

Investigating the Effect of Concrete Compressive Strength on Axial Performance of Double-Edged Steel Columns Filled with Concrete

Vesam Kolmizadeh¹, Hamid Saberi^{2*}, Amir Mokhtari¹, Vahid Saberi²

1- Masters, Structural Engineer, Faculty of Civil Engineering, University of Eyvanekey, Semnan, Iran

2- Assistant Professor, Faculty of Civil Engineering, University of Eyvanekey, Semnan, Iran

ABSTRACT

In this research, the co-operation of steel and concrete in composite columns is considered. Using numerical modeling to study the behavior of these sections, a new type of composite sections named concrete-filled double-skin steel column is introduced. The factors affecting numerical simulation, which bring this simulation closer to the laboratory conditions, determine the axial resistance of the samples by changing the dimensions and geometry as well as the properties of the materials. The purpose of this thesis is to investigate the effect of concrete compressive strength on the axial performance of concrete-filled double-skin steel column CFDST concrete. A total of 20 samples with different parameters such as effects of concrete, loading capacity and width to thickness ratio on the strength of columns with square and round cross section in inner and outer walls were investigated by ABAQUS software. The results of the study showed that the loading capacity of CFDST columns under axial pressure increased by about 4% with increasing compressive strength of concrete in the inner wall. Also, studies showed that with increasing cross-section in the inner wall, the loading capacity in square columns increased by about 7% and decreased by about 3% in circular columns.

ARTICLE INFO

Receive Date: 04 July 2019

Revise Date: 29 July 2019

Accept Date: 10 August 2019

Keywords:

*Composite columns;
CFDST columns;
Axial performance;
Bearing load;
Numerical modeling*

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/JSCE.2019.192744.1895

*Corresponding author: Hamid Saberi
Email address: saberi.hamid@eyc.ac.ir

بررسی تاثیر مقاومت فشاری بتن در عملکرد محوری ستون های دوجداره فولادی

پرشده با بتن

وسام کلمی زاده^۱، حمید صابری^{۲*}، امیر مختاری^۱، وحید صابری^۲

۱- کارشناس ارشد عمران، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه ایوان کی، سمنان، ایران

۲- استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه ایوان کی، سمنان، ایران

چکیده

در این پژوهش همکاری همزمان فولاد و بتن در ستون های مرکب مد نظر قرار گرفته و با استفاده از مدل سازی عددی به منظور مطالعه رفتار این مقاطع به معرفی نوع جدیدی از مقاطع به معرفی نوع جدیدی از مقاطع مرکب با عنوان ستون های فولادی دوجداره پر شده با بتن پرداخته شده است. عوامل موثر بر شبیه سازی عددی که این شبیه سازی را هرچه بیشتر به شرایط آزمایشگاهی نزدیک نماید تعیین و با تغییر در ابعاد و هندسه و همچنین خواص مصالح، مقاومت های محوری در نمونه ها بررسی و بیان می شود. هدف این مقاله، بررسی تاثیر مقاومت فشاری بتن در عملکرد محوری ستون های دوجداره فولادی پر شده با بتن *CFDST* می باشد. با بررسی سایر مقالات، می توان دریافت که تغییرات مقاومت بتن و ضخامت جداره های داخلی و خارجی در دو مقطع مربع و دایره ستون های بلند وجه تمایز این تحقیق نسبت به سایر تحقیقات بوده است. در مجموع ۲۰ نمونه با پارامترهای مختلف از جمله تاثیرات بتن، ظرفیت باربری و نسبت عرض به ضخامت بر روی مقاومت ستون های با مقطع دایره و مربع در جداره داخلی و خارجی توسط نرم افزار اجزای محدود (*ABAQUS*) مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج بررسی نشان داد، ظرفیت باربری ستون های *CFDST* تحت فشار محوری، با افزایش مقاومت فشاری بتن در جداره ی داخلی حدوداً ۴٪ افزایش پیدا می کند. همچنین بررسی ها نشان داد که با افزایش مقطع در جداره داخلی، ظرفیت باربری در ستون های مربعی حدوداً ۷٪ افزایش و در ستون های دایره ای حدوداً ۳٪ کاهش می یابد.

