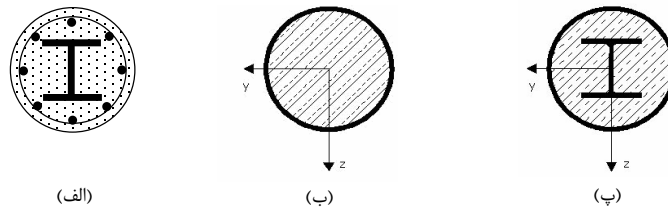
ستون های مرکب عمدتاً به دو روش متداول ساخته می شوند. در روش اول ستون های فولادی با بتن پر می شوند (CFT) و در روش دوم ستون های فولادی در بتن مدفون می گردند (SRC). در حالت ستون های فولادی مدفون در بتن، هسته فولادی می تواند مقاومت برشی ستون را بهبود بخشد. پوشش بتنی، هسته فولادی را در مقابل هر دو کمانش موضعی و کلی مقاوم تر می سازد [۱]. پوشش بتنی همچنین حفاظی در مقابل خوردگی در برابر مواد شیمیایی و یک عایق در برابر افزایش سریع دما در حضور آتش را تامین می نماید. عیب اصلی ستون های فولادی مدفون در بتن این است که یک قفسه تقویتی به منظور جلوگیری از پوسته شدن پوشش بتنی در سطوح پایین بار لازم است. بنابراین، ستون های فولادی مدفون در بتن به یک قالب بندی گسترده در حین ساخت، بویژه در اتصالات تیر به ستون، احتیاج دارند. از طرف دیگر، ستون های CFT احتیاجی به قفسه تقویتی و قالب بندی ندارند. بتن داخل لوله فولادی در پایداری لوله فولادی شرکت داشته، و لوله فولادی به نوبه خود محدود کننده کننگدی جانبی موثری را بر روی بتن دارد. این نوع محبوس شدگی پیوسته می تواند شکل پذیری و مقاومت بتن با مقاومت عادی و بالا را بهبود بخشد [۲ و ۳]. اساسی ترین عیب ستون های CFT این است که لوله فولادی بدون پوشش بوده، بنابراین منجر به یک مقاومت پایینتر در برابر آتش در مقایسه با ستون های فولادی مدفون در بتن می شود.

با ایجاد یک مقطع جدید که ترکیبی از هر دو مقطع می باشد، یعنی قراردادن یک مقطع فولادی تقویتی در داخل یک ستون (CFT)، می توان تا حدودی معایب هر دو نوع مقطع را رفع نمود و در عین حال از مزایای هر دو بهره گرفت. این ستون ها به ستون های فولادی پر شده با بتن و تقویت شده با مقطع فولادی (SR-CFT) مشهور هستند.

در شکل (۱) نحوه ترکیب و شکل گیری این نوع جدید ستون ها نشان داده شده است.

^۱ کارشناس ارشد سازه

^۲ دانشیار دانشگاه صنعتی سهند



شکل ۱- (الف) مقطع SRC؛ (ب) مقطع CFT؛ (پ) مقطع SR-CFT

مدلسازی عناصر محدود و بررسی صحت آن

برای مطالعه رفتار یک عضو یا یک سازه می توان از دو روش آزمایشگاهی یا مدلسازی عناصر محدود استفاده نمود. بدیهی است که مطلوب ترین روش بررسی رفتار سازه ها، مطالعات تجربی آزمایشگاهی می باشد. ولی در صورت کمبود امکانات می توان از مدلسازی عناصر محدود استفاده نمود به شرط اینکه مدلسازی مذکور صحت سنجی شود. در این مطالعه نیز برای مدلسازی عناصر محدود از نرم افزار ANSYS 9.0 استفاده شده است. بدین منظور برای مدلسازی ستون های CFT و SR-CFT از المان های زیر استفاده شده است:

