



بررسی ستون های دایره ای دو جداره فولادی پر شده با بتن تحت بار محوری فشاری

امیر مختاری، حمید صابری*، وسام کلمی زاده، وحید صابری

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه ایوان کی، سمنان، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۷/۰۹/۲۰

بازنگری: ۱۳۹۷/۱۱/۱۵

پذیرش: ۱۳۹۷/۱۱/۲۷

ارائه آنلاین: ۱۳۹۷/۱۲/۰۱

کلمات کلیدی:

ستون های دو جداره پر شده با بتن

بار محوری

ستون های دایره ای

روش اجزاء محدود

آباکوس

خلاصه: ستون های مرکب دو لایه نیز از خانواده ستون های مرکب CFST می باشد که از دو جداره فولادی دایره تشکیل شده و به صورت هم مرکز مونتاژ می گردد و بین این دو جداره با بتن پر می گردد. در این نوع از ستون ها اثر مهم بتن این است که کمانش موضعی جداره فولادی را به تأخیر می اندازد و خود بتن در حالت محصور شدگی قادر است کرنش ها و تنش های بالاتری را نسبت به حالت غیر محصور شدگی تحمل کند. از مزایای ستون های مرکب دو لایه نسبت به ستون های مرکب تک لایه می توان به وزن کمتر ستون های مرکب دولایه، شکل پذیری بیشتر و تحمل نیروهای محوری بیشتر اشاره کرد. رفتار این ستون ها تحت بار محوری خالص مورد توجه است لذا بررسی رفتار ستون های مرکب دو لایه تحت اثر بار محوری برای رفتار نزدیک به واقعیت این ستون ها از اهمیت ویژه ای برخوردار خواهد بود. در این مقاله ظرفیت ستون های دو جداره فولادی پر شده با بتن با استفاده از نرم افزار اجزاء محدود ABAQUS تحت اثر فشار محوری بررسی شده است. در این تحقیق با تغییر پارامتر های ضخامت لایه ها و قطر هسته داخلی و وجود و عدم وجود بتن درون هسته، مقاطع با یکدیگر مقایسه گردیدند. بررسی ها نشان دادند که ستون های دایره ای با افزایش قطر هسته به طور حتم ظرفیت باربری ها آن ها نیز افزایش نمی یابد و پارامتر موثر در این مسئله نسبت ضخامت به قطر می باشد. در بحث وجود و عدم وجود بتن در هسته، مسئله محصور شدگی نتیجه ی مهمی داشته و در نمونه هایی که بتن هسته موجود بوده ظرفیت مقاطع افزایش یافته است.

۱- مقدمه

گسترده، به ویژه در کاربری های لرزه ای استفاده می شود [۲]. در سال های اخیر مقالات زیادی در مورد تکنولوژی ستون های مرکب پر شده با بتن انتشار یافته است. نتایج نشان می دهد که در مورد ستون های مرکب پر شده با بتن دارای مقاومت بالا (HSC) تحقیقات آزمایشگاهی بیشتری احتیاج می باشد [۳].

از مزایای ستون های با مقطع مختلط فولاد - بتن، نسبت به ستون های صرف فولادی یا بتنی، می توان به ظرفیت تحمل بار محوری و خمشی بسیار بالا، مقاومت و جذب انرژی بالا، خاصیت شکل پذیری زیاد، بار بحرانی بزرگ تر در هنگام کمانش، استفاده از خود مقطع فولادی به عنوان قالب برای هسته بتنی، حفاظت سطح بتن از آسیب و حمل و نقل آسان تر اشاره نمود [۴]. یکی دیگر از

رواج استفاده از ستون های مرکب به سال های خیلی دور بر می گردد. بسته به نحوه ترکیب دو ماده فولاد و بتن، ستون های مرکب به چند دسته تقسیم می شوند [۱]. ابتدایی ترین مطالعاتی که بر روی ستون های مرکب انجام گرفته توسط بور در سال ۱۹۰۸ بوده، پس از آن افراد بسیاری در این زمینه مطالعات و آزمایش ها زیادی را انجام داده اند و به نتایج تئوری متفاوتی دست یافته اند. تقویت ستون ها با جداره فولادی با استفاده از ورق به طور تجربی اولین بار در سال ۱۹۹۰ انجام گرفت و آزمایش ها افزایش ظرفیت باربری و لرزه ای قابل توجهی را نشان داد بنابراین از این فناوری به طور

* نویسنده عهده دار مکاتبات: saberi.hamid@gmail.com



دولایه را حول محور ستون بلند تحت بار مرکزی انجام دادند. سال ۲۰۱۷ آیینز و همکاران [۸] ستون‌های مرکب دو لایه تحت بار غیر مرکزی با مقاطع دو لایه دارای مقاومت‌های مختلف در هسته و هسته بیرونی مورد آزمایش قرار دادند. سال ۲۰۱۶ کوچیرو [۹] مقاطع هم‌شکل با هسته مرکزی با ابعاد مختلف را چک نمود مقاطع مد نظر تیوب دایره ای بیرونی و مربعی درونی می باشد. سال ۲۰۱۶ آیینز و همکاران [۱۰] ستون‌های مرکب دو لایه تحت بار مرکزی با مقاطع دو لایه با مقاومت‌های مختلف در هسته و هسته بیرونی آزمایش نمود. حسنین، الچالاکانی و پاتل سال ۲۰۱۷ [۱۱] کمناش و رفتار ستون‌های مقاطع دو لایه مورد بررسی و آزمایش قرار دادند. وجه تمایز این مقاله نسبت به سایر مقالات در موضوع ستون‌های دو جداره پر شده با بتن، تغییر مساحت هسته مقاطع در کنار تو پر و تو خالی بودن بتن هسته است که اثر مساحت هسته در کنار اثر وجود و عدم وجود هسته مورد بررسی قرار گرفته شد.

۲- روند مطالعه و صحت سنجی با نتایج آزمایشگاهی

۱-۲ معرفی نمونه آزمایشگاهی

در این مطالعه، تأثیر تیوب داخلی و خارجی بر روی اندرکنش بتن با هر یک از این جداره‌ها در ستون‌های تحت بار محوری با استفاده از نرم افزار عناصر محدود ABAQUS بر روی نمونه‌های CFDST مورد بررسی قرار گرفته است. در این تحقیق، سه رویکرد افزایش ضخامت فولاد بیرونی، افزایش ضخامت فولاد داخلی و در نهایت تو پر و خالی نمودن نمونه‌ها جهت ارتباط بتن و تیوب فولادی داخلی مورد بررسی قرار گرفته است. لازم به توضیح است، دو رویکرد نخست از سوی برخی دیگر از محققین مورد بررسی قرار گرفته ولی برای این‌که بتوان مقایسه‌ای در مورد ارزش هرکدام از این راهکارها ارائه کرد، به وجود پاسخ هر سه رویکرد در کنار یکدیگر نیاز خواهد بود. در کنار این موارد تغییر قطر هسته نیز مورد بررسی قرار گرفته شد و همچنین، برای صحت سنجی نتایج، ستون‌های آزمایش شده توسط رومرو و همکاران، [۲۰۱۶] ۱۲ برای مدل‌سازی عناصر محدود انتخاب شده در شکل ۱ مشاهده می‌شود.

در این مقاله برای اطمینان از صحت مدل‌سازی و نتایج به‌دست آمده، صحت سنجی با کار انجام شده توسط ایشان صورت می‌گیرد و در پایان نمودار بار - تغییر مکان حاصل از تحلیل نرم افزاری با نمودار

مزایای ستون‌های با مقطع مختلط فولاد - بتن، تأخیر در کمناش موضعی فولاد است. ستون فولادی به دلیل تماس با بتن سخت شده، سختی بیشتری می‌یابد و کمناش در آن به تأخیر می‌افتد و یا اتفاق نمی‌افتد. این تأخیر تا هنگامی است که تماس فولاد و بتن کاهش یابد [۵]. به ازای یک بار مشخص، ستون‌های مرکب فولاد - بتن، سطح مقطع کوچک‌تر و نسبت مقاومت به وزن بیشتری در مقایسه با اعضای بتن مسلح مرسوم دارند [۶]. ستون‌های مرکب فولاد - بتن اگر جزئی از سیستم سازه‌های مختلط باشند، مزایای دیگری نیز می‌توان از هآن‌ها انتظار داشت. به عنوان مثال اگر اتصال مناسبی بین ستون و سیستم سقف (تیر و دال) برقرار باشد، این اتصال مقاومت بالاتر و رفتار بهتری از خود نشان می‌دهد که در نتیجه باعث افزایش طاقت و ایجاد قید اضافی خواهد شد. یکی از پیچیدگی‌های اجرایی در این ستون‌ها هماهنگی بین عوامل اجرایی بتن و فولاد و نحوه اتصال تیر به ستون است [۵].

اگر چه ستون‌های با مقطع مختلط فولاد - بتن در ساختمان‌ها و دیگر سازه‌ها به طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار گرفته‌اند و روند استفاده از آن‌ها رو به افزایش است، اما همچنان از لحاظ طراحی، به این ستون‌ها همانند ستون‌های بتن آرمه و فولادی نگریسته می‌شود و از سهم همکاری توأم فولاد و بتن چشم‌پوشی می‌شود. استفاده مؤثر و کارآمد از ستون‌های با مقطع مختلط فولاد - بتن، نیازمند به نگرشی متفاوت به ستون‌های بتنی و فولادی برای ورود به پروسه طراحی این ستون‌ها است. تعداد محدودی از آیین‌نامه‌های طراحی، با درجه اطمینان بالایی، مقرراتی را برای طراحی ستون‌های مرکب فولاد - بتن بیان نموده‌اند که در این میان می‌توان به آیین‌نامه‌های EuroCode 8 ، AISC (2016) و BS-2005-5400 اشاره کرد [۵]. متد طراحی و روابطی که در این مقاله مورد استفاده قرار گرفته، از آئین‌نامه EuroCode 8 است.