کلمات کلیدی: ستون های مرکب، ستون های دوجداره فولادی پر شده با بتن، عملکرد محوری، ظرفیت باربری، مدل سازی عددی

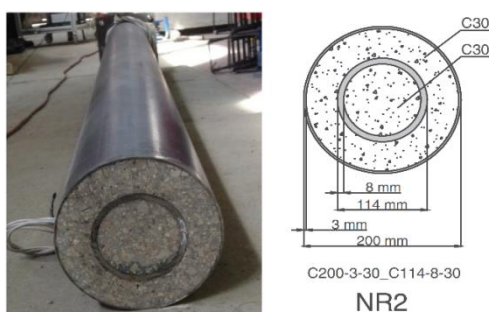
شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	10.22065/JSCE.2019.192744.1895	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2019.192744.1895	۱۴۰۰/۰۴/۳۰	۱۳۹۸/۰۵/۱۹	۱۳۹۸/۰۵/۱۹	۱۳۹۸/۰۵/۰۷	۱۳۹۸/۰۴/۱۳
				*نویسنده مسئول:		
				پست الکترونیکی:		
				حمید صابری		
				saberi.hamid@eyc.ac.ir		

۱- مقدمه

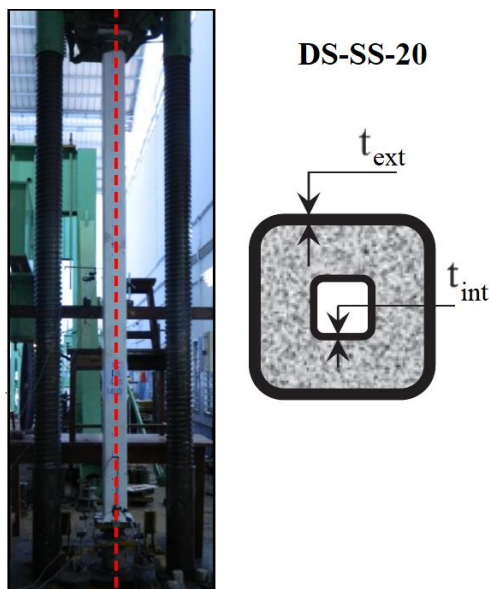
لوله دوجداره فولادی پر شده با بتن (CFDST)، یک عنصر سازه‌ای مرکب از فولاد و بتن است که شامل دو لوله فولادی به صورت هم‌مرکز می‌باشد و بین دو لوله با بتن پر شده است [۱]. به تازگی CFDSTها برای استفاده در اسکله‌ها و پایه‌های بلند پل‌های دره‌ای در دره‌های عمیق در ژاپن در نظر گرفته می‌شوند تا وزن خود سازه، در حالی که ظرفیت جذب انرژی زیادی در برابر بارگذاری زمین لرزه حفظ می‌گردد، کاهش یابد. همچنین امکان استفاده از لوله‌های دو لایه پر شده با بتن در ستون‌های سازه‌های ساختمانی و به عنوان ستون پل‌های کامپوزیتی در کاربردهای دریایی نیز وجود دارد. در مقایسه با محصورکنندگی ستون‌های بتنی مسلح، ستون‌های CFDST فشار محبوس قوی تر و یکنواخت بیشتری توسط جداره های فولادی، به بتن پر شده داخلی فراهم می‌کنند، که باعث کاهش مشکل تراکم فولاد و افزایش کیفیت بتن‌ریزی می‌شود [۲]. همانند ساختار ساندویچی (قرار گرفتن ماده‌ای میان دو ماده دیگر)، یکی دیگر از مزیت‌های لوله‌های دولایه پر شده با بتن این است که حلقه ایجاد شده میان لوله‌های فولادی به این معنی است که انواع مواد پرکننده می‌تواند برای کاربردهای مختلف اتخاذ شود [۳]. مطالعات عددی و آزمایشگاهی بر روی رفتار ستون‌های CFDST اخیراً توسط محققان انجام شده که از آن جمله می‌توان به مطالعاتی درباره رفتار ستون‌های CFDST با مقطع دایره‌ای در دو جداره داخلی و خارجی توسط تائو و همکاران در سال ۲۰۰۴ [۴]، آزمایش‌هایی بر روی ستون‌های لوله‌ای فولادی دو جداره پر شده با بتن (CFDST) با مقطع مربعی در دو جداره داخلی و خارجی جهت بررسی رفتار سازه‌ای این ستون‌ها در مقاله ژائو و همکاران در سال ۲۰۰۲ [۵] و تحت شرایط بارگذاری پایدار بلند مدت، توسط هان و همکارانش در سال ۲۰۱۱ [۶] اشاره نمود. همچنین مطالعات در ستون‌های CFDST تحت بارهای محوری در چند کار آزمایشی دوندو و همکاران در سال ۲۰۱۵ [۷] و رومرو و همکاران در سال ۲۰۱۵ [۸] انجام شده است. رومرو و همکاران در سال ۲۰۱۷ [۹] بر روی ستون‌های دایره‌ای با بتن با مقاومت فوق العاده بالا تحت بار خارج از مرکز را مورد بررسی قرار دادند. غنیم حسن و همکاران در سال ۲۰۱۹ [۱۰] تاثیر لوله فولادی داخلی بر روی ستون‌های کوتاه CFDST را تحت بارهای محوری، مورد بررسی قرار داده‌اند. با توجه به این که در مورد ستون‌های CFDST بلند تحقیقات کمی انجام شده در حالی که عملکرد لرزه‌ای مناسب آن‌ها، پتانسیل بکارگیری آنها را در سازه‌های بلند، با توجه به ظرفیت و شکل‌پذیری مناسب افزایش می‌دهد، در این مقاله تمرکز بر بررسی رفتار این نوع ستون‌ها با تکیه بر مصالح مصرفی است. همچنین با بررسی سایر مقالات، می‌توان دریافت که تغییرات مقاومت بتن و ضخامت جداره‌های داخلی و خارجی در دو مقطع مربع و دایره ستون‌های بلند وجه تمایز این تحقیق نسبت به سایر تحقیقات بوده است.