- برای مدل کردن پوسته فولادی و مقطع فولادی ساختمانی از المان SOLID 45 استفاده شده است. این المان شش وجهی هشت گرهی با سه درجه آزادی انتقالی در هر گره تعریف می شود و دارای قابلیت های اعمال تغییرشکل های پلاستیک، خزش، تورم، سخت شدگی تنش، تغییرشکلها و کرنش های بزرگ بوده و همخوانی مناسبی با سایر المان های بکار رفته در مدل کردن ستون های CFT و SR-CFT دارد [۴].
 - برای مدل کردن تماس بین پوسته فولادی و بتن هسته، از المان اصطکاکی سه بعدی گره به گره 52 CONTACT استفاده شده است [۴].
 - برای مدل کردن هسته بتنی از المان سه بعدی ایزوپارامتریک SOLID 65 استفاده شده است. این المان شش وجهی هشت گرهی با سه درجه آزادی انتقالی در هر گره تعریف می شود. مصالح اعمالی از جنس بتن با قابلیت ترک در تنشهای کششی و شکست در تنشهای فشاری در سه جهت متعامد و نیز تغییرشکلهای پلاستیک می باشد [۴].
- در جدول (۱) مشخصات هندسی و مصالح ستون CFT تعیین صحت شده با ANSYS ارایه شده است.

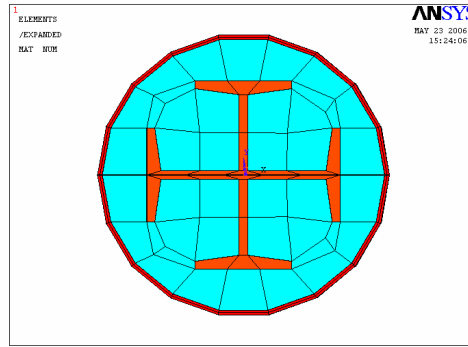
جدول ۱- مشخصات هندسی و مصالح ستون CFT [۳۷]

Specimen No.	Shape	Length (mm)	Outer nominal diameter (mm)	Actual Dimensions (mm)	Actual Thickness (mm)	D/t ratio	L/t ratio	Steel properties		Concrete properties	
								F _y (MPa)	E _s (MPa)	F' _c (KPa)	E _c (MPa)
C1	مربع	605.44	140	140.8	3.00	47	4.3	285	189475	28180	25599

در جدول (۲) نیز مشخصات هندسی و مصالح ستون SR-CFT تعیین صحت شده با ANSYS ارایه شده است. همچنین در شکل (۲) سطح مقطع ستون SR-CFT نشان داده شده است.

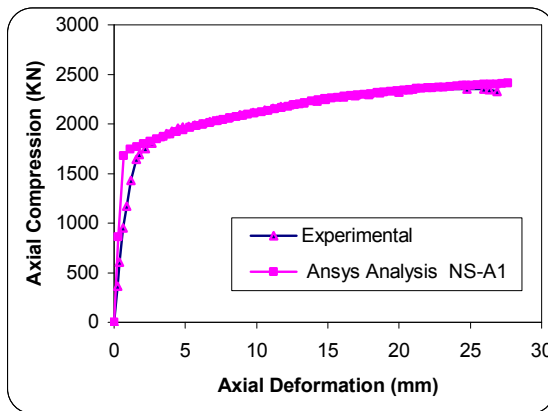
جدول ۲- مشخصات هندسی و مصالح ستون های SR-CFT تعیین صحت شده با ANSYS [۵]

Specimen No.	Length (mm)	D (mm)	t (mm)	D/t ratio	L/D ratio	F _y ^t (MPa)	E _t (MPa)	A _s (mm ²)	F _y ^s (MPa)	E _s (MPa)	F' _c (MPa)	E _c (MPa)
NS-A1	465	166	2.7	61.5	2.8	318	191	2324	288	207	29.6	33490

