

بررسی رفتار سازه‌های ستون‌های دوجداره فولادی پر شده با بتن (CFDST)

هیواچوگلی^۱، محمدرضاچناقلو*^۲ و کریم عابدی^۳

^۱دانش آموخته کارشناسی ارشد سازه دانشکده مهندسی عمران - دانشگاه صنعتی سهند تبریز

^۲دانشیار دانشکده مهندسی عمران - دانشگاه صنعتی سهند تبریز

^۳استاد دانشکده مهندسی عمران - دانشگاه صنعتی سهند تبریز

(تاریخ دریافت ۸۵/۱۱/۷، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده ۸۹/۶/۳، تاریخ تصویب ۸۹/۱۰/۲۸)

چکیده

در این مقاله ستون‌های دوجداره فولادی که با بتن پر می‌شوند و از خانواده ستون‌های CFT به شمار می‌روند، مورد ارزیابی قرار گرفته است. ستون‌های CFDST مزایایی از قبیل عدم نیاز به قالب‌بندی برای بتن‌ریزی، حمل و مونتاژ سریع و حفاظت سطح بتن از آسیب دارند. در مطالعه حاضر رفتار این نوع جدید از ستون‌ها با استفاده از روش عناصر محدود بررسی شده است. برای اطمینان از درستی مدل‌سازی عناصر محدود، نتایج تحلیل‌های عددی ستون‌های (CFDST) با نتایج آزمایشگاهی موجود مقایسه شده و از درستی مدل‌سازی، اطمینان حاصل شده است. همچنین اثر عوامل مختلف مؤثر از جمله لاغری ستون، مشخصه‌های هندسی مقطع، مشخصه‌های مکانیکی - مقاومتی مصالح به کار رفته مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج تحقیق حاضر نشان می‌دهند که این ستون‌ها نسبت به ستون‌های CFT دارای شکل‌پذیری و ظرفیت تحمل بار بیشتری بوده و همچنین اثر تنش تسلیم جداره‌ها و مقاومت فشاری بتن بر رفتار این ستون‌ها قابل ملاحظه است و همچنین مشخص شد که نسبت به ستون‌های CFT سبک تر و اقتصادی‌تر هستند.

واژه‌های کلیدی: ستون دوجداره پر شده با بتن (CFDST)، بتن، عناصر محدود، CFT، شکل‌پذیری، مقاومت

مقدمه

آتش‌سوزی مطرح می‌شود و باید تمهیدات خاصی را برای آن پیش‌بینی کرد. همچنین اجرای اتصالات در این ستون‌ها مشکل بوده و رفتار اتصالات به طور دقیق مشخص نیست و تحقیقات کمی در مورد آن انجام گرفته و یا در حال انجام است [۲]. بسته به نحوه ترکیب دو ماده فولاد و بتن، ستون‌های مرکب به دو دسته تقسیم می‌شوند:

(۱) ستون‌های فولادی محبوس‌شده در بتن؛

(۲) ستون‌های فولادی پر شده با بتن (CFT).

ستون‌های CFDST نیز از خانواده ستون‌های CFT بوده که در این زمینه مطالعاتی توسط محققانی از جمله Wei, Elchalakani و همکارانش، Zhao, Yagishita و همکارانش انجام شده است. مطالعات انجام‌شده در این زمینه نشان می‌دهد که روند استفاده از این ستون‌ها (CFDST) در سازه‌های ساختمانی نیز در حال افزایش است. با توجه به نحوه ترکیب دو مقطع هندسی مربعی و دایره‌ای در جداره‌های داخلی و خارجی، چهار حالت مختلف به دست می‌آید. در شکل (۱) نمونه‌هایی از

رواج استفاده از ستون‌های مرکب^۲ به سال‌های خیلی دور بر می‌گردد. یکی از دلایل گسترش استفاده از ستون‌های مختلط بتن - فولاد در صنعت ساختمان‌سازی، حفاظت ساختمان‌های فولادی در مقابل آتش‌سوزی بوده است. از آنجا که مقاطع فولادی در حرارت شدید بسیار آسیب‌پذیر و در مواجهه با آتش به سرعت خواص مکانیکی - مقاومتی خود را از دست می‌دهند، به این منظور برای بهبود این خواص ستون‌های فولادی را داخل بتن قرار می‌دادند یا به نحوی با بتن ترکیب می‌کردند [۱]. از مزایای ستون‌های مختلط فولاد - بتن نسبت به ستون‌های صرف فولادی یا بتنی تنها می‌توان به ظرفیت تحمل بار محوری و خمشی عالی، مقاومت جذب انرژی و خاصیت شکل‌پذیری زیاد، بار بحرانی بزرگ‌تر در هنگام کم‌انرژی، استفاده از خود مقطع فولادی به عنوان قالب برای هسته بتنی، حفاظت سطح بتن از آسیب و حمل و نقل آسان‌تر اشاره کرد. در مقابل این مزایا، ستون‌های مختلط فولاد - بتن معایبی نیز دارند؛ از جمله به دلیل قرارگیری فولاد در سطح خارجی ستون، موضوع حفاظت در مقابل

مدل‌سازی عناصر محدود ستون‌های CFDST و صحت‌سنجی با نتایج آزمایشگاهی [۴]

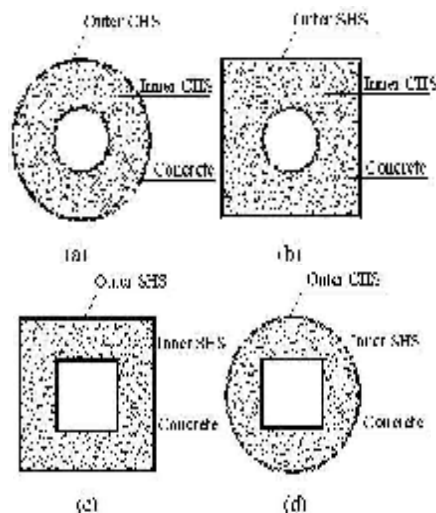
مطالعه رفتار سازه‌ها با روش‌های مختلفی از قبیل روش‌های تجربی و نظری امکان‌پذیر است. یکی از روش‌های مناسب که به دلیل سرعت و دقت بالا و هزینه کم، نسبت به سایر روش‌ها رواج بیشتری دارد، روش عناصر محدود است. ولی درستی مدل‌سازی عناصر محدود مورد استفاده باید در مقایسه با مدل‌های آزمایشگاهی و نیز مدل‌های نظری تأیید شود تا بتوان از آن در جهت بررسی سازه‌های مورد نظر بهره گرفت. برای بررسی رفتار خرابی ستون‌های CFDST، داشتن یک مدل ریاضی مناسب مورد نیاز است. با توجه به قابلیت‌هایی که روش عناصر محدود در حل مسائل سخت و پیچیده مهندسی دارد، از این روش و از نرم‌افزار ANSYS که مبتنی بر روش عناصر محدود است، استفاده شده است. در مدل‌سازی عناصر محدود ستون‌های دوجداره فولادی پرشده با بتن از عناصر زیر استفاده شده است:

- هسته بتنی به وسیله المان شش وجهی هشت گره‌ای SOLID 65 و با سه درجه آزادی انتقالی در هر گره تعریف می‌شود. مصالح از نوع بتن با قابلیت ترک‌خوردگی در سه امتداد متعامد در اثر کشش و شکست تحت اثر تنش‌های فشاری و نیز تغییر شکل‌های پلاستیک است.
- جداره فلزی توسط المان SOLID 45 تعریف شده است که همچون المان SOLID 65، با هشت گره و سه درجه آزادی در هر گره تعریف می‌شود و همخوانی مناسبی با سایر المان‌های به کار رفته در مدل‌کردن ستون‌های CFDST دارد.

- اصطکاک و لغزش بین فولاد و هسته بتنی توسط المان تماسی گره به گره 52 CONTACT مدل می‌شود. این المان قادر است فشار در جهت امتداد نرمال و برش را در جهت مماسی سطوح مورد نظر انتقال دهد.
- تطبیق مش‌بندی برای هر مدل تا جایی انجام گرفته است که در نتایج بهبود قابل توجهی به وجود نیاید؛
- رفتار غیرخطی هندسی در همه تحلیل‌ها در نظر گرفته شده است؛

- رفتار غیرخطی مصالح برای فولاد طبق نمودار تنش- کرنش خطی‌سازی‌شده شکل (۲) و برای بتن مطابق با

ستون‌های CFDST نشان داده شده است که جداره‌های داخلی و خارجی از نوع^۳ CHS یا^۴ SHS است [۳].