تحقیقات و آزمایش‌های گوناگونی در محور مقاطع مرکب در حال انجام می‌باشد. با توجه به عملکرد مناسب این نوع سازه، در سازه‌های بلند رویکرد محققین به این سیستم سازه‌ای تغییر یافته، با توجه به گسترش استفاده از ستون‌های مختلط دولایه و کمبود تحقیقات علمی پیرامون این موضوع، در این مقاله هدف بررسی عملکرد محوری این گونه ستون‌ها است.

سال ۲۰۱۶ سلطانا و جایاچندران [۷] تحقیقات ستون‌های

شکل ۲ و ۳ تحت نمودار تنش - کرنش تعریف شده است.

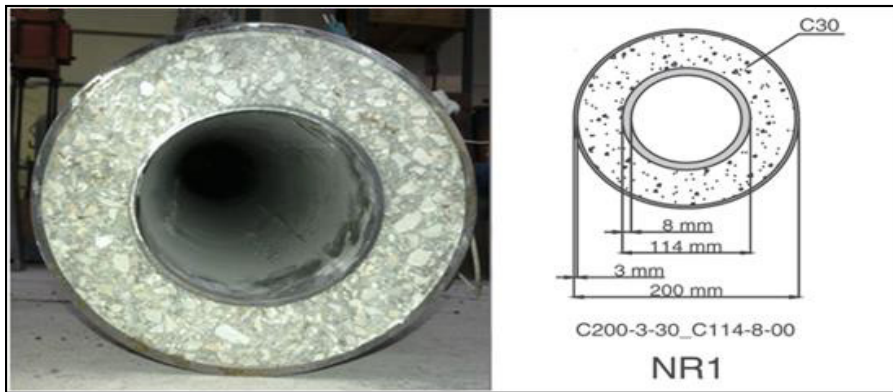
آزمایشگاهی مقاله مزبور مقایسه می گردد. ستون مزبور مربوط است به سازه ای با ارتفاع ۳/۳۱۵ متر که تحت نیروهای محوری آزمایش گردید و مشخصات آن در جدول آمده است.

۳-۲ صحت سنجی

از آنالیز مدل ساخته شده در ABAQUS، نتایج حاصل از تحلیل نمونه آزمایشگاهی و نرم افزاری در کنار هم و در قالب نمودار پوش بار - تغییر مکان، مورد بررسی قرار گرفتند. همان گونه که در شکل ۳ ملاحظه می شود، نتایج تحلیل استاتیکی غیرخطی با نتایج

۲-۲ معرفی مصالح نمونه آزمایشگاهی

برای صحت سنجی نمونه آزمایشگاهی مصالح بتن محصور شده با مقاومت فشاری (f'_c) ۳۰ مگاپاسکال و فولاد S355 به ترتیب در



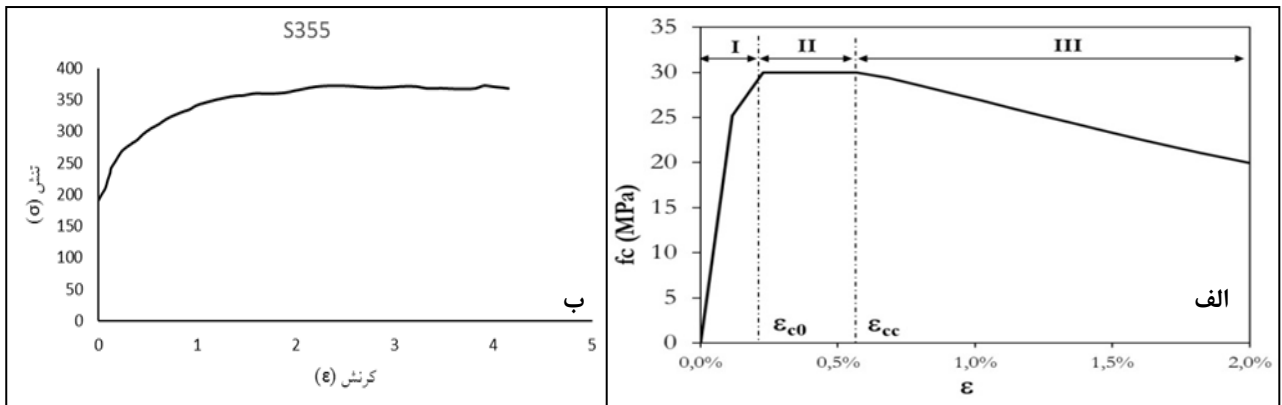
شکل ۱. نمونه آزمایشگاهی ستون CFDST دایره مقاله رومرو [۱۲]

Fig. 1. Experimental sample of the CFDST column of the romero article [12]

جدول ۱. مشخصات نمونه ستون مقاله رومرو [۱۲]

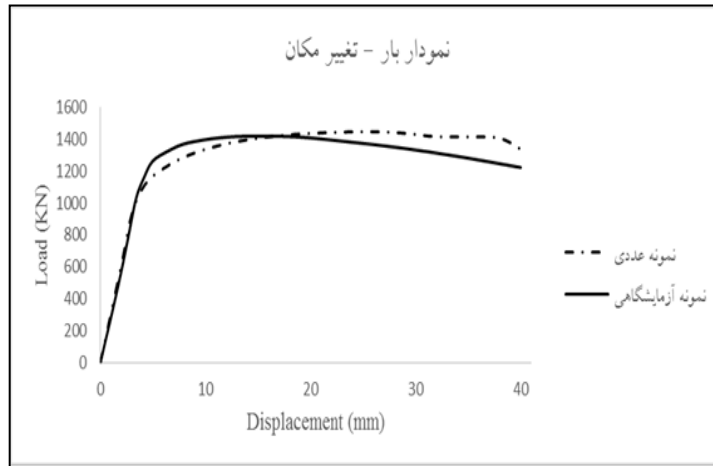
Table 1. sample Specifications of romero article column [12]

ID	Column Specimen	Tube Outer				Inner tube			
		D_{ext} (mm)	t_{ext} (mm)	$f'_{y,ext}$ (MPa)	$f'_{c,ext}$ (MPa)	D_{int} (mm)	t_{int} (MPa)	$f'_{y,int}$ (MPa)	$f'_{c,int}$ (MPa)
NR1	C200-3-30-C114-8-00	۲۰۰	۳	۳۰۰	۳۶	۱۱۴.۳	۸	۳۷۷	۰



شکل ۲. الف) نمودار تنش - کرنش بتن محصور شده ب) نمودار تنش - کرنش فولاد، ستون دایره CFDST مقاله رومرو [۱۲]

Fig. 2. a) Stress-Strain diagram of Concrete Confinement, b) Stress-Strain diagram of steel, CFDST circular column romero article [12]



شکل ۳. نمودار مقایسه مدل سازی عددی با نمونه آزمایشگاهی

Fig. 3. Comparison diagram of numerical Modeling with Experimental sample

جدول ۲. مقایسه عددی مدل آزمایشگاهی ستون رومرو [۱۲] و مدل عددی

Table 2. comparison of the experimental model of the romero column [12] and the numerical model

	Maximum		Peak	
	P _{Exp}	P _{FEM}	P _{Exp}	P _{FEM}
نمونه NRI	۱۴۱۹.۴۵	۱۴۴۵.۹۱	۱۲۵۸	۱۴۱۳
اختلاف	%۱.۸۵		%۵.۸۰	

شده است. برای مدل سازی فولاد با استفاده از مدل رامبرگ-اسگود^۱ به دست آمده توسط الجاکالانی و همکاران [۱۳] استفاده شده است. مدل رامبرگ-اسگود شامل ایجاد منحنی تنش-کرنش مهندسی است که پس از آن منحنی تنش-کرنش واقعی نشان داده شده در شکل ۵ تصحیح می شود. ضریب (n) رامبرگ-اسگود توسط معادله ۱ به دست آمده:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + 0.002 \left(\frac{\sigma}{F_b} \right)^n \quad (1)$$

در تجزیه و تحلیل المان محدود، مواد فلزی تا زمانی که به تنش تسلیم برسند، به عنوان مواد الاستیکی در نظر گرفته می شوند. پس از آن نقطه، به عنوان مواد پلاستیکی شبیه سازی می شوند. مدول الاستیسیته (E) برابر با ۲۰۳ GPa، توصیه شده توسط AISC 360-10 [۱۴] و نسبت پواسون (ν) برابر ۰/۳ در نظر گرفته شده است.

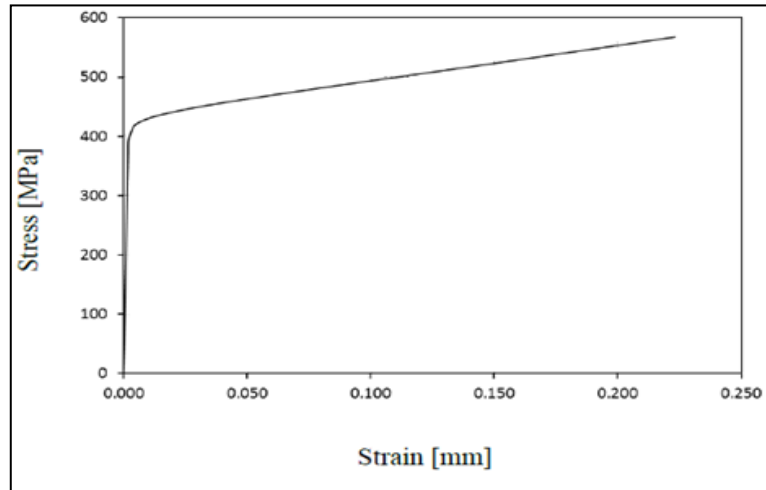
آزمایشگاهی مطابقت خوبی با هم دارند و مقاومت نهایی و شیب نمودارها با اختلاف ماکزیمم ۳ درصد با هم تفاوت داشتند و رفتار کلی این دو نمونه مشابه یکدیگر می باشند. اختلاف اندک ایجاد شده را هم می توان به عیوب اولیه مدل آزمایشگاهی و میزان دقت وسایل اندازه گیری، نسبت داد. همچنین، علت تفاوت در مقاومت نهایی هم به دلیل عدم لحاظ بارگذاری چرخه ای و پارگی احتمالی جوش و ورق و همچنین کماتش موضعی و اثر آن بر افت مقاومت در تحلیل می باشد. با این اوصاف می توان نتیجه گیری کرد، نمونه مدل شده از دقت مناسبی برخوردار بوده و مدل نرم افزاری را به عنوان یک مدل قابل اعتماد در نظر گرفت. لذا تمامی نمونه ها به همین صورت مدل شده و تحت بارگذاری قرار گرفتند.