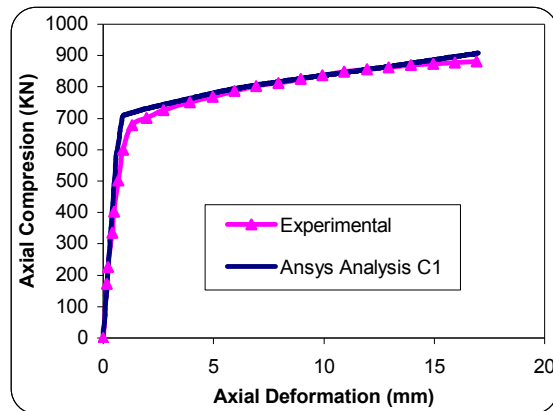


شکل ۲- سطح مقطع ستون SR-CFT

نمودارهای مقایسه ای نتایج تحلیلی و آزمایشگاهی در اشکال (۳ و ۴) ارائه شده است. چنانکه مشاهده می شود مدل انتخاب شده از دقت کاربردی برخوردار بوده و قابل تعمیم به سایر اشکال و خصوصیات مقطع می باشد. اختلاف جزئی که در بین نمودارهای هر یک از نمونه‌ها ملاحظه می شود از خصوصیات یک مسئله با تقریب سازی عددی است. همچنین اختلاف در مقاومت و رفتار بتن و فولاد در عمل، محدود کردن تغییرشکل ها به منظور دست یابی به همگرایی و نیز وجود ناکاملی های جزئی در نمونه‌های واقعی می توانند باعث ایجاد این اختلاف شوند.



شکل ۴- مقایسه بین نتایج آزمایشگاهی و تحلیلی نمونه NS-A1



شکل ۳- مقایسه بین نتایج آزمایشگاهی و تحلیلی نمونه CFT

بررسی رفتار ستون های فولادی پر شده با بتن و تقویت شده با مقطع فولادی (SR-CFT) تحت بارگذاری خارج از مرکز با استفاده از مدل سازی عناصر محدود

با توجه به صحت سنجی صورت گرفته، اکنون می توان با استفاده از مدل سازی عناصر محدود به بررسی رفتار ستون های فولادی پر شده با بتن و تقویت شده با مقطع فولادی تحت بارگذاری خارج از مرکز پرداخت. بدین منظور چهار نوع ستون دایره ای با مشخصات ارائه شده در جدول (۳) مورد بررسی قرار گرفتند. در ابتدا ستون C-CFT مورد تحلیل قرار گرفت. سپس سه نوع ستون SR-CFT با مقاطع CB 200 mi، CB 200 mj و C-Cross مورد تحلیل قرار گرفتند. شایان ذکر است که مقطع CB 200 mi بیانگر ستون CFT دایره ای تقویت شده با IPB 200 بوده که حول محور ضعیف^۱ مقطع فولادی تقویتی تحت خمش قرار می گیرد و مقطع CB200 mj نشانگر ستون CFT دایره ای تقویت شده با IPB 200 می باشد که حول محور قوی^۲ مقطع فولادی تقویتی تحت خمش قرار دارد، و هدف از انتخاب آنها بررسی اثر ممان اینرسی سطح مقطع فولادی تقویتی، تحت بارگذاری محوری خارج از مرکز می باشد. فرضیاتی که در انتخاب این مقاطع و تحلیل آنها مورد نظر بوده است بدین شرح می باشد:

- سطح مقطع پوسته فولادی و بتن و نیز مشخصات مصالح برای هر چهار نوع ستون یکسان می باشد.
- مقاطع فولادی تقویتی IPB 200 و مقطع صلیبی طوری انتخاب گردیده اند که مساحت سطح مقطع آنها برابر باشد.

¹ Minor Axis

² Major Axis



- شرایط تکیه گاهی یا انتهایی ستون ها بصورت دو سر مفصل می باشد که با مدل کردن دو صفحه صلب در بالا و پایین ستون صورت گرفته است.
- خروج از مرکزیت های اعمال شده به دو انتهای ستون در جدول (۴) ارائه گردیده است.
- خروج از مرکزیت های دو انتها بصورتی اعمال شده اند که تغییرشکل ستون بصورت تک انحناء باشد.