شکل ۱: انواع ستون‌های (CFDST) بر اساس شکل هندسی جداره‌های فولادی.

در قسمت (a) و (c) از شکل (۱) یک نمونه از ستون CFDST که هر دو جداره آن یا از نوع CHS یا از نوع SHS است نشان داده شده است. رفتار این نوع از ستون‌های CFDST توسط Zhao، و همکارانش مورد مطالعه قرار گرفته است [10]. در قسمت (b) از شکل (۱) یک ستون که مقطع در جداره خارجی SHS و در جداره داخلی از نوع CHS نشان داده شده است، که توسط Han و همکارانش مورد بررسی قرار گرفته است [10]. در مورد مقطعی با شکل هندسی CHS در جداره خارجی و SHS در جداره داخلی که در قسمت (d) از شکل (۱) نشان داده شده است توسط Elchalakani و همکارانش مورد بررسی و آزمایش قرار گرفته است [۳].

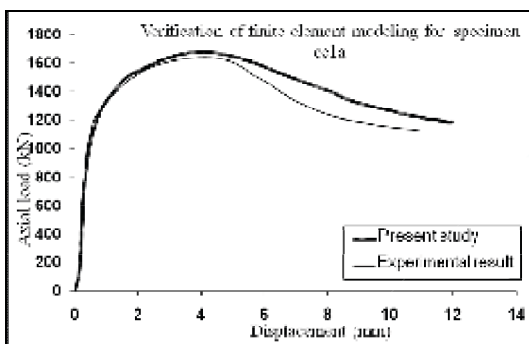
از آنجا که همه آزمایش‌های انجام‌شده روی ستون‌های CFDST محدود به نمونه‌ها با مشخصات هندسی با ابعاد کوچک بوده و به دلیل سختی کار، بررسی تجربی و آزمایشگاهی همه عوامل تأثیرگذار بر رفتار این ستون‌ها مقرون به صرفه نبوده است، بنابراین در این تحقیق، نمونه‌هایی با ابعاد واقعی و بزرگ‌مقیاس و تحت تأثیر عوامل مختلف از جمله مشخصات هندسی نظیر قطر و ضخامت جداره‌ها، مشخصه‌های مقاومتی نظیر تنش تسلیم جداره‌ها و مقاومت فشاری بتن پرکننده مورد بررسی قرار گرفته است.

و cc2a از سری آزمایش‌های انجام‌شده توسط Zhao و همکارانش انتخاب و مدل‌سازی عناصر محدود آنها انجام و مورد تحلیل قرار گرفت. مشخصات ابعاد و مصالح به کار رفته برای ساخت نمونه‌های cc1a و cc2a در جدول (۱) آورده شده است [۶].

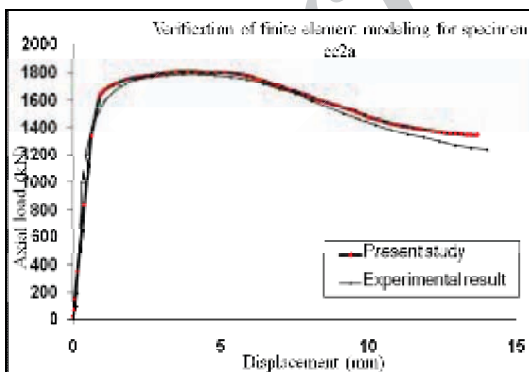
جدول ۱: مشخصات ابعاد و مصالح در نمونه‌های cc1a و cc2a

Specimen		Material		ρ	L	D	h	h ₀	h ₁	h ₂
P _u	T _u	F _{cu}	F _{yk}							
cc1a	2450	28	410	2.5	3000	100	300	250	100	100
cc2a	2450	28	410	2.5	3000	100	300	250	100	100

مقایسه بین نمودار بار- تغییر مکان محوری برای نمونه‌های آزمایشگاهی ذکر شده در جدول (۱) همراه با نتایج تحلیل‌های عددی برای نمونه cc1a در شکل (۴) و برای نمونه cc2a در شکل (۵) نشان داده شده است.



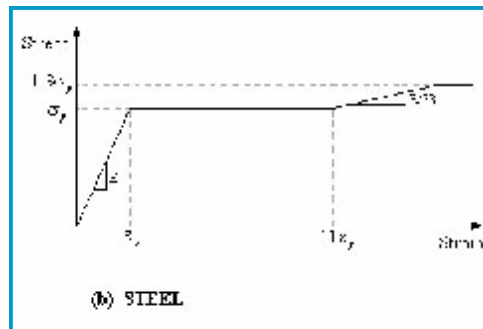
شکل ۴: مقایسه نتایج تحلیلی و نتایج آزمایشگاهی برای نمونه cc1a



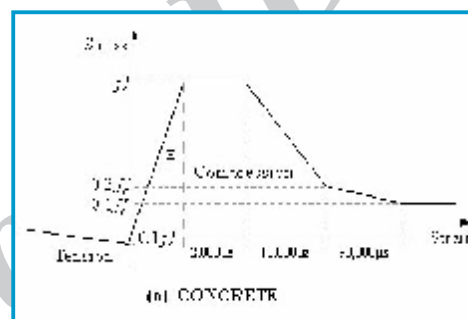
شکل ۵: مقایسه نتایج تحلیلی و نتایج آزمایشگاهی برای نمونه cc2a

نتایج نشان داده شده در شکل‌های (۴) و (۵) بیانگر دقت قابل قبول تحلیل‌های عددی است. در شکل (۶) کمناش موضعی جداره‌های داخلی و خارجی و شکل

نمودار تنش- کرنش خطی‌سازی‌شده شکل (۳) در نظر گرفته شده است.



شکل ۲: رفتار مصالح خطی‌سازی‌شده به کار رفته در مدل‌سازی جداره‌های فولادی [۵].



شکل ۳: رفتار مصالح خطی‌سازی‌شده به کار رفته در مدل‌سازی بتن پرکننده [۵].

معیار تسلیم Von-Mises به عنوان معیاری مناسب برای مصالح استفاده شده است و از آنجا که بارگذاری استاتیکی بوده، بنابراین از قانون سخت‌شوندگی ایزوتروپیک برای مدل‌سازی رفتار مصالح استفاده شده است.

همچنین برای بررسی رفتار پس از کمناش ستون‌های CFDST و عبور از نقطه بحرانی به طوری که بدون واگرایی در حل مسئله، کاهش در ظرفیت باربری را نشان دهد، از روش طول کمان^۵ برای حل معادلات غیرخطی استفاده شده است؛

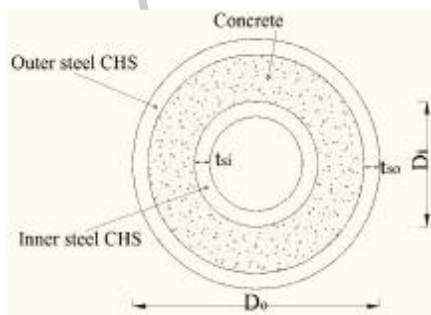
شرایط تکیه‌گاهی در دو انتهای نمونه‌ها گیردار است و برای جلوگیری از اتلاف زمان و به دلیل داشتن تقارن محوری در نمونه‌ها (تقارن هندسی و بارگذاری) نیمی از ستون در مقطع مدل‌سازی و تحلیل شد.

برای اطمینان از درستی مدل‌سازی عناصر محدود، ناگزیر از ارزیابی دقت نتایج تحلیلی نسبت به نتایج آزمایشگاهی هستیم. از این رو دو نمونه با نام‌های cc1a و

در شکل (۸) شکل کمانش کرده جداره داخلی از نمونه cc2a بعد از برداشتن لایه بتن پرکننده، نشان می‌دهد که از نوع دندانهای و به طرف داخل است. شکل‌های (۷) و (۸) نشان‌دهنده درستی کمانش‌های موضعی دوجداره فولادی در تحلیل با نرم‌افزار و دقت مناسب آن است. از دلایل ایجاد خطای به وجود آمده می‌توان به وجود ناکاملی‌های احتمالی در نمونه آزمایشی در آزمایشگاه و اعمال منحنی تنش-کرنش خطی‌سازی شده مصالح نام برد، ولی در کل خطای حاصل از مقایسه تحلیل با نرم‌افزار و نتایج آزمایشگاهی ناچیز است که از خصوصیات یک مسئله با تقریب‌سازی عددی است که بیانگر دقت خوب مدلسازی است. بنابراین از مدل ساخته شده می‌توان در مطالعات پارامتریک رفتار خرابی ستون‌های CFDST بهره جست.