۲- روند مطالعه و صحت سنجی با نتایج آزمایشگاهی

برای حل معادلات، برنامه ABAQUS از روش‌های عددی مختلفی استفاده می‌کند. این پارامتر در واقع نشان دهنده روش عددی است که برنامه برای حل معادلات مربوط به المان مورد نظر به کار می‌رود. برخی از روش‌های عددی برای افزایش سرعت محاسبات به ناچار تقریب زیادی وارد پاسخ‌ها می‌کنند، از این رو با توجه به دقت مطلوب و نیز با در نظر گرفتن هزینه محاسباتی باید روش مناسبی اختیار شود. شبیه‌سازی‌های عددی غیرخطی، بر مبنای روش المان محدود و با استفاده از بسته نرم‌افزاری استاندارد ABAQUS 2016 انجام شده است. در این تحقیق به منظور اطمینان از صحت مدل‌سازی نرم‌افزاری در نرم‌افزار اجزای محدود، نتایج با کار آزمایشگاهی رومرو و همکارانش در سال ۲۰۱۷ [۱۱] برای مقطع دایره‌ای و سلطانا و همکاران در سال ۲۰۱۷ برای مقطع مربعی [۱۲] مقایسه شده است. ابعاد و هندسه این نمونه آزمایشگاهی در شکل ۱ برای نمونه با مقطع دایره‌ای و شکل ۲ برای نمونه با مقطع مربعی نشان داده شده است.