۳- مدل سازی

۳-۱ مدل سازی فولاد

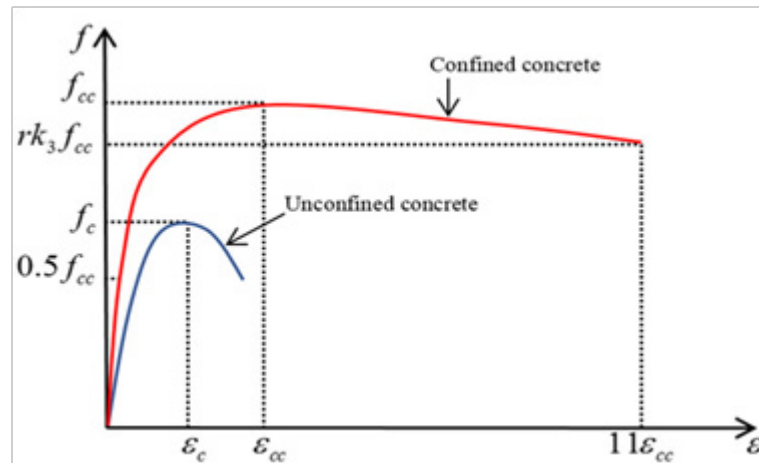
در ستون های مدل سازی شده از فولاد ST-37 استفاده

1 Ramberg-Osgood



شکل ۴. منحنی تنش- کرنش رامبرگ-اسگود [۱۴]

Fig. 4. Typical Ramberg-Osgood stress-strain curves



شکل ۵. منحنی بتن پیشنهاد شده پگولاتو و همکاران برای مقاطع دایره [۱۶]

Fig. 5. Stress-strain curves for concrete Pagoulatou, et al. [16]

۳-۲-۱ بتن خارجی

از بتن محصور شده برای فرآیند مدل سازی بتن خارجی نمونه ها استفاده گردید. مدل بتن مورد استفاده، مدل پگولاتو و همکاران می باشد [۱۷]، که بعدها به عنوان مدل پگولاتو مطرح شد. مدل بتن پیشنهاد شده توسط پگولاتو و همکاران [۱۷]، همان طور که در شکل ۴ نشان داده شده است، شامل مجموعه ای از معادلات ۱۰-۲ می باشد:

$$f_{cc} = f_c + k_1 f_1 \quad (2)$$

۳-۲ مدل سازی بتن

در نرم افزار ABAQUS از سه مدل رفتاری خسارت پلاستیک، مدل گسترش ترک و مدل ترک محو برای مدل سازی بتن استفاده می گردد. در این تحقیق از مدل رفتاری خسارت پلاستیک (CDP) برای مدل سازی بتن استفاده شده است. این مدل رفتاری مبتنی بر رفتار سخت شوندگی و نرم شوندگی مصالح شبه تردی مانند بتن است [۱۵]. به دلیل اندرکنش بین بتن و فولاد در ستون های دایره ای پر شده با بتن، یک حالت تنش سه محوری در بتن هسته ایجاد می شود که به محصورشدگی بتن وابسته است [۱۶].

$$R_E = \frac{E_c \varepsilon_c}{f_c} \quad (10)$$

$$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_c \left(1 + k_2 \frac{f_1}{f_c}\right) \quad (3)$$

۳-۲-۲- بتن داخلی مقطع دایره

مدل محصورشدگی بتن مورد استفاده، مدل حسنین و همکاران می باشد [۱۸]، که بعدها به عنوان مدل حسنین مطرح شد. از سال ۲۰۱۳ که این مدل ارائه گردید تا کنون حسنین و محققین زیادی از این روش محصور شدگی برای مدل های بتن مقاطع تحقیقاتی خود نیز استفاده کردند [۱۹]، همان طور که در شکل ۷ نشان داده شده است، شامل مجموعه ای از معادلات ۱۱-۱۸ می باشد:

$$\gamma_c = 1.8 D_c^{-0.135} \quad (0.8 \leq \gamma_c \leq 1.0) \quad D_c = D - 2t \quad (11)$$

$$f'_{rp} = \begin{cases} 0.7(v_e - v_s) \frac{2t}{D-2t} f_{sy} & \frac{D}{t} \leq 47 \\ \left(0.006241 - 0.0000357 \frac{D}{t}\right) f_{sy} & 47 < \frac{D}{t} \leq 150 \end{cases} \quad (12)$$

$$v_e = 0.881 \times 10^{-6} \left(\frac{D}{t}\right)^3 - 2.58 \times 10^{-4} \left(\frac{D}{t}\right)^2 + 1.953 \times 10^{-2} \left(\frac{D}{t}\right) + 0.4011 \quad (13)$$

$$v_e = 0.3212 + 0.358v'_e - 0.1524 \left(\frac{f'_c}{f_y}\right) + 4.843v'_e \left(\frac{f'_c}{f_y}\right) - 9.196 \left(\frac{f'_c}{f_y}\right)^2 \quad (14)$$

$$f_{cc} = \gamma_c f_c + K_1 f_{rp} \quad K_1 = 4.1 \quad (15)$$

$$f_1 = 8.525 + 0.166 \left(\frac{B_0}{t_0}\right) - 0.00897 \left(\frac{B_i}{t_i}\right) + 0.00125 \left(\frac{B_0}{t_0}\right)^2 + 0.00246 \left(\frac{B_0}{t_0}\right) \left(\frac{B_i}{t_i}\right) - 0.0055 \left(\frac{B_i}{t_i}\right)^2 \geq 0 \quad (4)$$

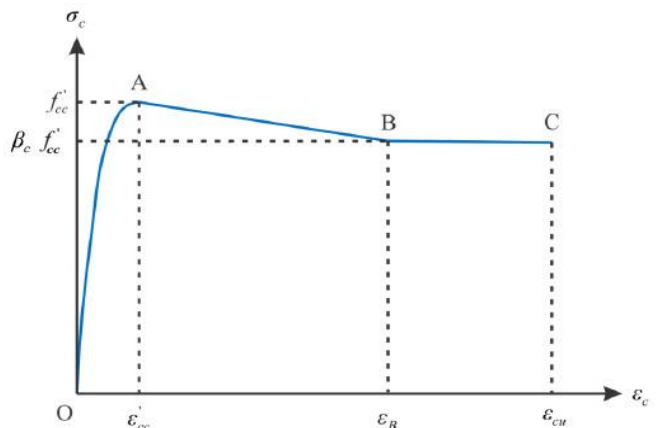
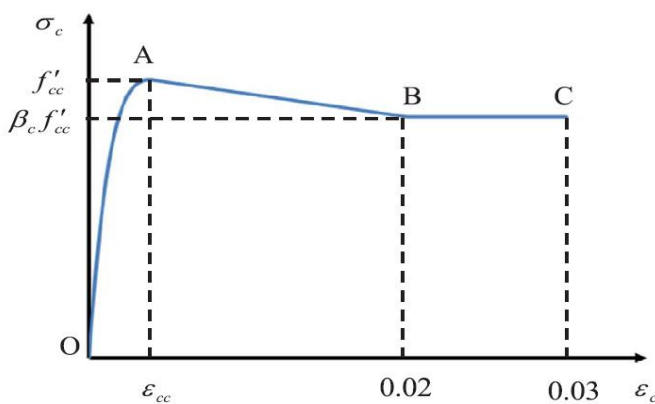
$$\frac{f_1}{f_{yi}} = 0.01844 - 0.00055 \left(\frac{B_0}{t_0}\right) - 0.0004 \left(\frac{B_i}{t_i}\right) + 0.00001 \left(\frac{B_0}{t_0}\right)^2 + 0.00001 \left(\frac{B_0}{t_0}\right) \left(\frac{B_i}{t_i}\right) - 0.00002 \left(\frac{B_i}{t_i}\right)^2 \quad (5)$$

$$\frac{f_1}{f_{yo}} = 0.01791 - 0.00036 \left(\frac{B_0}{t_0}\right) - 0.00013 \left(\frac{B_i}{t_i}\right) + 0.00001 \left(\frac{B_0}{t_0}\right)^2 + 0.00001 \left(\frac{B_0}{t_0}\right) \left(\frac{B_i}{t_i}\right) - 0.00002 \left(\frac{B_i}{t_i}\right)^2 \quad (6)$$

$$\sigma_{Concrete} = \frac{E_c \varepsilon}{1 + (R + R_e - 2) \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_c}\right) - (2R - 1) \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_c}\right)^2 + R \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_c}\right)^3} \quad (7)$$

$$E_c = 4700 \sqrt{f'_c} \quad (8)$$

$$R = \frac{R_E (R_\sigma - 1)}{(R_\varepsilon - 1)^2} - \frac{1}{R_\varepsilon} \quad (9)$$



شکل ۷. منحنی بتن پیشنهاد شده حسنین و همکاران برای مقاطع دایره [۱۸]
Fig. 7. concrete Stress-strain curves for circular cross-section [18]

اصلی تعیین می شوند؛ به جز در مواردی که برای المان محوره‌های محلی تعریف شده باشد [۲۴]. در تحقیق حاضر برای تعیین مش بندی مناسب، حساسیت مش بندی مورد مطالعه قرار گرفت [۲۵] و ۲۶ و ۲۷]. حداکثر اندازه مش بندی برای ستون ها، ۲۰mm انتخاب گردید (شکل ۹).