بررسی نتایج تحلیل‌های عددی

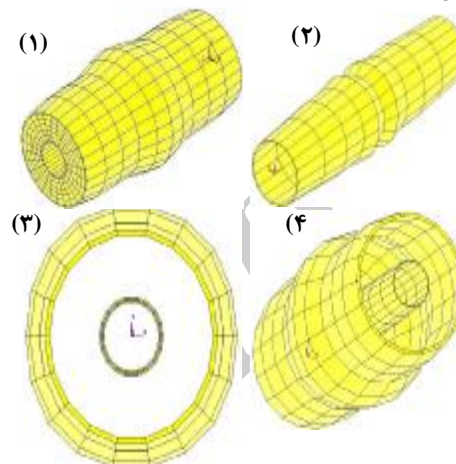
با توجه به آنچه در مورد نحوه مدل‌سازی عناصر محدود برای ستون‌های (CFDST) ذکر شد، در این قسمت، رفتار خرابی این ستون‌ها بر اساس عوامل تأثیرگذار و تحت بار محوری مورد بررسی قرار گرفته و سپس میزان باربری و شکل‌پذیری مقاطع مقایسه شده‌اند. با توجه به اینکه رفتار مقاطع CFDST، بستگی زیادی به مشخصات مکانیکی مصالح فولادی و بتنی، ابعاد مقطع و نحوه توزیع بار بین بتن و فولاد در شرایط انتهایی دارد، ارزیابی نتایج در محدوده مشخصات مقاطع انتخابی است. در این تحقیق، نمونه‌هایی با مقطع هندسی دایره‌ای در داخل و خارج مورد بررسی قرار گرفته است. در شکل (۹) مقطع و مشخصات هندسی که برای تعریف این مقطع به کار می‌رود نشان داده شده است [۶].



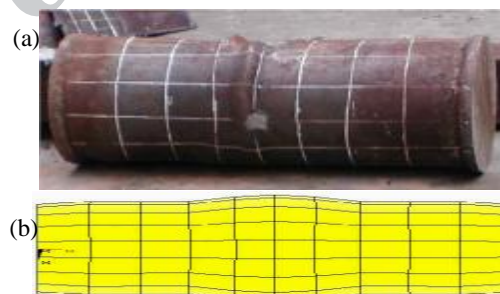
شکل ۹: مقطع و مشخصات هندسی نمونه با مقطع دایره‌ای در خارج و در داخل.

گسیختگی بتن پرکننده برای نمونه cc2a نشان داده شده است.

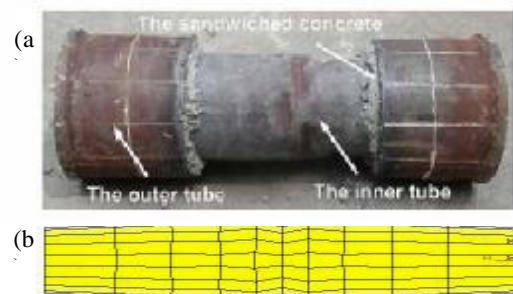
در شکل (۷) مقایسه‌ای بین شکل کمانش کرده جداره خارجی در دو حالت آزمایشگاهی و تحلیلی نشان داده شده است که نوع کمانش آن به صورت موضعی و برونسو است.



شکل ۶: (۱) کمانش نمونه cc2a، (۲) کمانش جداره داخلی، (۳) دید از بالای کمانش جداره‌ها، (۴) دید پرسپکتیو کمانش.



شکل ۷: مود کمانش موضعی نمونه cc2a
(a) نمونه آزمایشی له شدگی در پوسته خارجی (b) گسیختگی نمونه تحلیلی با نرم افزار.



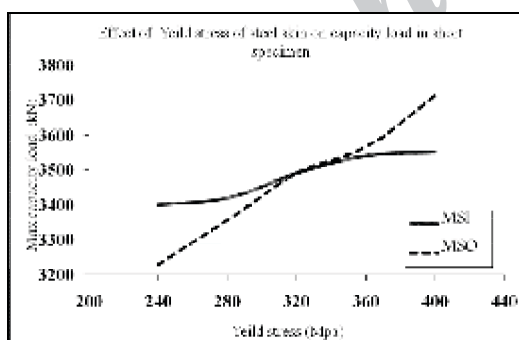
شکل ۸: شکل کمانش موضعی درونسو جداره فولادی داخلی در ستون CFDST
(a) نمونه آزمایشگاهی، (b) نمونه تحلیلی در نرم افزار.

شامل شود. مشخصات نمونه‌ها برای بررسی اثر تنش تسلیم جداره‌ها در جدول (۲) آورده شده است. لازم به ذکر است که نمونه‌های مشابهی با همان مشخصات هندسی با نام MSO نیز تعریف شده است که تنش تسلیم در جداره داخلی و خارجی بر عکس نمونه‌های MSI است، همچنین برای در نظر گرفتن هر دو حالت ستون کوتاه و بلند، دو نسبت L/D با مشخصات زیر در نظر گرفته شده است:

$$L/D = 3, 12 \Rightarrow L = 750, 3000 \text{ mm}$$

جدول ۲: مشخصات نمونه‌های MSI برای بررسی اثر تنش تسلیم در جداره‌های فولادی.

نام نمونه	مشخصات هندسی		مشخصات بتن			مشخصات فولاد	
	جداره خارجی	جداره داخلی	E_c (MPa)	F_{syo} (MPa)	F_{svi} (MPa)	E_s (MPa)	F_{svi} (MPa)
MSI 240	100*4 mm	250*4 mm	۳۵۴۰۰	۳۲۰	۲۲۰	۲۰۰۰۰۰	۲۴۰
MSI 280							۲۸۰
MSI 320							۳۲۰
MSI 360							۳۶۰
MSI 400							۴۰۰



شکل ۱۰: اثر تنش تسلیم جداره‌ها بر روی حداکثر ظرفیت باربری در نمونه‌های کوتاه (ارتفاع ۷۵۰ mm).

اثر تغییرات تنش تسلیم جداره‌ها بر ظرفیت باربری نمونه‌های کوتاه در شکل (۱۰) نشان داده شده است که انتظار می‌رود ظرفیت باربری با افزایش تنش تسلیم در جداره‌ها بالا می‌رود و در نمونه‌هایی که تنش تسلیم در جداره خارجی نسبت به داخلی بیشتر است، روند افزایش

در این تحقیق، از عاملی با نام نسبت سطح مقطع توخالی (χ) که توسط Ta_0 به صورت رابطه زیر تعریف شده نیز استفاده شده است:

$$\chi = \frac{D_i}{D_o - 2t_{so}} \quad (1)$$

که در رابطه (۱)، D_o ، D_i ، به ترتیب قطر بیرونی لوله داخلی و خارجی و t_{so} ضخامت جدار لوله فولادی خارجی هستند. در ابتدا برای همه نمونه‌ها یک تحلیل غیرخطی هندسی، مصالح و بارگذاری افزایش‌یابنده به کمک روش Frontal برای حل معادلات استفاده شده است که یک روش حل با دقت مناسب است و نسبت به روش‌های حل تکراری این مزیت را دارد که نقاط حدی را مشخص می‌کند. بدین صورت که اگر قبل از رسیدن به مقدار ماکزیمم بار، در تراز باری یک یا چند ویژه مقادیر ماتریس سختی صفر و یا منفی شوند، در این صورت آن تراز بار، متناظر با نقاط دوشاخگی^۷ هستند که در این صورت باید با اعمال ناکاملی (مد کمانش اول در ستون) مسیر تعادل ثانویه را در سازه ایجاد کرد تا به بار حدی مورد نظر رسید. پس از بررسی‌های لازم مشخص شد، مطابق با مبحث ۱۱ از مقررات ملی ساختمان اعمال حداقل ناکاملی برابر $1/1000$ ارتفاع نمونه‌های بلند برای رسیدن به بار حدی لازم است، بنابراین در گام اول، ستون ناکامل شده و مدل هندسی به روز می‌شود و در گام دوم، سازه ناکامل شده تحت بارگذاری محوری تحلیل شده‌اند. همچنین با بررسی نتایج مشخص شد که اعمال ناکاملی به نمونه‌های کوتاه لازم نبوده، یعنی قبل از رسیدن به حداکثر ظرفیت باربری نمونه‌ها، هیچ یک از مقادیر ویژه در ماتریس سختی صفر یا منفی نشدند. بنابراین در عمل نقطه دوشاخگی وجود ندارد و نیازی به اعمال ناکاملی در سازه نیست. این موضوع به میزان زیادی در سرعت تحلیل‌ها و نیز حجم محاسبات تأثیرگذار است.