شکل ۱: نمونه آزمایشگاهی NR2 [۱۱]

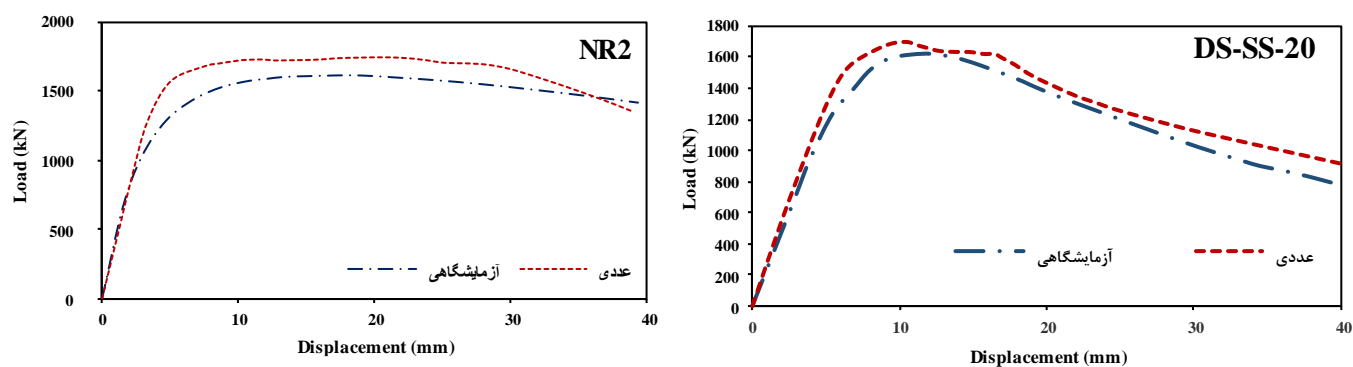


شکل ۲: نمونه آزمایشگاهی DS-SS-20 [۱۲]

پس از حصول اطمینان از صحت مدل سازی از جمله بارگذاری، شرایط تکیه گاهی، مصالح و اندرکنش مصالح اقدام به طراحی و مدل سازی ستون های دوجداره فولادی پر شده با بتن و بررسی رفتار این ستون ها تحت نیروی محوری با مقاومت فشاری مختلف بتن گردید. برای این منظور به مقایسه نتایج تحلیل عددی ستون CFDST و نمونه آزمایشگاهی ذکر شده در جدول ۱ می پردازیم. شکل ۳ نمودار بار تغییر مکان برای نمونه های ذکر شده را به همراه نتایج آزمایشگاهی نشان می دهد.

جدول ۱: مشخصات نمونه آزمایشگاهی [۱۱، ۱۲]

شناسه	نمونه ستون	لوله خارجی				لوله داخلی			
		D_{ext} (mm)	t_{ext} (mm)	$f_{y,ext}$ (MPa)	$f_{c,ext}$ (MPa)	D_{int} (mm)	t_{int} (mm)	$f_{y,int}$ (MPa)	$f_{c,int}$ (MPa)
NR2	C200-3-30-C114-8-30	۲۰۰	۳	۳۳۲	۴۵	۱۱۴/۳	۸	۴۰۳	۴۲
DS-SS-20	DS-SS-20	۱۸۰	۵	۳۵۷/۹	۳۸/۸	۶۰	۳/۲	۳۵۷/۹	۰



شکل ۳: منحنی های بار - جابجایی نمونه آزمایشگاهی و مدل عددی ستون های CFDST

جدول ۲ مقادیر ظرفیت بار نهایی به دست آمده از نتایج آزمایشگاهی و عددی آورده شده است. با توجه اختلاف ۸/۱۶٪ و ۴/۷۲٪ نتایج المان محدود (P_{FEM}) و آزمایشگاهی ظرفیت بار نهایی (P_{EXP}) برای نمونه های NR2 و DS-SS-20 همچنین مقایسه رفتار نمونه عددی و آزمایشگاهی که در شکل ۳ آورده شده است، ملاحظه می گردد مدل های عددی از دقت خوبی برخوردار می باشد در نتیجه، مدل عناصر

محدود سه بعدی پیشنهادی با دقت قابل قبولی می‌تواند برای پیش بینی رفتار ستون‌های دو جداره فولادی پر شده با بتن (CFDST) مورد استفاده قرار گیرد.