۳-۴- مدل اندرکنش بین فولاد و بتن

اندرکنشی که در مدل ABAQUS استفاده می شود، اندرکنش سطح به سطح است. هر مدل نیاز به دو اندرکنش دارد. اولین تماس بین لوله بیرونی و بخش بتنی است که در آن قسمت داخلی لوله خارجی سطح اصلی بود و قسمت خارجی بتن سطح پیرو بود. با در نظر گرفتن تماس سخت، نفوذ سطح بتن به سطح فولاد در محل‌های مقید شده به حداقل می رسد و اجازه انتقال تنش کششی را در طول بخش اندرکنش نمی دهد. از سوی دیگر تماس بین فولاد و بتن صفحه به صفحه در نظر گرفته شده است. همان‌طور که در شکل ۱۰ نشان داده شده است. پارامترهای به کار رفته برای اعمال تماس بین فولاد و بتن به شرح زیر است.

۱- رفتار نرمال (تماس سخت): با در نظر گرفتن تماس سخت، نفوذ سطح بتن به سطح فولاد در محل‌های مقید شده به حداقل می‌رسد و اجازه‌ی انتقال تنش کششی را در طول بخش اندرکنش نمی دهد. از سوی دیگر تماس بین فولاد و بتن صفحه به صفحه در نظر گرفته شده است. ۲- رفتار تانژانت (پنالتی): در این بخش از مدل اصطکاکی کلمب استفاده شده است که تنش برشی بحرانی را از رابطه $\tau_{crit} = \mu P$ تعیین می کند که در این معادله ضریب اصطکاک و P فشار تماسی است. ضریب اصطکاک در نظر گرفته شده بین فولاد و بتن ۰/۳ می باشد [۲۸].

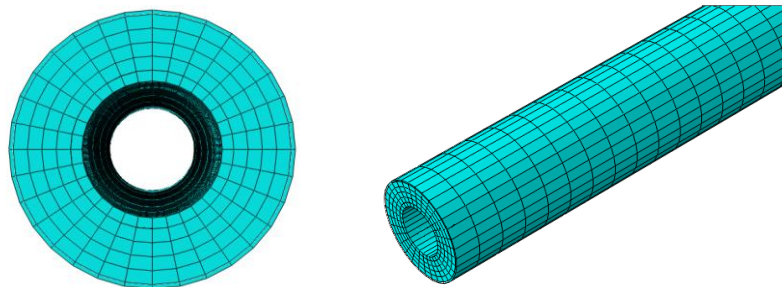
$$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_c \left(1 + K_2 \frac{f_{rp}}{\gamma_c f_c} \right) \quad K_2 = 5K_1 \quad (16)$$

$$\beta_c = \begin{cases} 1.0 & \frac{D}{t} \leq 40 \\ 0.0000339 \left(\frac{D}{t} \right)^2 - 0.0102285 \left(\frac{D}{t} \right) + 1.3491 & 40 < \frac{D}{t} \leq 150 \end{cases} \quad (17)$$

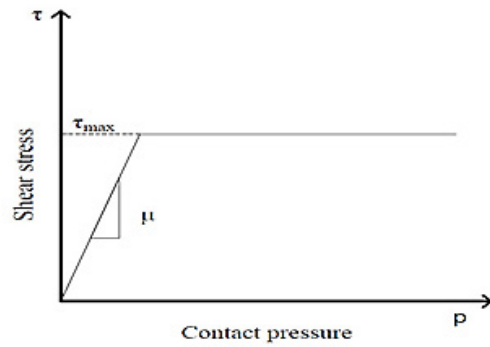
$$\varepsilon'_c = \begin{cases} 0.002 & \gamma_c f'_c \leq 28(\text{MPa}) \\ 0.002 + \frac{\gamma_c f'_c - 28}{54000} & 28 < \gamma_c f'_c \leq 82(\text{MPa}) \\ 0.003 & \gamma_c f'_c > 82(\text{MPa}) \end{cases} \quad (18)$$

۳-۳- نوع المان و مش بندی

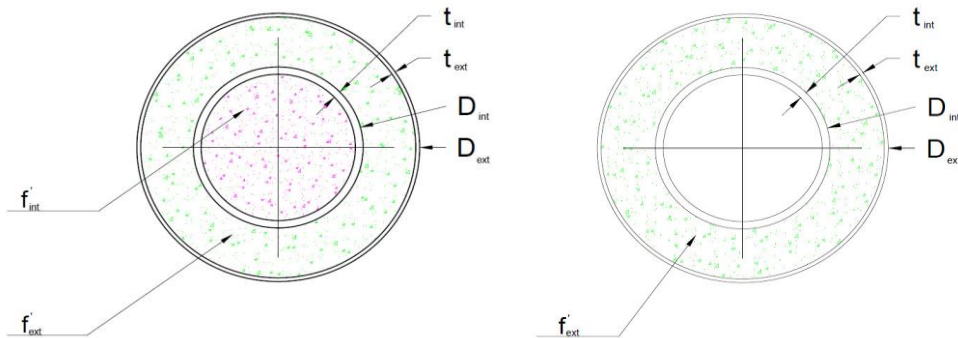
برای مدل‌سازی ستون‌های دوجداره فولادی پر شده با بتن، هسته بتنی و جداره فولادی در نرم افزار، از المان Continuum یا Solid شش‌وجهی هشت‌گره‌ای، دارای سه درجه آزادی انتقالی در هر گره با روش انتگرال گیری کامل خطی که در نرم افزار ABAQUS با 8DR3C نشان داده می شود، استفاده گردید [۲۰ و ۲۱ و ۲۲]. این المان در هر گره دارای سه درجه آزادی جابجایی در جهت محوره‌های X، Y و Z است. این المان برای آنالیزهای خطی، غیر خطی پیچیده، مسائل تماسی و پلاستیسیته ی همراه با تغییر شکل های بزرگ مناسب می باشد [۲۳]. در المان‌های سه‌بعدی Solid می توان خصوصیات مصالح را در چندین لایه با مقادیر متفاوت و در جهت های مختلف اعمال کرد. در این برنامه تمام المان های Solid اثرات کرنش محدود را در نظر می گیرند. مفهوم کرنش محدود آن است که ماده رفتار غیر الاستیک داشته باشد. در تمام موارد المان های Solid این توانایی را دارند که میزان تنش را به طور دقیق تعیین کنند. همچنین در این المان ها مولفه‌های تنش - کرنش بر حسب جهات محوره‌های



شکل ۹. مش بندی ستون های CFDST
Fig. 9. Meshing of CFDST column



شکل ۱۰. محدوده تنش برشی در سطح رویه (کوئن-۲۰۱۵) [۲۹]
Fig. 10. Shear stress range at the surface [29]



شکل ۱۱. نمای شماتیک سطح مقاطع ستون های CFDSST
Fig. 11. Details and dimensions of CFDSST specimen

جدول ۳. مشخصات نمونه ها

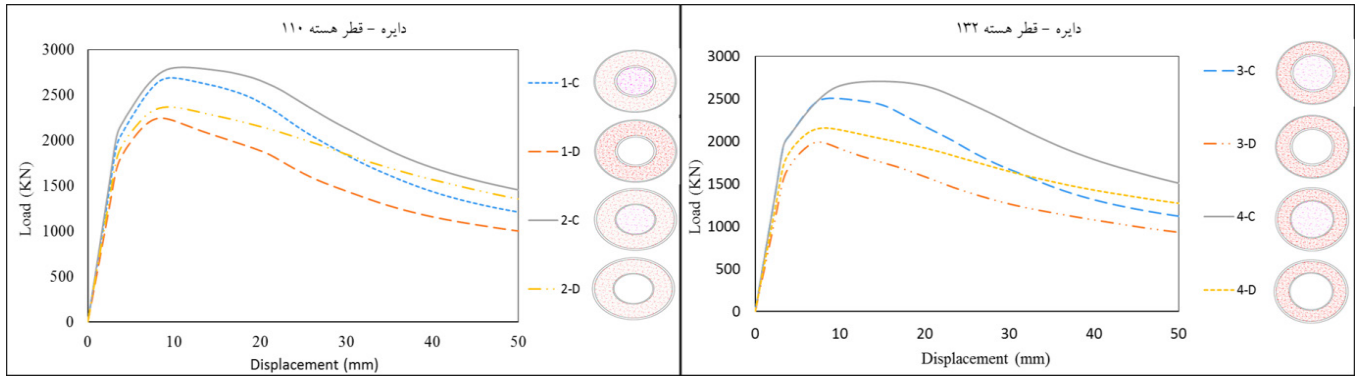
Table 3. Dimensions of specimens

ID	D_{ext} (mm)	t_{ext} (mm)	D_{int} (mm)	t_{int} (mm)	$f_{c,int}$ (MPa)	$f_{c,ext}$ (MPa)	L (mm)
1-C	۲۲۰	۳	۱۱۰	۶	۳۰	۳۰	۳۰۰۰
1-D	۲۲۰	۳	۱۱۰	۶	۰	۳۰	۳۰۰۰
2-C	۲۲۰	۶	۱۱۰	۳	۳۰	۳۰	۳۰۰۰
2-D	۲۲۰	۶	۱۱۰	۳	۰	۳۰	۳۰۰۰
3-C	۲۲۰	۳	۱۳۲	۶	۳۰	۳۰	۳۰۰۰
3-D	۲۲۰	۳	۱۳۲	۶	۰	۳۰	۳۰۰۰
4-C	۲۲۰	۶	۱۳۲	۳	۳۰	۳۰	۳۰۰۰
4-D	۲۲۰	۶	۱۳۲	۳	۰	۳۰	۳۰۰۰
3-C-1	۲۲۰	۳	۱۳۲	۵	۳۰	۳۰	۳۰۰۰
4-C-1	۲۲۰	۶	۱۳۲	۲.۵	۳۰	۳۰	۳۰۰۰

RP2، استفاده شده است. فشار ستون از طریق شرط مرزی دوم و با مقدار تنظیمی در U3 مقدار +۵۰ معرفی گردید. لازم به ذکر است که بارگذاری توصیفی فوق تضمین می کند که بار به طور یکنواخت روی سطح مقطع بالای ستون مرکب بارگذاری شده محوری توزیع شود.