الف - اثر مشخصه‌های مقاومتی فولاد مصرفی

یکی از عوامل مهم در بررسی رفتار سازه‌های ستون‌های CFDST، اثر مشخصه‌های مقاومتی مصالح مصرفی نظیر تنش تسلیم در جداره‌های فولادی و مقاومت فشاری بتن پرکننده است. بدین منظور تنش تسلیم در جداره‌های فولادی را در محدوده $240 \leq f_y \leq 400 \text{ Mpa}$ انتخاب کرده‌ایم تا هم فولاد پر مقاومت و هم فولاد معمولی را

داخلی، شکل‌پذیری محوری نمونه‌ها با روندی نزولی کاهش می‌یابد. بنابراین اگر در نمونه‌ها تنش تسلیم در جداره خارجی بزرگ‌تر از جداره داخلی باشد، رفتار نمونه‌ها در تحمل بار و شکل‌پذیری محوری آنها بهتر است.

در شکل (۱۲) مشاهده می‌کنید که نمونه MSI 240 بعد از عبور از نقطه کمانش، هنوز قادر به تحمل بار بوده و باربری بیشتری را متحمل می‌شود، ولی نمونه MSO 240 بعد از عبور از بارکمانش با اندکی تحمل بار به یک باره ظرفیت تحمل بار را از دست داده و خراب می‌شود. برای درک بهتر عملکرد متقابل جداره‌ها و بتن پرکننده، نمونه MSI 240 مورد تحلیل رفتاری قرار داده شده و کانتورهای تنش مربوط به هر نقطه با شماره مشخص در نمودار بار محوری-تغییر مکان قائم مربوط به شکل (۱۲) در شکل‌های (۱۳) و (۱۴) ارائه شده است. نمونه MSI 240 دارای تنش تسلیم 240 MPa در جداره داخلی و 320 MPa در جداره خارجی است. همان‌طور که در شکل (۱۲) نشان داده شده است، در تراز بار ۱ تنش در جداره‌ها و بتن بر حسب توان باربری خود بالا می‌رود و تا تراز بار ۲ تنش در جداره‌ها و بتن به صورت خطی و الاستیک افزایش می‌یابد، که بیانگر شرایط قید و بند میان جداره‌ها و بتن پرکننده است. با توجه به شکل (۱۲) مشخص است که در تراز بار ۳ شیب ناحیه الاستیک کاهش می‌یابد و تنش در جداره‌ها به تنش تسلیم نزدیک می‌شود. با ادامه بارگذاری از ناحیه الاستیک خارج شده تا اینکه تا تراز بار ۴ ابتدا تنش در جداره خارجی و سپس در جداره داخلی به تسلیم می‌رسد، ولی به دلیل کوتاه بودن ستون تنش در جداره‌ها و بتن افزایش می‌یابد.

با افزایش بار در تراز بار ۵ تنش در بتن به حد نهایی رسیده و سبب ایجاد ترک‌هایی در بتن می‌شود که در این حین موجب کمانش موضعی در ستون و همچنین کاهش ظرفیت باربری تا تراز بار ۶ شده و تا تراز بار ۷ بدون تغییرات زیاد تنش در جداره‌ها باربری فقط توسط ناحیه بتن پرکننده انجام پذیرفته و تنش در بتن بالا می‌رود. از تراز بار ۷ تا تراز بار ۸ لهیدگی جداره‌ها کامل شده و به دلیل درگیری و قفل‌شدگی بین جداره‌ها و بتن پرکننده در نتیجه باعث ایجاد سخت‌شدگی و تحمل بار مجدد می‌شود که درصدی از بار تحملی از بتن به جداره‌ها انتقال می‌یابد و سبب بالارفتن شکل‌پذیری و ظرفیت باربری

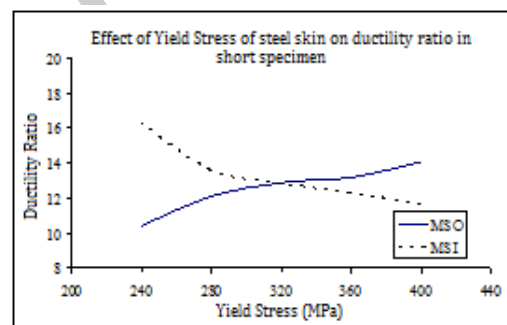
در ظرفیت باربری بیشتر است. از آنجا که شکل‌پذیری در مسائل رفتار لرزه‌ای اهمیت ویژه‌ای دارد، بنابراین اغلب در مورد قاب‌ها و نیروی جانبی مورد استفاده قرار گرفته است، اما می‌تواند برای سازه‌هایی که مؤلفه قائم زلزله اهمیت ویژه‌ای داشته باشد، بر اساس رفتار سازه در برابر مؤلفه‌های قائم نیز به کار رود. به همین ترتیب، این ضریب می‌تواند برای رفتار سازه‌ها و یا عناصر سازه‌ای در مورد نیروهای محوری کششی، محوری فشاری، لنگرهای خمشی و پیچشی نیز مورد استفاده قرار گیرد. بنابراین در مطالعه حاضر منظور از ضریب شکل‌پذیری، "ضریب شکل‌پذیری محوری فشاری" است که در این تحقیق طبق رابطه زیر تعریف شده است:

$$\mu = \frac{\Delta_u}{\Delta_y} \quad (2)$$

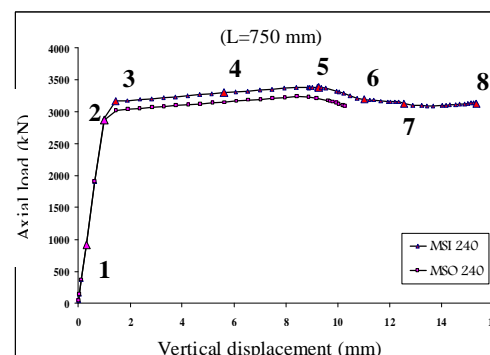
در این رابطه داریم:

Δ_u = تغییر شکل محوری نهایی نمونه

Δ_y = تغییر شکل محوری به ازاء بار ارتجاعی در نمونه

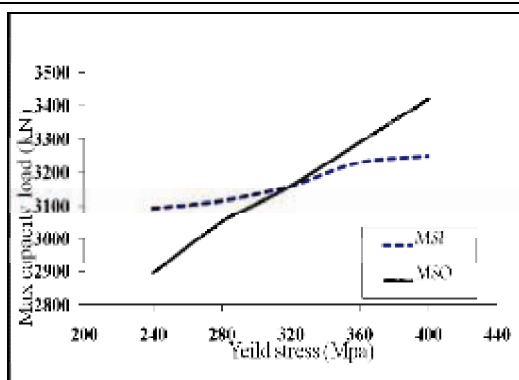


شکل ۱۱: اثر تنش تسلیم جداره‌ها بر مقدار شکل‌پذیری در نمونه‌های کوتاه (ارتفاع 750 mm).

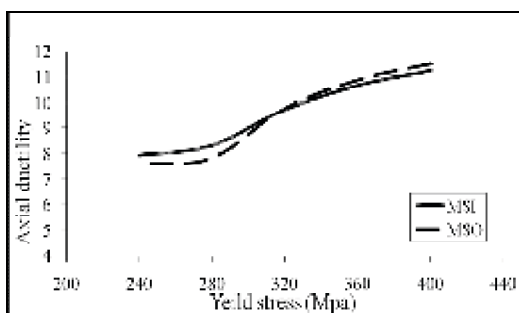


شکل ۱۲: تحلیل رفتاری اثر تنش تسلیم جداره‌ها بر روی نمودار بار-تغییر مکان محوری در نمونه MSI 240.