جدول ۳- مشخصات ستون های دایره ای مورد مطالعه

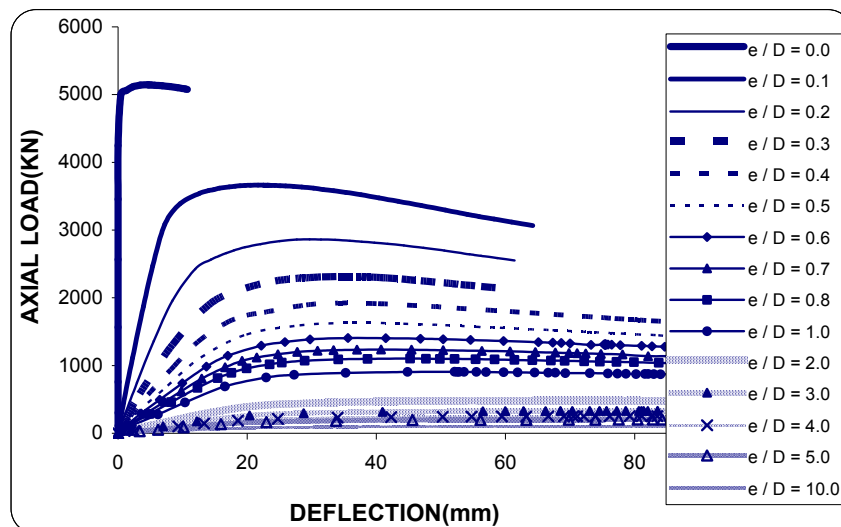
شماره نمونه	شکل مقطع	قطر (mm)	مقطع فولادی	ضخامت پوسته (mm)	f_y (MPa)	E_s (MPa)	f'_c (MPa)	E_c (MPa)	ρ_s %	I_{ss} (mm ⁴)	L (mm)
C-CFT	دایره	300	—	6	240	2E5	40	3E4	—	—	4000
CB 200 mi	دایره	300	IPB 200 major ¹	6	240	2E5	40	3E4	11.03	2.0 e7	4000
CB 200 mj	دایره	300	IPB 200 minor ²	6	240	2E5	40	3E4	11.03	5.51 e7	4000
C-Cross	دایره	300	Cross	6	240	2E5	40	3E4	11.03	3.35 e7	4000

جدول ۴- مقادیر خروج از مرکزیت

e/D	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	10.0
-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	------

مقایسه ستون های SR-CFT با ستون CFT

هر چهار ستون تحت بارهای با خروج از مرکزیت ارایه شده در جدول (۴) قرار می گیرند. برای نمونه نتایج مقایسه ای منحنی های بار-خیز ستون C-Cross برای خروج از مرکزیت های مختلف در شکل (۵) نشان داده شده است.

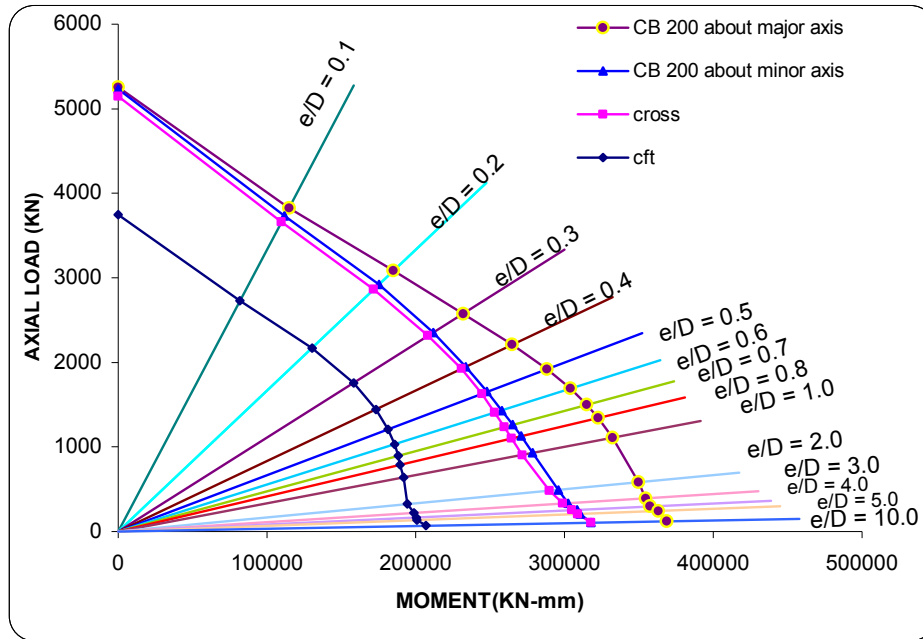


شکل ۵- نمودار مقایسه ای بار-خیز ستون C-Cross

به منظور مشاهده تاثیر شکل سطح مقطع فولاد تقویتی در شرایط بارگذاری خارج از مرکز و همچنین مقایسه منحنی اندرکنش لنگر-بار محوری ستون های SR-CFT با ستون CFT، منحنی اندرکنش لنگر-بار محوری یا منحنی پوش خرابی ستون تحت بار محوری و لنگر برای هر چهار مقطع مورد بررسی، که از حداکثر بار تحمل شده توسط ستون استفاده شده است، در شکل (۶) ارایه شده است.