۳-۵- شرایط مرزی

در مجموع دو شرط مرزی برای هر مدل ABAQUS استفاده شدند. اولین شرط، نقطه مرجع RP1 را در مبداء با استفاده از نوع جابجایی/چرخش تثبیت کرد. شرط مرزی دوم برای نقطه مرجع



شکل ۱۲. منحنی بار-جابجایی تیپ اول و تیپ دوم

Fig. 12. Load-axial curves for the first type and the second type

تحمل کردند. در نمونه های سری دوم، ستون های تو پر حدوداً ۲۰٪ ظرفیت باربری بیشتری را نسبت به ستون های تو خالی تحمل کردند، و همچنین ستون های تیپ ۲ شکل پذیری بهتری نسبت به ستون ها تیپ ۱ داشتند. جدول ۴ نتایج را به صورت عددی نشان می دهد.

در شکل ۱۳ با افزایش هسته با نسبت (D/t) ۳۶٫۶ در نمونه C-2 ظرفیت باربری ستون ها افزایش یافت این در حالی است که در نمونه C-1 با نسبت (D/t) ۷۳٫۳، باعث کاهش ظرفیت باربری گردید.

کمانش کلی ستون (بر خلاف نمونه های کوتاه که بعد از تغییر شکل با کاهش مقاومت روبه رو می شویم) افزایش می یابد که از محاسن ستون های بلند در جذب انرژی با شکل پذیری بالا است. در شکل ۱۸-۲۰ کانتور تغییر شکل در راستای Y برای نمونه های نشان داده از نوع کلی بوده که در جهت اولین مد کمانش نمونه خراب شده است در نمونه های C-1 و 1-D به دلیل کاهش محصورشدگی در هسته و کوچک بودن مساحت بتن داخلی و نسبت (D/t) کم مود کمانشی در خلاف جهت سایر مدل ها بوده است.

ملاحظه می شود که بر خلاف ستون های معمولی که در آن ها بعد از رسیدن به بار حداکثر، ظرفیت باربری به شدت کاهش پیدا می کند و تحمل تغییرشکل های بزرگتر در ترازهای بار نزدیک به بار حداکثر ندارند، ستون های بعد از رسیدن به بار حداکثر، کاهش بسیار کمی در ظرفیت باربری دارند و به خوبی تغییر شکل های بزرگ را در تراز های بار نزدیک به بار حداکثر تحمل می کنند. مقدار عددی ماکزیمم کمانش در نمودار های شکل ۲۱ ارائه شده است.

در مدل عددی، این روند بارگذاری در دو مرحله از هم تفکیک شد. در اولین مرحله، پیش تنیدگی مشخص تنها بر روی لوله های فولادی توخالی با شرایط اولیه اعمال شد هنگامی که عناصر بتنی غیر فعال

۴- بررسی رفتار ستون های مرکب دولایه

۴-۱- معرفی نمونه

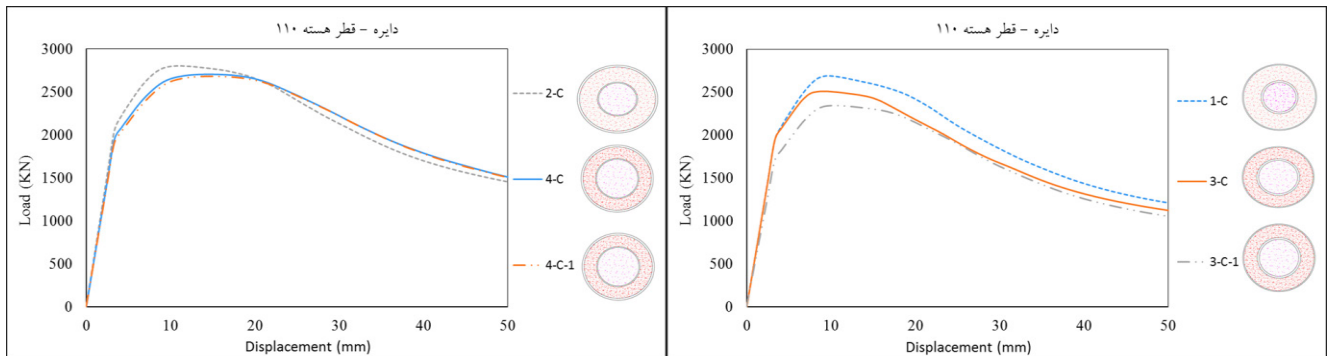
در مقاله ی حاضر، در مجموع ۱۰ نمونه ستون دوجداره فولادی پر شده با بتن CFDST با مقطع دایره ای (CHS-CHS) تحت بار محوری، توسط نرم افزار اجزای محدود مدل سازی شده است، تا ظرفیت ستون دایره ای و تاثیر مقاومت فشاری بتن و اثر عرض به ضخامت (D/t) در این ستون ها تحت نیروی محوری بررسی گردد. با تغییر ضخامت در تیوب خارجی و داخلی نیز هدف این بود که اثر و اهمیت ضخامت هر یک از تیوب ها تعیین گردد. همچنین نمونه ها را به سه سری تقسیم گردید، تا امکان این باشد که ستون های با جداره داخلی بزرگ تر را با ستون های جداره داخلی کوچک تر مقایسه گردد، همچنین دو نمونه مقاطع دارای هسته بزرگتر با مساحت برابر نسبت به مقاطع هسته بزرگتر مقایسه گردید تا به صورت خالص اثر هسته در مقاطع دارای هسته بزرگتر بررسی گردد. در شکل ۱۱ نمای شماتیک سطح مقطع ستون های طراحی شده، نشان داده شده است.

۴-۲- ظرفیت بار محوری

شکل ۱۲، منحنی بار-جابجایی ستون های مدل سازی شده را به نمایش می گذارد. در ایده آل ترین حالت ستون مرکب 2-C با جداره بیرونی ۶ mm و جداره داخلی ۳ mm با نیروی محوری kN ۲۸۰۴/۵۸ دارای بالاترین ظرفیت باربری نسبت به ستون های دیگر می باشد. با افزایش مساحت جداره داخلی به اندازه ی ۱۰٪، ظرفیت باربری در حدود ۲/۱۵٪ کاهش یافت. همچنین با توجه به شکل ۱۴، در نمونه های سری اول ستون های دایره ای تو پر به طور متوسط حدوداً ۱۰٪ ظرفیت باربری بیشتری را نسبت به ستون های تو خالی

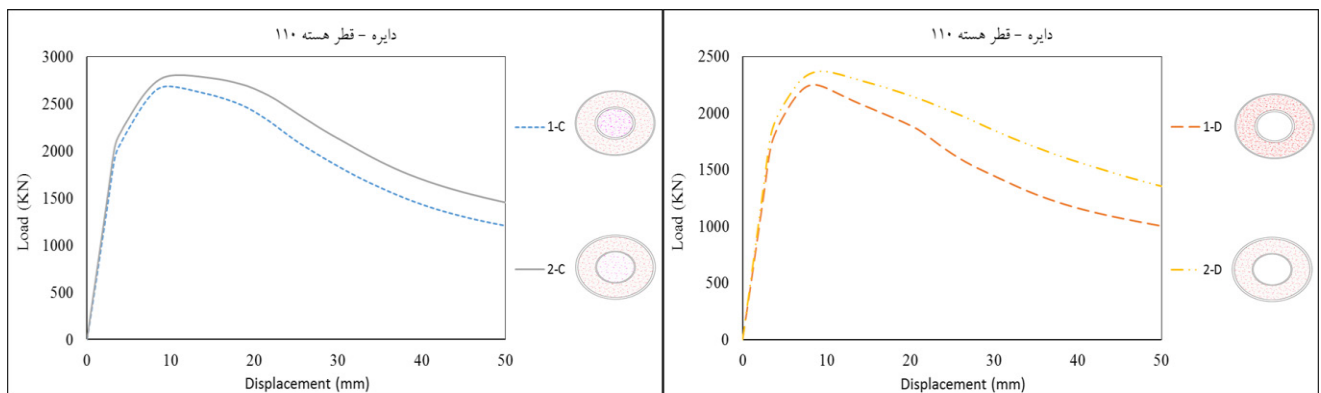
جدول ۴. مقایسه عددی نتایج
Table 4. Numerical comparison of results

Typ	ID	Dimension	$A_{ext}(cm^2)$	$A_{int}(cm^2)$	$\frac{D}{t}$	$P_{max}(kN)$	$\frac{P}{P_{max}}$	Ratio (%)
تیپ ۱	1-C	220×3-C30-110×6-C30	۲۰.۴۵	۱۹.۶۰	۷۳.۳۰	۲۶۸۶.۴۷	۰.۹۵۷	۲.۱۵۰
	1-D	220×3-C30-110×6	۲۰.۴۵	۱۹.۶۰	۷۳.۳۰	۲۲۴۷.۹۱	۰.۸۰۱	۱۱.۰۱۷
	2-C	220×6-C30-110×3-C30	۴۰.۳۳	۱۰.۰۸	۳۶.۶۰	۲۸۰۴.۵۸	۱	.
	2-D	220×6-C30-110×3	۴۰.۳۳	۱۰.۰۸	۳۶.۶۰	۲۳۶۶.۵۶	۰.۸۴۳	۸.۴۷۰
تیپ ۲	3-C	220×3-C30-132×6-C30	۲۰.۴۵	۲۳.۷۵	۷۳.۳۰	۲۵۰۹.۰۱	۰.۸۹۴	۵.۵۶۲
	3-D	220×3-C30-132×6	۲۰.۴۵	۲۳.۷۵	۷۳.۳۰	۱۹۸۸.۳۲	۰.۷۰۹	۱۷.۰۳۰
	4-C	220×6-C30-132×3-C30	۴۰.۳۳	۱۲.۱۵	۴۴.۰۰	۲۷۰۵.۴۵	۰.۹۶۴	۱.۸۰۰
	4-D	220×6-C30-132×3	۴۰.۳۳	۱۲.۱۵	۴۴.۰۰	۲۱۵۶.۷۱	۰.۷۶۸	۱۳.۰۵۸
تیپ ۳	3-C-1	220×6-C30-132×5-C30	۴۰.۳۳	۱۰.۰۸	۳۶.۶۰	۲۳۴۳.۲۸	۰.۸۳۵	۸.۹۶۱
	4-C-1	220×6-C30-132×2.5-C30	۴۰.۳۳	۱۰.۰۸	۳۶.۶۰	۲۶۸۱.۲۶	۰.۹۵۳	۲.۲۴۸