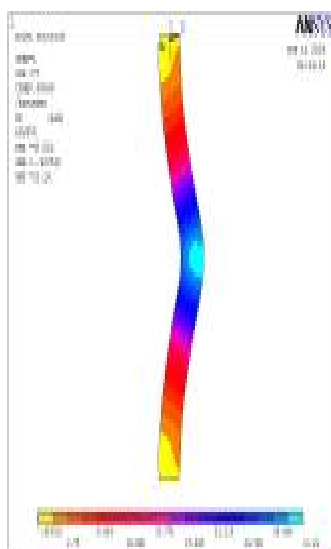
شکل (۱۱) نشان می‌دهد که با افزایش تنش تسلیم در جداره خارجی، شکل‌پذیری محوری نمونه‌ها افزایش می‌یابد؛ در حالی که با افزایش تنش تسلیم در جداره



شکل ۱۵: اثر تنش تسلیم جداره‌ها روی حداکثر ظرفیت باربری در نمونه‌های بلند (ارتفاع 3000 mm).



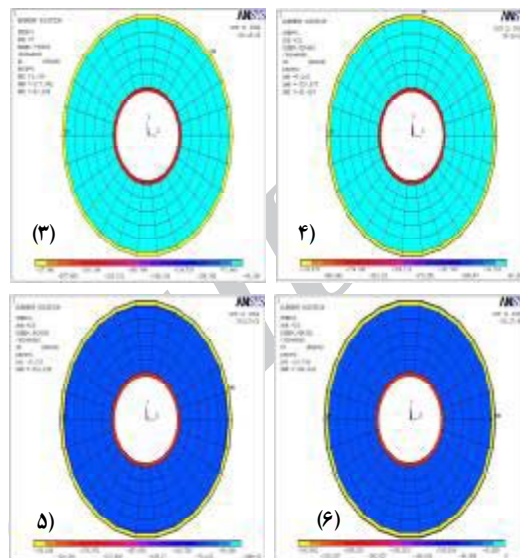
شکل ۱۶: اثر تنش تسلیم جداره‌ها بر مقدار شکل‌پذیری در نمونه‌های بلند (ارتفاع 3000 mm).



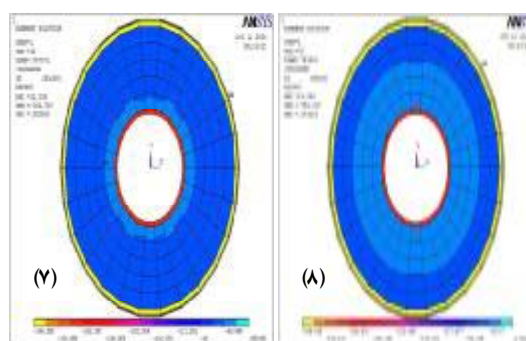
شکل ۱۷: کانتور تغییر شکل در راستای X برای نمونه MSO 400.

اثر تغییرات تنش تسلیم جداره‌ها بر شکل‌پذیری در نمونه‌های بلند در شکل (۱۶) نشان داده شده است. همان طور که انتظار می‌رود با افزایش تنش تسلیم در جداره‌های فولادی شکل‌پذیری نمونه‌های بلند به دلیل

می‌شود. در این تراز بار تنش بتن در نزدیکی جداره خارجی بیشتر از داخلی بوده و با نزدیک شدن به جداره داخلی از مقدار تنش کاسته می‌شود که در شکل (۱۴) نشان داده شده است؛ در نهایت در تراز بار ۸ ستون به طور کامل خراب شده، دیگر قادر به تحمل بار نبوده و ظرفیت باربری خود را از دست می‌دهد.



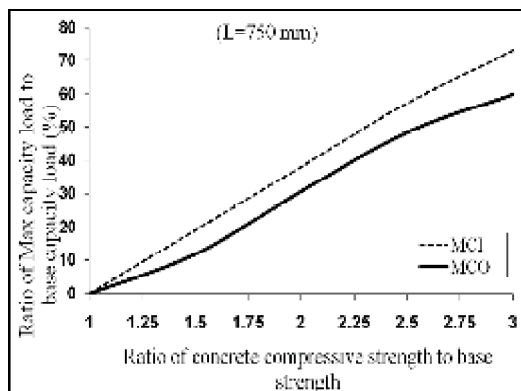
شکل ۱۳: کانتور تنش نمونه MSI 240 در ترازهای بار ۳ تا ۶.



شکل ۱۴: کانتور تنش نمونه MSI 240 در ترازهای بار ۷ و ۸.

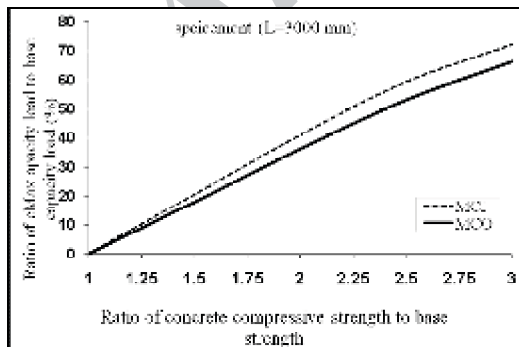
اثر تغییرات تنش تسلیم جداره‌ها روی ظرفیت باربری نمونه‌های بلند در شکل (۱۵) نشان داده شده است که همانند نمونه‌های کوتاه با افزایش تنش تسلیم در جداره‌ها ظرفیت باربری نمونه‌ها بالا می‌رود، به طوری که روند افزایش ظرفیت باربری در نمونه‌های MSO بیشتر از نمونه‌های MSI است.

در نظر گرفته و درصد افزایش ظرفیت باربری و شکل-پذیری دیگر نمونه‌ها نسبت به آن سنجیده شده است.



شکل ۱۸: اثر تغییرات مقاومت فشاری بتن بر ظرفیت باربری در نمونه‌های کوتاه.

در این تحقیق، منظور از نمونه پایه، نمونه‌ای است که بتن دارای مقاومت فشاری 20 MPa است که ظرفیت باربری و مقاومت فشاری بتن دیگر نمونه‌ها نسبت به آن سنجیده شده است. همان طور که انتظار می‌رود و در شکل‌های (۱۸) و (۱۹) نشان داده شده است، با افزایش مقاومت فشاری بتن ظرفیت باربری هر دو نوع نمونه بالا می‌رود، به طوری که با $1/5$ برابر کردن مقاومت فشاری بتن ظرفیت باربری در نمونه‌های بلند از نوع MCI سبب افزایش ۲۰ درصد و در نمونه‌های MCO سبب افزایش ۱۷ درصد نسبت به حالت اولیه می‌شود؛ در حالی که این افزایش در مقاومت فشاری بتن در نمونه‌های کوتاه از نوع MCO سبب افزایش ۱۰ درصد ظرفیت باربری و در نمونه‌های از نوع MCI سبب افزایش ۲۰ درصد ظرفیت باربری می‌شود.



شکل ۱۹: اثر تغییرات مقاومت فشاری بتن بر روی ظرفیت باربری در نمونه‌های بلند.

اثر مقاومت فشاری بتن بر شکل‌پذیری ستون‌های کوتاه در شکل (۲۰) و برای ستون‌های بلند در شکل (۲۱)

کمانش کلی ستون (بر خلاف نمونه‌های کوتاه از نوع MSI که بعد از تغییر شکل با کاهش مقاومت روبه‌رو می‌شویم) افزایش می‌یابد که از محاسن ستون‌های بلند در جذب انرژی با شکل‌پذیری بالا است. در شکل (۱۷) کانتور تغییر شده است، همان طور که مشخص است، کمانش از نوع کلی بوده که در جهت اولین مد کمانش نمونه خراب شده است.

ملاحظه می‌شود که بر خلاف ستون‌های معمولی که در آنها بعد از رسیدن به بار حداکثر، ظرفیت باربری به شدت کاهش پیدا می‌کند و تحمل تغییرشکل‌های بزرگ را در ترازهای بار نزدیک به بار حداکثر ندارند، ستون‌های CFDST بعد از رسیدن به بار حداکثر، کاهش بسیار کمی در ظرفیت باربری دارند و به خوبی تغییر شکل‌های بزرگ را در ترازهای بار نزدیک به بار حداکثر تحمل می‌کنند.