¹ Bending about major axis

² Bending about minor axis



شکل ۶- نمودار مقایسه ای منحنی اندرکنش لنگر- بار محوری ستون ها

همچنین به منظور درک بهتر از افت باربری ستون با افزایش خروج از مرکزیت، با تقسیم مقادیر محور افقی منحنی بار محوری- لنگر، به لنگر حداکثر در حالت بارگذاری لنگر خالص (با تقریب $e/D=10$) و مقادیر محور قائم آن به بار محوری حداکثر در حالت بارگذاری بدون خروج از مرکزیت، منحنی بدون بعد می گردد. منحنی اندرکنش لنگر- بار محوری بدون بعد شده هر چهار مقطع مورد بررسی، به منظور استخراج یک رابطه کلی برای هر چهار ستون، همراه با منحنی بدست آمده از رابطه، در شکل (۷) نشان داده شده است. به منظور بدست آوردن یک رابطه کلی برای هر چهار ستون، می توان رابطه زیر را برای منحنی اندرکنش هر چهار مقطع استخراج نمود:

$$m = \frac{(1 - 2n + n^2)}{(1 - n - 0.78n^2 + 0.8n^3)} \quad (1)$$

که در آن $n = \frac{N}{N_{max}}$ و $m = \frac{M}{M_{max}}$ می باشند.

همان طور که مشاهده می گردد رابطه فوق با ستون m_j CB 200 انطباق خوبی داشته و نسبت به ستون C-CFT محافظه کارانه و نسبت به ستون های CB200 mi و C-Cross مقداری غیر محافظه کارانه می باشد.

در صورت عدم تمایل به استفاده از رابطه (۱) که برای یکی از ستون ها محافظه کارانه و برای دو ستون دیگر غیرمحافظه کارانه می باشد، می توان از رابطه (۲) استفاده نمود:

$$m = \frac{(1 - 2n + n^2)}{(1 - n - C_1n^2 + C_2n^3)} \quad (2)$$

که در آن $n = \frac{N}{N_{max}}$ و $m = \frac{M}{M_{max}}$ می باشند.