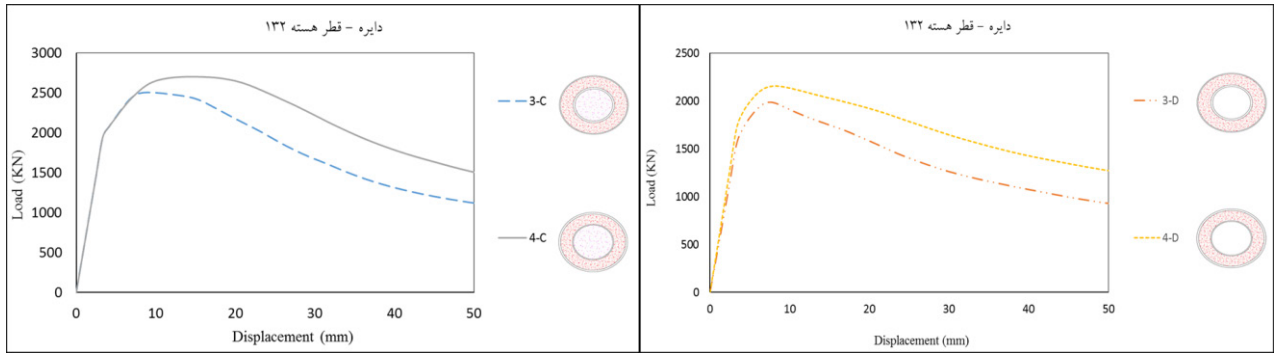
شکل ۱۳. نمودار بار-جابجایی (اثر افزایش مقدار هسته)

Fig. 13. Load-axial curves (the effect of increasing the core value)



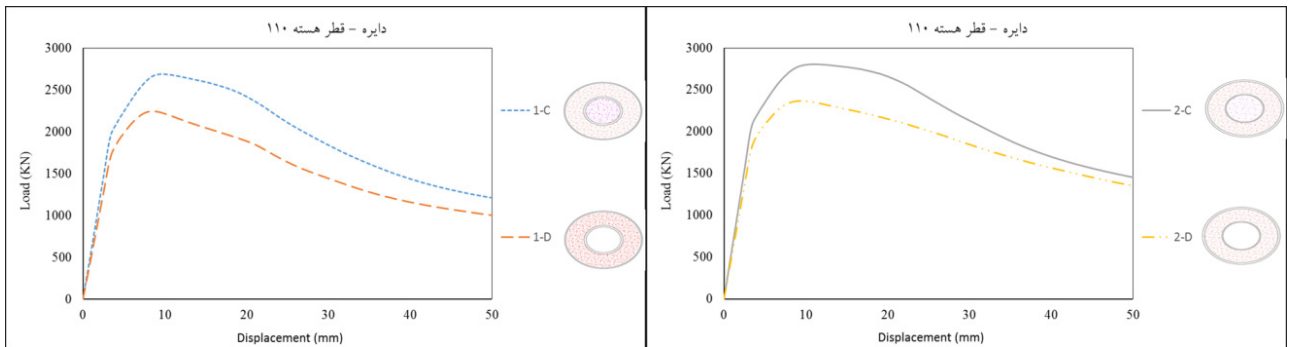
شکل ۱۴. منحنی بار-جابجایی (اثر ضخامت مقاطع تیپ ۱ نمونه های توپر و توخالی)

Fig. 14. Load-axial curves (effect of thickness of type 1 sections on filled and hollow specimens)



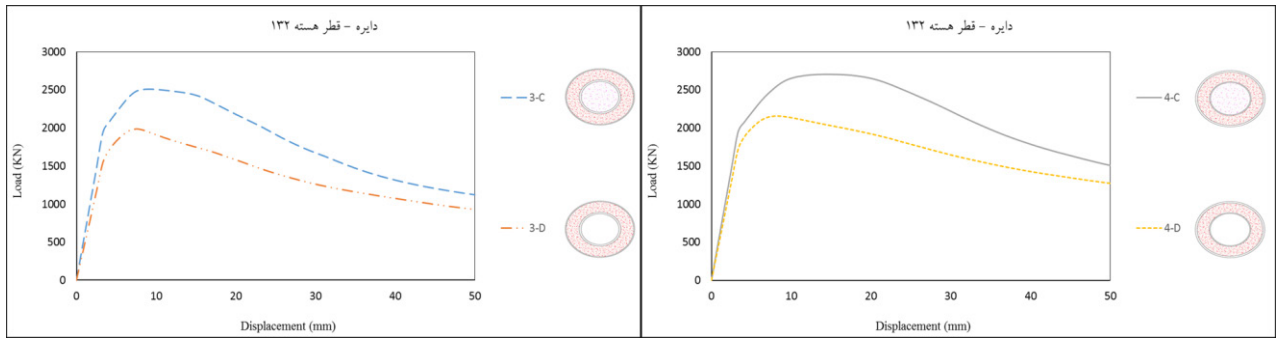
شکل ۱۵. منحنی بار-جابجایی (اثر ضخامت مقاطع تیپ ۲ نمونه های توپر و توخالی)

Fig. 15. Load-axial curves (effect of thickness of type 2 sections on filled and hollow specimens)



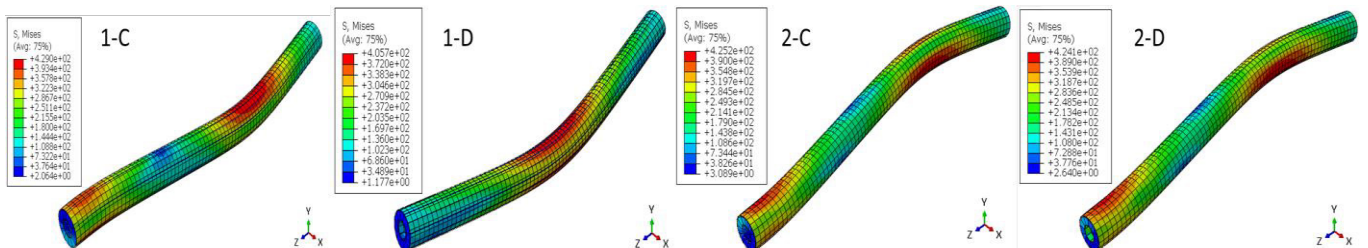
شکل ۱۶. منحنی بار-جابجایی (تأثیر وجود هسته در ظرفیت باربری مقاطع تیپ ۱)

Fig. 16. Load-axial curves (the effect of the core on the bearing capacity of type 1 sections)



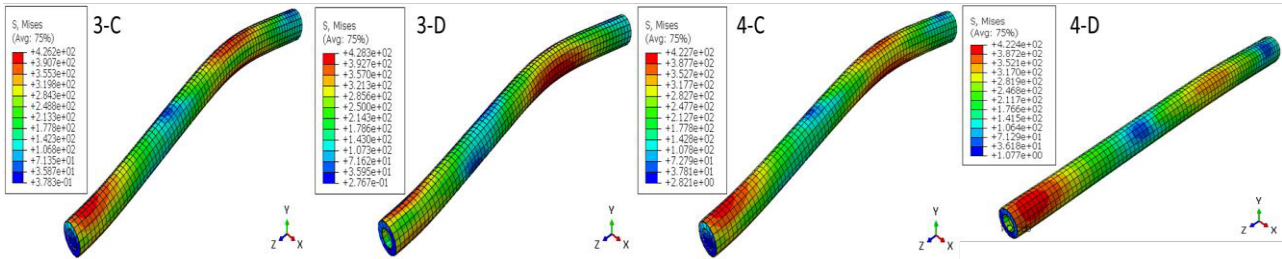
شکل ۱۷. منحنی بار-جابجایی (تأثیر وجود هسته در ظرفیت باربری مقاطع تیپ ۲)

Fig. 17. Load-axial curves (the effect of the core on the bearing capacity of type 2 sections)