ب - اثر مشخصه‌های مقاومتی بتن پرکننده

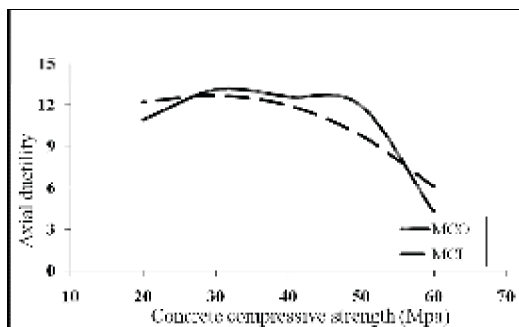
مشخصات نمونه‌ها برای بررسی اثر مقاومت فشاری بتن پرکننده در جدول (۳) آورده شده است. لازم به ذکر است که نمونه‌های مشابهی با همان مشخصات هندسی با نام MCO نیز تعریف شده است که تنش تسلیم در جداره داخلی و خارجی بر عکس نمونه های MCI است که محدوده مقاومت فشاری بتن هم بتن معمولی و هم بتن پر مقاومت را شامل شود، بنابراین محدوده ای بین $20 \leq f'_c \leq 60 \text{ MPa}$ در نظر گرفته شده است.

جدول ۳: مشخصات نمونه‌های MCI جهت بررسی اثر مقاومت فشاری بتن پرکننده.

نام نمونه	مشخصات هندسی		مشخصات بتن		مشخصات فولاد		
	جداره داخلی	جداره خارجی	E_c (MPa)	f'_c (Mpa)	E_s (MPa)	F_{sy} (MPa)	F_{syo} (MPa)
MCI 20	۲۰	۲۰	۲۲.۴۰۰	۲۰	۲۰۰۰۰۰	۲۴۰	۳۲۰
MCI 30			۲۷.۴۰۰	۳۰			
MCI 40			۳۱.۶۰۰	۴۰			
MCI 50			۳۵.۴۰۰	۵۰			
MCI 60			۳۸.۷۰۰	۶۰			

ظرفیت باربری و شکل‌پذیری نمونه‌ای با مقاومت فشاری 20 MPa را به عنوان مرجعی برای مقایسه بهتر

قرار گرفته است و مشخصات نمونه های مورد بررسی برای درک رفتار ستون ها تحت تأثیر تغییرات ضخامت در جداره خارجی و داخلی به ترتیب در جدول (۴) و (۵) آورده شده است.



شکل ۲۱: اثر تغییرات مقاومت فشاری بتن بر شکل پذیری در نمونه های بلند.

جدول ۴: مشخصات هندسی نمونه های با ضخامت مختلف در جداره خارجی.

تغییرات ضخامت در جداره خارجی					
نام نمونه		Thic-Out-4	Thic-Out-6	Thic-Out-8	Thic-Out-10
موقعیت جداره	قطر (mm)	t_1 (mm)	t_2 (mm)	t_3 (mm)	t_4 (mm)
OUT	300	4	6	8	10
IN	100	4			

در این تحلیل ها به منظور بررسی هر دو حالت ستون کوتاه و ستون بلند، دو ارتفاع برای ستون با نسبت های زیر در نظر گرفته شده است:

$$L/D = 3, 10 \Rightarrow L = 900, 3000 \text{ mm}$$

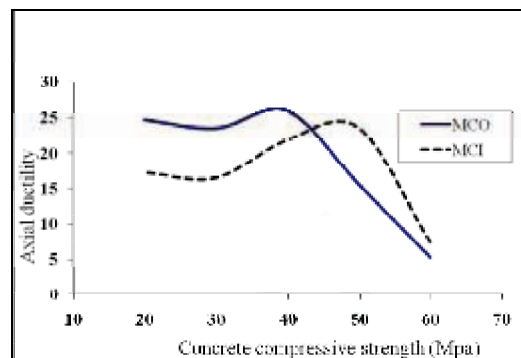
مشخصات هندسی نمونه های با ضخامت مختلف در جداره ها در جدول (۵) و (۶) آورده شده است.

جدول ۵: مشخصات هندسی نمونه های با ضخامت مختلف در جداره داخلی.

تغییرات ضخامت در جداره داخلی					
نام نمونه		ThicIn-2	ThicIn-5	ThicIn-8	ThicIn-11
موقعیت جداره	قطر (mm)	t_1 (mm)	t_2 (mm)	t_3 (mm)	t_4 (mm)
OUT	300	8			
IN	100	2	5	8	11

نمودار بار- تغییر مکان محوری به ازای تغییرات ضخامت در جداره های داخلی و خارجی در دو حالت ستون کوتاه و بلند مشابه بوده و برای نمونه های بلند در شکل های (۲۲) و (۲۳) نشان داده شده است.

نشان داده شده است. بنابراین افزایش مقاومت فشاری در نمونه های MCI ظرفیت باربری را نسبت به نمونه های MCO بیشتر افزایش داده که در نتیجه تأثیر بهتری بر نمونه های MCI دارد.

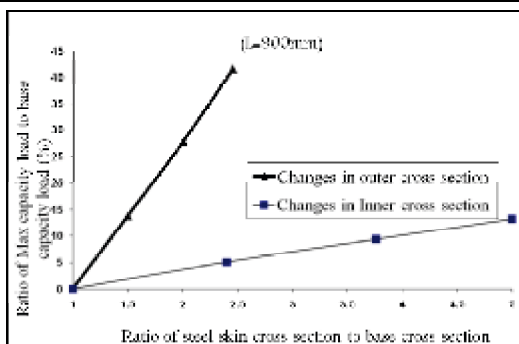


شکل ۲۰: اثر تغییرات مقاومت فشاری بتن بر شکل پذیری در نمونه های کوتاه.

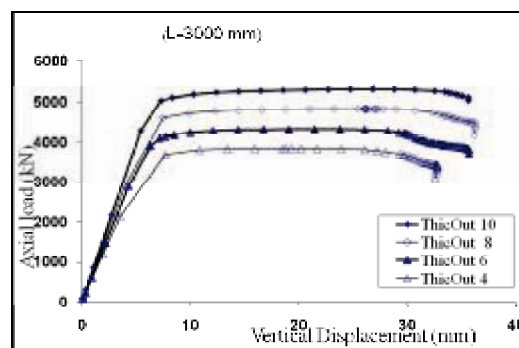
همان طور که در شکل (۲۰) نشان داده شده است، در هر دو نمونه MCO و MCI با افزایش مقاومت فشاری تا مقدار 30 Mpa برای بتن از شکل پذیری نمونه ها کاسته می شود و با افزایش مقاومت فشاری بتن تا 40 Mpa برای نمونه MCO و تا مقدار 50 Mpa برای نمونه MCI شکل پذیری نمونه ها افزایش می یابد و بار دیگر با افزایش مقاومت فشاری بتن از 50 Mpa و 40 Mpa شکل پذیری نمونه ها کاهش می یابد؛ به عبارتی به دلیل عملکرد و اندرکنش متقابل جداره های داخلی و خارجی و بتن پرکننده همواره بالا بردن مقاومت فشاری مطلوب نیست، بنابراین برای داشتن مقاومت فشاری بهینه ای برای بتن که هم جنبه اقتصادی را ارضا کند و هم شکل پذیری مطلوبی حاصل شود، باید مقاومت فشاری بتن را به 45-55 Mpa برای نمونه MCI و 35-45 Mpa برای نمونه MCO محدود کرد؛ به عبارتی افزایش مقاومت فشاری بتن در محدوده مشخصی سبب بالا رفتن شکل پذیری نمونه ها می شود و در خارج آن محدوده به دلیل خاصیت ترد و شکنندگی ناگهانی بتن، شکل پذیری نمونه ها کاهش می یابد.