$$C_1 = 0.79 \quad C_2 = 0.795$$

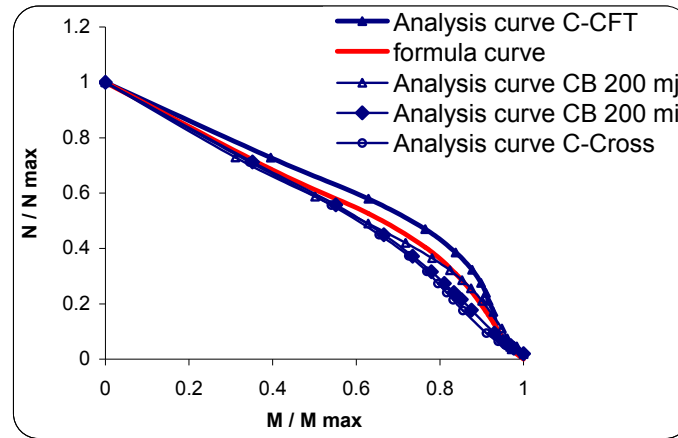
$$C_1 = 0.76 \quad C_2 = 0.8$$

$$C_1 = 0.73 \quad C_2 = 0.8$$

برای ستون C-CFT

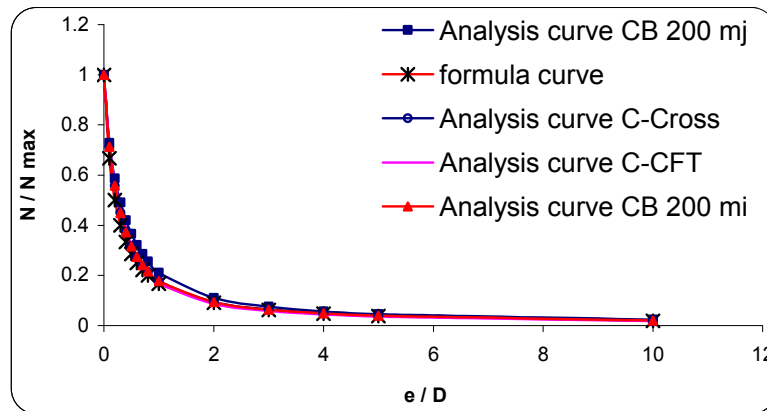
برای ستون m_j CB 200

برای ستون های CB200 mi و C-Cross



شکل ۷- مقایسه بین منحنی اندرکنش بدست آمده از تحلیل و منحنی بدست آمده از رابطه برای هر چهار ستون

به منظور مقایسه اثر خروج از مرکزیت و شکل سطح مقطع فولاد تقویتی در باربری ستون های SR-CFT و همچنین مقایسه ستون های SR-CFT با ستون CFT تحت بار خارج از مرکز، نمودار مقایسه ای اثر خروج از مرکزیت در درصد کاهش باربری ستون که از تقسیم مقادیر بار محوری به بار محوری حداکثر قابل تحمل توسط ستون در حالت بارگذاری بدون خروج از مرکزیت بدست آمده است، برای هر چهار نمونه به منظور استخراج یک رابطه کلی، در شکل (۸) رسم شده است. با توجه به شکل می توان از رابطه (۳) استفاده نمود، که برای ستون CB 200 mj مقداری محافظه کارانه بوده ولی با منحنی تحلیلی سایر ستون ها تطابق خوبی دارد.



شکل ۸- نمودار مقایسه ای اثر خروج از مرکزیت در درصد کاهش باربری ستون

$$n = \frac{1}{(1 + 5(e/D))} \quad (3)$$

که در آن $n = \frac{N}{N_{max}}$ می باشد.

نتیجه گیری

از مقایسه نمودار های دو ستون CB 200 mj و CB 200 mi مشخص است که ممان اینرسی مقطع فولادی تقویتی حول محور خمش تاثیر زیادی در میزان باربری ستون SR-CFT دارد، اما با مقایسه منحنی اندرکنش لنگر- بار محوری ستون C-Cross نسبت به ستون CB 200 mi مشاهده می گردد با وجود اینکه ممان اینرسی مقطع صلیبی در حدود ۱/۷ برابر ممان اینرسی مقطع IPB 200 حول محور ضعیف خود می باشد، منحنی اندرکنش لنگر- بار محوری ستون C-Cross پایینتر از منحنی اندرکنش لنگر- بار محوری ستون CB 200 mi قرار می گیرد و قابل قبول ترین توجه برای آن، این است که



مقطع صلیبی بدلیل داشتن تعداد بال و جان بیشتر نسبت به مقطع IPB 200، سطح مقطع هسته بتنی را به تعداد قسمت های بیشتری تقسیم می نماید و این باعث کاهش ممان اینرسی مقطع بتنی می گردد و در نتیجه باربری ستون تحت بار خارج از مرکز کاهش می یابد.

توصیه طراحی

در طراحی ستون های SR-CFT تحت اثر بار خارج از مرکز، توصیه می شود که تا حد امکان از انتخاب مقاطعی که دارای بال و جان زیادی بوده و مقطع بتنی را به تعداد قسمتهای زیادی تقسیم می نماید، خودداری نمود.

مراجع

1. Dowling, P. J., Harding, J. E., Bjorhovde and Reider, (1992) Constructional steel design, An International Guide. *Elsevier Applied Science*.
2. Uy, B. (2003) High-strength steel-concrete composite columns for buildings. *Proceeding of institution of civil engineering, structures & building*, 156(1), 3-14.
3. Han, L. H. (2001) Fire performance of concrete filled steel tubular beam-columns. *Journal of constructional steel research*, 57, 695-709
4. ANSYS Help (5.5-5-62). *Theory, Element & Analyses Guide*.
5. Wang, Q., Zhao, D. and Guan, P. (2004) Experimental study on the strength and ductility of steel tubular columns filled with steel-reinforced concrete. *Engineering Structures*, 26, 907-915.
6. Schneider, B. P. (1998) Axially loaded concrete filled steel tubes. *Journal of structural Engineering*, 124(10), 1125-1138.