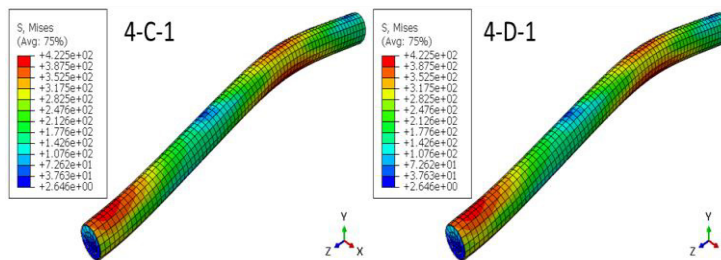
شکل ۱۸. کانتور تنش ستون های تیپ ۱

Fig. 18. Tension contour of type 1 column



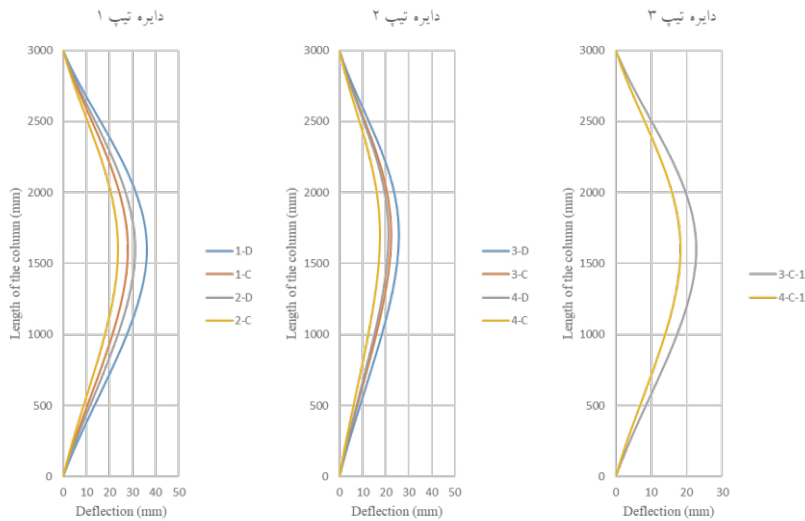
شکل ۱۹. کانتور تنش ستون های تیپ ۲

Fig. 19. Tension contour of type 2 column



شکل ۲۰. کانتور تنش ستون های تیپ ۳

Fig. 20. Tension contour of type 3 column

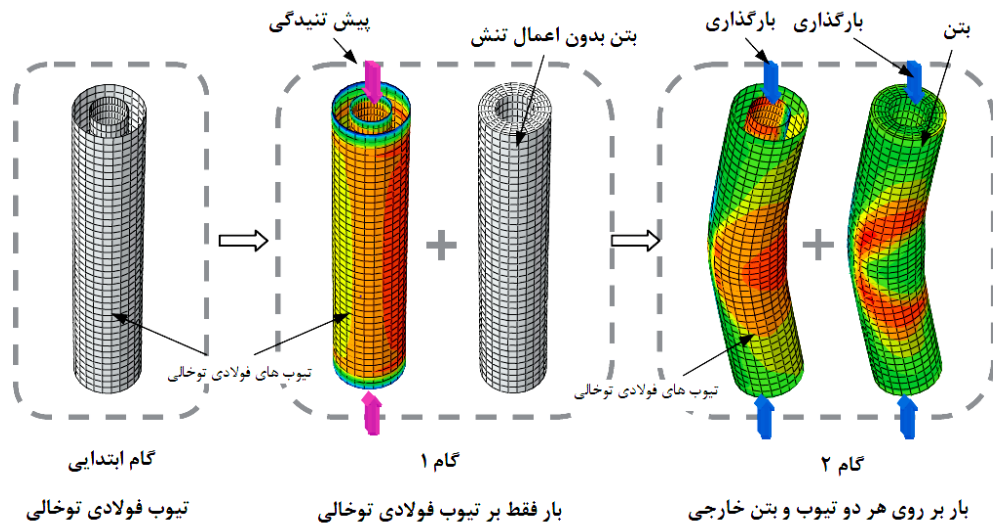


شکل ۲۱. کماتش ستون های مدل سازی

Fig. 21. Buckling of modeling columns

مرحله دوم، پیش تنیدگی در مرحله اول تا زمان شکست ستون ثابت می ماند. جمع بندی نیروی واکنش از مرز و پیش تنیدگی به عنوان ظرفیت ستون مرکب در نظر گرفته شد. روش بارگذاری برای پیش تنیدگی در لوله های درونی و خارجی در شکل ۲۲ نشان داده شده است.

شدند. سپس لوله های فولادی تغییر شکل اولیه و تنش از قبل ناشی از پیش تنیدگی به دست آورده شد. در گام دوم، عناصر بتن در لوله ها فعال شدند، جابجایی عمودی در بالای ستون تخصیص داده شد. بتن و لوله های درونی و خارجی تا زمان شکست با هم، هم بار شدند. در



شکل ۲۲. روند رفتار ستون ها تحت بارگذاری

Fig. 22. Behavior trends of columns under restructuring li et al [30]

۵- نتایج و بحث

هر اندازه‌ی دلخواه مقرون به صرفه نیست، زیرا گرچه سبب بالا رفتن ظرفیت باربری می شود، ولی افزایش بیش از حد قطر در جداره سبب کاهش شکل پذیری نمونه ها می شود که برای درک بهتر مقایسه ای انجام شده به عنوان نمونه بر اساس ضریب (λ) با افزایش ضخامت قطر خارجی شکل پذیری کاهش می یابد که این بازه تغییرات قطر به ضخامت و حد تغییرات (افزایش-کاهش) در مقاله‌ی هیوا چوگلی و همکاران، ۱۳۸۹ [۳۰] مورد بررسی قرار گرفته است.

شکل ۱۲، مقاطع تیپ ۱ و ۲ نمونه های توپر و توخالی با ضخامت هایی که در جدول ۳ معرفی شد، به صورت گروهی با یکدیگر مقایسه گردید. در این مقایسه حالت بهینه با توجه به مصالح مصرفی به دست آمده است. در شکل ۱۳، نمونه های C-2 و 1-C-3 با تغییر ضخامت داخلی مقادیر فولاد مصرفی با یکدیگر برابر در نظر گرفته شد تا بتوان مقایسه درستی در بین نمونه ها صورت گیرد. به صورتی که این دو نمونه دارای مساحت فولادی یکسان بوده و نمونه C-2 دارای هسته به قطر ۱۱۰ سانتی متر و در نمونه 1-C-3 مساحت فولادی ثابت (ضخامت تیوب داخلی کاهش یافته) که بدین صورت این دو نمونه دارای فولاد برابر بوده که مشاهده شد با افزایش مقدار مساحت هسته ظرفیت باربری کاهش می یابد. در نمونه C-1 و 1-C-3 نیز همین شرایط و نتایج حکم فرما بوده است. در شکل ۱۴ مقاطع تیپ ۱ دو به دو با هم مقایسه گردید به صورتی که هر دو مقطع تو خالی با هم و مقطع توپر با یکدیگر مقایسه شد تا اثر تغییر ضخامت

در مقاله‌ی حاضر رفتار ستون های کامپوزیتی فولادی پر شده با بتن (CFDST) در مرض بارگذاری محوری مورد بررسی قرار گرفت. نرم افزار عناصر محدود ABAQUS برای انجام تحلیل غیرخطی استفاده شده و دقت مدل سازی عناصر محدود پیشنهادی با مقایسه نتایج تحلیلی و آزمایشگاهی مربوطه مشاهده شد. تغییر شکل پلاستیک جداره فولادی نمونه های مقطع توپر نسبت به نمونه های با مقطع توخالی کمتر مشاهده می شود. همچنین، هرچه نسبت توخالی (λ) بزرگ تر باشد، محدوده تغییر شکل پلاستیک جداره های فولادی کوچک تر و نقطه ماکزیمم تغییر شکل پلاستیک بزرگ تر می شود. در مبحث اثر ضخامت ها افزایش ضخامت جداره های فولادی داخلی و خارجی، راهکار مناسبی برای افزایش مقاومت ستون ها خواهد بود و همان طور که توضیح داده شد اهمیت اثر ضخامت تیوب داخلی مهم تر بوده و محصور شدگی هسته و هم محصور شدگی بتن خارجی (ساندویچ) حائز اهمیت است. بهتر است ضخامت لایه ها به گونه ای طراحی شود که با حفظ محدودیت های عنوان شده در آیین نامه ها، این لایه ها داری ضخامت مناسب باشند به طوری که نیرو ها در تیوب داخلی و خارجی به طور مناسب توزیع گردد تا هم وظیفه ی انتقال بار محوری و هم ظرفیت باربری افزایش یابد.

تأثیر تغییرات قطر در جداره ها نیز مورد بررسی قرار گرفت، که نتایج نشان می دهد برای بالا بردن ظرفیت باربری با افزایش قطر به

در مقاطع بررسی گردد. در شکل ۱۵ نیز به همین صورت بوده با این تفاوت که اثر ضخامت در نمونه های تیپ ۲ مورد بررسی قرار گرفت. در شکل ۱۶، نمونه های تیپ ۱ دو به دو با هم مقایسه گردید به طوری که نمونه های دارای شرایط فولادی برابر با در نظر گرفتن توپ و توخالی با هم مورد مقایسه قرار گرفت تا اثر وجود هسته در مقدار ظرفیت باربری نمونه ها بررسی گردد. در شکل ۱۷ نیز همین روند مقایسه برای نمونه های تیپ ۲ انجام گردید تا با توجه به افزایش مقدار هسته وجود و عدم وجود هسته بتنی، ظرفیت نمونه ها در این حالت نیز مورد بررسی قرار بگیرد.

۶- نتیجه گیری

در تحقیق حاضر، اگر چه نتایجی که در زیر ارائه می شوند، محدود به حالات در نظر گرفته شده برای تحلیل ها است، اما احتمال می رود که این نتایج حوزه ی تأثیر و کاربرد جامع تری داشته باشند. نتایج حاصل از این تحقیق عبارتند از:

۱- با افزایش مساحت هسته بتنی در مدل های ستون های CFDST با مقطع دایره ای حدوداً ۱٫۸٪ ظرفیت باربری کمتری را تحمل کردند.

۲- افزایش ضخامت تیوب خارجی در ستون های دایره ای تیپ ۱ دارای هسته حدوداً ۲٫۱۵٪، موجب افزایش ظرفیت باربری می شود.

۳- افزایش ضخامت تیوب خارجی در ستون های دایره ای تیپ ۱ فاقد هسته حدوداً ۲٫۵۷٪، موجب افزایش ظرفیت باربری می شود.

۴- افزایش ضخامت تیوب خارجی در ستون های دایره ای تیپ ۲ دارای هسته حدوداً ۳٫۷٪، موجب افزایش ظرفیت باربری می شود.

۵- افزایش ضخامت تیوب خارجی در ستون های دایره ای تیپ ۲ فاقد هسته حدوداً ۴٪، موجب افزایش ظرفیت باربری می شود.