پ - اثر تغییرات ضخامت در جداره های فولادی

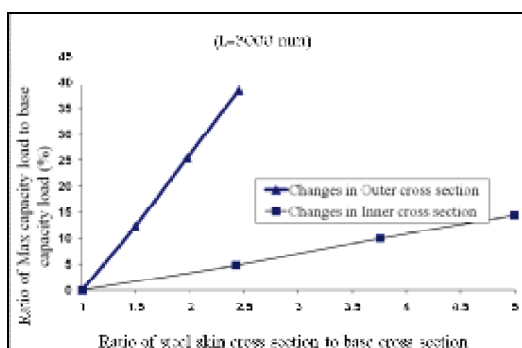
با توجه به اینکه تغییرات ضخامت، می تواند هم در جداره داخلی و هم در جداره خارجی روی رفتار این ستون ها تأثیر بگذارد، بنابراین هر دو حالت مورد بررسی



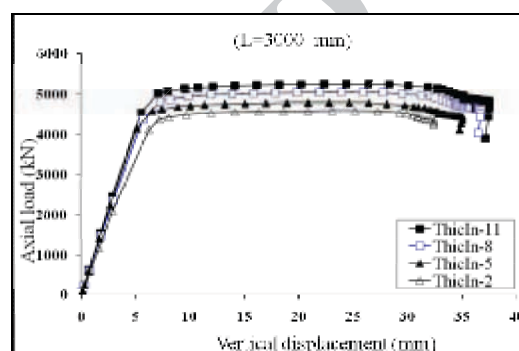
شکل ۲۴: میزان افزایش ظرفیت باربری ظرفیت باربری نمونه های کوتاه به ازای افزایش در سطح مقطع جداره‌ها.



شکل ۲۲: تأثیر تغییرات ضخامت در جداره خارجی مقطع با ارتفاع ۳۰۰۰ mm.



شکل ۲۵: میزان افزایش ظرفیت باربری نمونه‌های بلند به ازای افزایش در سطح مقطع جداره‌ها.



شکل ۲۳: تأثیر تغییرات ضخامت در جداره داخلی مقطع با ارتفاع ۳۰۰۰ mm.

ت) اثر تغییرات قطر در جداره‌های فلزی

در این تحقیق به لحاظ ملزومات معماری، برای بررسی مشخصات هندسی، قطر خارجی به ۳۵۰ میلی‌متر محدود شده است. همه معیارها برای بهره‌مندی از مقطع فشرده در نمونه‌ها لحاظ شده است. همچنین برای داشتن معیاری ثابت در انتخاب اعضاء، نسبت قطر به ضخامت در جداره‌ها مقدار ثابت و برابر ۲۵ در نظر گرفته شده است. مشخصات هندسی مقاطع با تغییرات قطر و ضخامت در جداره داخلی در جدول (۶) و تغییرات قطر و ضخامت در جداره خارجی در جدول (۷) آورده شده است.

جدول ۶: مشخصات هندسی نمونه‌های با قطرهای مختلف در جداره داخلی.

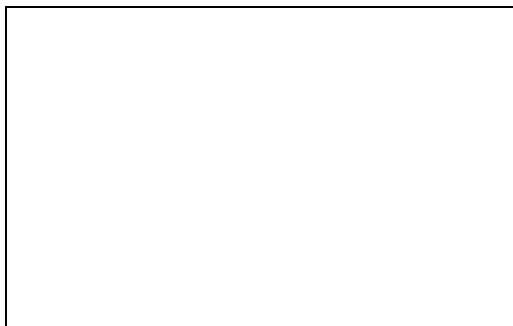
نوع مقطع	ThicIn (mm)	ThicIn (mm)	ThicIn (mm)	ThicIn (mm)
مربع	350	350	350	350
دایره	350	350	350	350
خ	0.11	0.15	0.17	0.23

همان طور که انتظار می‌رود، با افزایش ضخامت فولاد در جداره داخلی ظرفیت باربری فقط به اندازه ازدیاد ظرفیت باربری سطح مقطع فولادی افزایش می‌یابد و تغییری در قسمت خالی و الاستیک نمونه‌ها مشاهده نمی‌شود، ولی افزایش ضخامت در جداره خارجی سبب می‌شود، هم ظرفیت باربری افزایش یابد و هم اینکه شیب قسمت خالی و الاستیک نمونه‌ها افزایش یابد. مقدار افزایش ظرفیت باربری به ازای افزایش در سطح مقطع جداره‌ها برای نمونه‌های کوتاه در شکل (۲۴) نشان داده شده است. نتایج شکل (۲۵) نشان می‌دهند، اگر سطح مقطع در جداره داخلی به اندازه حدود ۲/۵ برابر افزایش داده شود، ظرفیت باربری نمونه به اندازه ۵ درصد بالا می‌رود و این در حالی است که اگر سطح مقطع در جداره خارجی را به همان اندازه یعنی حدود ۲/۵ برابر افزایش دهیم، ظرفیت باربری نمونه به اندازه ۴۲ درصد نسبت به حالت قبلی افزایش می‌یابد، که دلیل آن بالا رفتن فشار محصورکنندگی است.

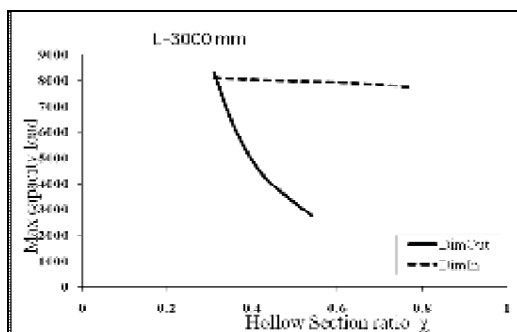
جدول ۷: مشخصات هندسی نمونه‌های با قطرهای مختلف در جداره خارجی.

مشخصات هندسی نمونه‌ها

نمونه	DimIn	DimOut	DimIn	DimOut
mm	mm	mm	mm	mm
۱	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
۲	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
۳	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
۴	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰



شکل ۲۷: تأثیر تغییرات قطر در جداره خارجی مقطع با ارتفاع ۳۰۰۰ mm.



شکل ۲۸: نمودار ظرفیت باربری بر حسب نسبت توخالی در مقطع.



شکل ۲۹: اثر نسبت توخالی مقطع به ازاء قطرهار مختلف بر روی شکل پذیری در نمونه های بلند.

شکل (۲۹) نشان می‌دهد با افزایش ضریب λ شکل‌پذیری نمونه‌ها تا محدوده مشخصی افزایش و در خارج از آن محدوده کاهش می‌یابد. همان طور که در شکل مشخص است در نمونه DimOut با افزایش ضریب λ تا مقدار ۰/۴۳ شکل‌پذیری افزایش و به ازای مقادیر بیشتر شکل‌پذیری کاهش می‌یابد، در نمونه DimIn با افزایش ضریب تا مقدار ۰/۶۲ شکل‌پذیری افزایش و به ازای مقادیر بیشتر شکل‌پذیری کاهش می‌یابد. بنابراین افزایش در قطر جداره‌ها به هر مقدار دلخواه به منظور بالا بردن شکل‌پذیری، مناسب نیست.



شکل ۲۶: تأثیر تغییرات قطر در جداره خارجی مقطع با ارتفاع ۳۰۰۰ mm.

شکل (۲۶) نشان می‌دهد با افزایش قطر داخلی نمونه‌ها با ثابت بودن قطر خارجی تغییری در ظرفیت باربری قابل تحمل به شکل آشکار مشاهده نمی‌شود، در حالی که شکل (۲۷) نشان می‌دهد، همان طور که انتظار می‌رود با افزایش قطر خارجی، هم ظرفیت باربری نمونه‌ها (کوتاه و بلند) و هم شیب اولیه ناحیه خطی افزایش می‌یابد که ناشی از بالا رفتن ظرفیت قابل تحمل بتن و فولاد اضافی است. در شکل (۲۸) نمودار ضریب توخالی بودن مقطع بر حسب ظرفیت باربری در دو حالت تغییرات قطر در جداره داخلی و جداره خارجی نشان داده شده است. طبق رابطه ارائه شده برای λ ، با افزایش قطر خارجی این ضریب کم شده و با افزایش قطر داخلی این نسبت افزایش می‌یابد. با افزایش ضریب λ در حالت تغییرات قطر در جداره خارجی با افت و کاهش سریع در ظرفیت باربری مقطع مواجه هستیم که دلیل آن افزایش قسمت خالی بتن در نتیجه کاهش باربری می‌شود، در حالی که افزایش ضریب توخالی مقطع در حالت تغییرات قطر در جداره داخلی تغییرات بسیار ناچیز و قابل چشم‌پوشی است، که دلیل این موضوع کاهش در سطح مقطع بتن و ظرفیت باربری ناشی از آن از یک طرف و از طرف دیگر افزایش قطر داخلی و ضخامت آن است که کاهش در ظرفیت باربری بتن را جبران می‌کند.

سهم باربری قسمت بتنی بیشتر از سهم باربری جداره فولادی است. در این تحقیق همچنین مقایسه‌ای میان ستون‌های CFT و ستون‌های CFDST از لحاظ رفتار سازه‌ای و صرفه اقتصادی و نیز مقایسه‌ای در مورد اثر مقاطع هندسی بر رفتار سازه‌ای این ستون‌ها انجام شده که فقط به ارائه نتیجه آن بسنده می‌کنیم.

نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر، اگر چه نتایجی که در زیر ارائه می‌شوند، محدود به حالات در نظر گرفته شده برای تحلیل‌ها است، اما احتمال می‌رود که این نتایج حوزه تأثیر و کاربرد جامع‌تری داشته باشند. نتایج حاصل از این تحقیق عبارتند از:

- برای ساخت ستون‌های مرکب از نوع CFDST، در صورت وجود دو نوع فولاد با تنش تسلیم متفاوت برای استفاده بهینه و عملکرد بهتر از لحاظ ظرفیت تحمل بار و شکل‌پذیری بهتر، باید فولاد با تنش تسلیم بیشتر در جداره خارجی و فولاد با تنش تسلیم کمتر در جداره داخلی قرار گیرد.

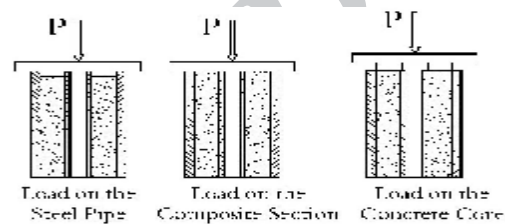
- در ستون‌های CFDST افزایش مقاومت فشاری بتن به هر اندازه برای بالا بردن ظرفیت باربری و شکل‌پذیری مناسب نیست و دلیل آن خاصیت ترد و شکنندگی ناگهانی بتن در مقاومت‌های بالا است که موجب کاهش شکل‌پذیری نمونه می‌شود.

- تأثیر تغییرات ضخامت در جداره‌های فولادی به گونه‌ای است که افزایش ضخامت در جداره خارجی باعث بالا رفتن ظرفیت باربری نمونه‌ها شده، ولی افزایش ضخامت در جداره داخلی فقط ظرفیت باربری را افزایش می‌دهد و بر شکل‌پذیری تأثیر چندانی ندارد.

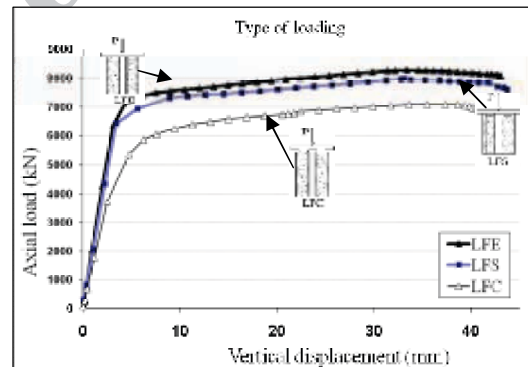
- تأثیر تغییرات قطر در جداره‌ها نیز مورد بررسی قرار گرفت، که نتایج نشان می‌دهد برای بالا بردن ظرفیت باربری با افزایش قطر به هر اندازه دلخواه مقرون به صرفه نیست، زیرا گرچه سبب بالا رفتن ظرفیت باربری می‌شود، ولی افزایش بیش از حد قطر در جداره سبب کاهش شکل‌پذیری نمونه‌ها می‌شود که برای درک بهتر مقایسه‌ای بر اساس ضریب λ انجام شده به عنوان نمونه به ازای مقدار بیشتر از $0/45$ در حالت تغییرات در قطر خارجی با ابعاد هندسی موجود در تحقیق حاضر شکل‌پذیری کاهش می‌یابد.

ث - بررسی رفتار ستون‌های CFDST بر اساس عملکرد متقابل جداره‌های فلزی و بتن پرکننده

مشخص است که اثر نحوه اعمال بار در ستون‌های مرکب از جمله ستون‌هایی که بتن با فولاد درگیر (CFDST) است، بسیار حائز اهمیت است. از این رو در مطالعه حاضر هر دو نوع ستون کوتاه و چاق مورد بررسی واقع شد که مقطع دارای مشخصات هندسی $350 \times 14 \text{ mm}$ در جداره خارجی و $100 \times 5 \text{ mm}$ در جداره داخلی است. تصویر شماتیک نحوه بارگذاری نمونه‌ها در شکل (۳۰) و تأثیر نحوه اعمال بار بر اجزاء در شکل (۳۱) نشان داده شده است.



شکل ۳۰: حالت‌های مختلف اعمال بار در ستون‌های CFDST



شکل ۳۱: تأثیر نحوه اعمال بار بر رفتار ستون CFDST با ارتفاع $L=3000 \text{ mm}$

از میان جداره‌های داخلی و خارجی، جداره خارجی به علت اثر محدودکنندگی که بر بتن اعمال می‌کند، بیشترین سهم باربری را دارد. نتایج نشان می‌دهد در ستون‌های CFDST در حالتی که بار بر کل مقطع (LFE) اعمال می‌شود، سهم باربری جداره‌های فولادی به طور تقریبی ۶۰ درصد و بتن پرکننده ۴۰ درصد است و این در حالی است که در ستون‌های CFT درست رفتاری بر عکس از خود نشان می‌دهند؛ بدین معنی که در ستون‌های CFT سهم باربری قسمت بتنی ۶۰ درصد و سهم باربری جداره فولادی ۴۰ درصد است، به عبارتی

از ستون‌های CFDST مقرون به صرفه بوده و نسبت به ستون‌های CFT کاهش وزنی در حدود ۱۰ درصد دارد. - با بررسی نتایج مشخص شد استفاده از مقطع هندسی مربعی در ساخت ستون‌های CFDST، سبب کاهش شکل‌پذیری و ظرفیت باربری نمونه‌ها می‌شود و بیشترین ظرفیت باربری و شکل‌پذیری مربوط به نمونه‌ای با مقطع هندسی دایره‌ای در جدار داخلی و خارجی.

- با توجه به اینکه در ستون‌های CFDST سهم بیشتر باربری متعلق به جدارهای فولادی بویژه جدار خارجی است (بر خلاف ستون‌های CFT که سهم بیشتر باربری متعلق به بتن است) بنابراین برای داشتن عملکرد مناسب به ترتیب اعمال بار بر کل مقطع و سپس جدارهای فولادی مطلوب‌تر است.

- مقایسه رفتار ستون‌های CFT با ستون‌های CFDST نشان داد که برای داشتن ظرفیت باربری یکسان، استفاده

مراجع

- 1 - Johansson M. and Gylltoft, K. (2001). "Structural behavior of slender circular steel concrete composite columns." *Application Steel and Composite Structures*, Vol. 1, No. 4, PP. 393-410 393.
- 2 - Zhang J. F. (2004). *Design of Composite columns*. Helsinki University of Technology Steel Structures Spring.
- 3 - Ellobody, E. and Young, B. (2006). "Design and behaviour of concrete-filled cold-formed stainless steel tube columns." *Engineering Structures*, Vol. 28, PP. 716-728 Received 24 April 2005.
- 4 - Canonsburg, P. A. (2002). *ANSYS Structural Analysis Guide, Release 7.0*, SAS. IP, Inc.
- 5 - Schneider, E. P. "Axially loaded concrete-filled steel tubes." *ASCE Journal of Structural Engineering*.
- 6 - Tao, Z. Lin-Hai Han, Xiao-Ling Zhao. (2003). *Behaviour of concrete-filled Double skin (CHS inner and CHS outer) steel tubular stub columns and beam-columns*. Received 27 August 2003: Accepted 18 November.

واژه‌های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

- 1 - Concrete Filled Double Skin Tubular
- 2 - Composite Column
- 3 - Circular Hollow Sections (CHS)
- 4 - Square Hollow Sections (SHS)
- 5 - Arc-Length Method
- 6 - Hollow Section ratio χ
- 7 - Bifurcation point