۶- بررسی ها نشان داد که با اضافه شدن هسته، ظرفیت باربری ستون C-1 نسبت به ستون D-2 حدوداً ۱۶/۳۲٪ افزایش پیدا می کند در صورتی که ظرفیت باربری در ستون C-2 نسبت به ستون D-2 حدوداً ۱۵/۶۱٪ افزایش پیدا می کند.

۷- بررسی ها نشان داد که با اضافه شدن هسته، ظرفیت باربری ستون C-3 نسبت به ستون D-3 حدوداً ۲۰/۷۵٪ افزایش پیدا می کند در صورتی که ظرفیت باربری در ستون C-4 نسبت به ستون D-4 حدوداً ۲۰/۲۸٪ افزایش پیدا می کند.

۸- بررسی ها نشان داد که تغییرات ضخامت در تیوب خارجی سبب می شود که ظرفیت باربری در ستون C-2 نسبت به ستون C-1 حدوداً ۴/۲۱٪ افزایش پیدا کند در صورتی که ظرفیت باربری در ستون D-2 نسبت به ستون D-1 حدوداً ۵/۰۱٪ افزایش پیدا می کند.

۹- بررسی ها نشان داد که تغییرات ضخامت در تیوب خارجی سبب می شود که ظرفیت باربری در ستون C-4 نسبت به ستون C-3 حدوداً ۷/۲۶٪ افزایش پیدا می کند در صورتی که ظرفیت باربری در ستون D-4 نسبت به ستون D-3 حدوداً ۷/۸۰۷٪ افزایش پیدا می کند.

۱۰- بررسی ها نشان داد که در ستون های C-2 و C-4-1 با افزایش قطر هسته با مساحت فولاد یکسان، ظرفیت باربری حدوداً ۴/۳۹٪ افزایش پیدا می کند.

۱۱- بررسی ها نشان داد که در ستون های C-1 و C-3-1 با افزایش قطر هسته با مساحت فولاد یکسان، ظرفیت باربری حدوداً ۱۲/۷۷٪ افزایش پیدا می کند.

۱۲- بررسی ها نشان داد که در ستون D-3 نسبت به ستون D-1 با افزایش قطر هسته ظرفیت باربری حدوداً ۱۱/۵۴٪ کاهش پیدا می کند، همچنین در ستون D-4 نسبت به ستون D-2 با افزایش قطر هسته ظرفیت باربری حدوداً ۸/۸۶۷٪ کاهش پیدا می کند.

مراجع

- [1] Giakoumelis, G., Lam, D. (2004). "Axial capacity of circular concrete-filled tube columns". *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 60, No. 7, pp. 1068-1049.
- [2] Li, Y.F., Chen, S.H., Chang, K.C., Liu, K.Y. (2005). "A constitutive model of concrete confined by steel reinforcements and steel jackets". *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 32, No. 1, pp. 288-279.
- [3] Portolés, J.M., Romero, M.L., Bonet, J.L., Filippou, F.C. (2011). "Experimental study of high strength concrete-filled circular tubular columns under eccentric loading". *Journal of constructional steel research*, Vol. 67, No. 4, pp. 633-623.
- [4] Chogoli, H., Chenaghloou, M., Abedi, K. (2011). Investigation into Behavior of Concrete filled Double Skin steel Tubular (CFDST) Columns, *Journal of Civil and*

- [15] Ashrafi, H., Rezaei, M. (2014). Investigation of bearing capacity of SRC reinforced steel-concrete composite column, 6th Annual national Iranian concrete conference, Tehran, Iran concrete Association. (In Persia)
- [16] Kheyroddin, A., Naderpour, H. (2012). Investigation of the effect of concrete enclosure under the effect of steel wall in concrete-steel composite circular columns, 2th National Conference on Crisis Management, Tehran. (In Persia)
- [17] Pagoulatou, M., Sheehan, T., Dai, X. H., Lam, D. "Finite Element Analysis on the Capacity of Circular Concrete-Filled Double-Skin Steel Tubular (CFDST) Stub Columns", *Engineering Structures*, Vol. 72, pp. 112-102, 2014.
- [18] M.F. Hassanein, O.F. Kharoob, Q.Q. Liang. Circular concrete-filled double skin tubular short columns with external stainless steel tubes under axial compression. *Thin-Walled Structures* 73 (2013). pp. .255
- [19] M.F. Hassanein, V.I. Patel. Round-ended rectangular concrete-filled steel tubular short columns: FE investigation under axial compression. *Journal of Constructional Steel Research*, January 2018. pp. 18-11.
- [20] Chang, X., Wei, Y., Yun, Y., 2012. Analysis of steel-reinforced concrete-filled steel tubular (SRCFST) columns under cyclic loading. *Constr. Build. Mater.* 28, 95–88.
- [21] Chang, X., Ru, Z., Zhou, W., Zhang, Y., 2013. Study on concrete-filled stainless steel carbon steel tubular (CFSCT) stub columns under compression. *Thin-Walled Struct.* 63, 133–125.
- [22] Ellobody, E., Young, B., 2006. Nonlinear analysis of concrete-filled steel SHS and RHS columns. *Thin-Walled Struct.* 44, 930–919.
- [23] Shiri, B., Gholizadeh, A. And Safarzadeh, A. (2014). The numerical investigation of the behaviour of double walled steel columns (CFDST) is subjected to axial pressure with respect to the ratio of two different empty columns, 2nd. International congress on structure, Architecture & Urban development, 16-18 December. (In Persia)
- [24] Hosseini, h., Hashemi ,S, Sh. (2012). Numerical analysis of the effect of trapping on the connection of beam to steel column filled with concrete (CFT) by restraint bolts, *Surveying Engineering*, Volume 44, Issue 5, Page 635-647. (In Persia)
- [5] Ahmadi, M., Kheyroddin, A. and Naderpour, H. (2010). Finite Element Analysis on the Capacity of Circular Concrete-Filled Double-Skin Steel Tubular (CFDST) Stub Columns, *Modelling in journal Engineering*, Volume 8, Issue 22, Page 37-49. (In Persia)
- [6] Behesht ain, A., and Abedi, k. (2007). Study of the behavior of concrete column filled with steel sections (SR-CFT). 3rd National Congress of civil Engineering. (In Persia)
- [7] Sulthana U. M., Jayachandran S. A. 2016. Axial Compression Behaviour of Long Concrete Filled Double Skinned Steel Tubular Columns. *Structures* 9, pp.164-157.
- [8] Carmen Ibañeza, Ana Piquera, David Hernández-Figueirido, Óscar Martínez-Ramosa. 2017. Experimental analysis of concrete-filled double skin tubular columns subjected to eccentric loads. *Ce/papers*, Wiley Brand pp.2146-2138.
- [9] Kojiro Uenaka. 2016. CFDST stub columns having outer circular and inner square sections under compression. *Journal of Constructional Steel Research* 120, pp. 7–1.
- [10] C. Ibañez, M.L. Romero, A. Espinos, J.M. Portolés, V. Albero. 2016. Ultra-high Strength Concrete on Eccentrically Loaded Slender Circular Concrete-filled Dual Steel Columns. *structures* 12, pp. 74-64.
- [11] M.F. Hassanein, M. Elchalakani, V.I. Patel. 2017. Overall buckling behaviour of circular concrete-filled dual steel tubular columns with stainless steel external tubes. *Thin-Walled Structures* 115 pp. 348–336.
- [12] Romero ML, C. Ibañez, A. Espinos, J.M. Portolés, A. Hospitaler, Influence of Ultra-high Strength Concrete on Circular Concrete-filled Dual Steel Columns, *Structures* (2016), <http://dx.doi.org/10.1016/j.istruc.2016.07.001>.
- [13] Elchalakani, M., Karrech, A., Hassanein, M.F., Yang, B., "Plastic and Yield Slenderness Limits for Circular Concrete Filled Tubes Subjected to Static Pure Bending", *Thin-Walled Structures*, Vol. 109, pp. 64-50, 2016.
- [14] AISC: American Institute of Steel Construction, Specification for Structural Steel Buildings, ANSI/AISC 10-360, 2010.

- Research 107 (2015).
- [28] Johansson M, Gylltoft K. Structural behavior of slender circular steel- concrete composite columns under various means of load application. *Steel & Composite Structures*, 1: 410-393, 2001.
- [29] Johan Alexander Koen. An Investigation into the Axial Capacity of Eccentrically Loaded Concrete Filled Double Skin Tube Columns Dissertation presented for the degree of Master of Science in Engineering at Stellenbosch Universit, 67: 105, 2015.
- [30] Chogoli, H., Chenaghlou, M., Abedi, K. (2011). Investigation into Behavior of Concrete filled Double Skin steel Tubular (CFDST) Columns, *Journal of Civil and Surveying Engineering*, Volume 44, Issue 5, Page 635-647. (In Persia)
- 9th international congress of civil engineering, Isfahan University of Technology. (In Persia)
- [25] M.F. Hassanein, M. Elchalakani, A. Karrech, V.I. Patel, Bo Yang, Behaviour of Concrete-filled Double-skin Short Columns Under Compression Through Finite Element Modelling: SHS Outer and SHS Inner Tubes, *Structures* (2018), <https://doi:10.1016/j.istruc.2018.04.006>.
- [26] David Pons, Ana Espinós, Vicente Albero, Manuel L. Romero, Numerical study on axially loaded ultra-high strength concrete-filled dual steel columns, *Steel and Composite Structures* 2018, <https://www.researchgate.net/publication/324031404>.
- [27] Wei Li, Lin-Hai Han, Xiao-Ling Zhao, Behavior of CFDST stub columns under preload, sustained load and chloride corrosion, *Journal of Constructional Steel*

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

A. Mokhtari, H. Saberi, V. Kolmizadeh, V. Saberi, *Investigation of circular concrete-filled double-skin steel tubular (CFDST) columns under Axial Compressive Load*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 53(2) (2021) 479-494.

DOI: [10.22060/ceej.2019.15430.5918](https://doi.org/10.22060/ceej.2019.15430.5918)