جدول ۲: مقایسه بار نهایی در روش عددی و آزمایشگاهی [۱۲، ۱۱]

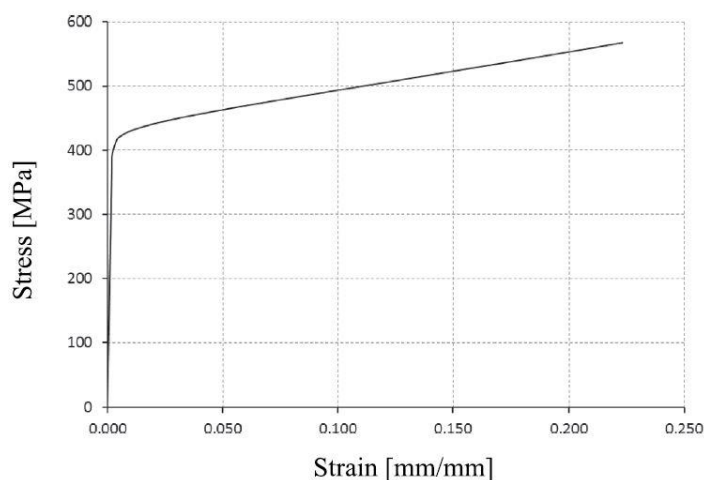
	P _{EXP}	P _{FEM}
نمونه NR2	۱۶۱۱	۱۷۴۲/۴۵
اختلاف (%)		۸/۱۶
نمونه DS-SS-20	۱۶۲۰	۱۶۹۶/۵۶
اختلاف (%)		۴/۷۲

۳- مدل سازی

۳-۱- مدل سازی فولاد

در ستون‌های مدل‌سازی شده از فولاد ST-37 استفاده شده است. برای مدل‌سازی فولاد با استفاده از مدل رامبرگ-اسگود (Ramberg-Osgood) بدست 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 ۴ تصحیح می‌شود. ضریب (n) رامبرگ-اسگود توسط معادله زیر بدست آمده:

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



شکل ۴: منحنی تنش-کرنش رامبرگ-اسگود [۱۳]

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

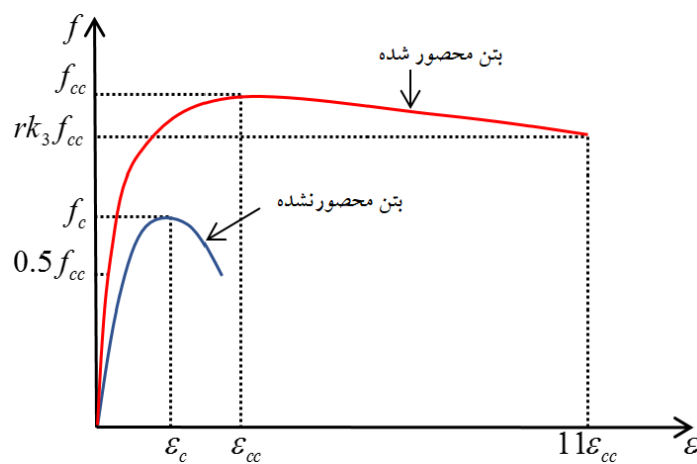
۳-۲- مدل سازی بتن

برای مدل‌سازی بتن در نرم افزار ABAQUS با توجه به رفتار ترد و شکننده آن، از گزینه‌ای به عنوان Concrete Damage Plasticity استفاده می‌شود. در این گزینه امکان وارد نمودن نقاط مختلف منحنی تنش-کرنش بتن در کشش و فشار وجود دارد [۱۵]. این

مدل در محیط نرم افزار ABAQUS جهت مدل کردن بتن و دیگر مواد شبه شکننده در انواع سازه ها (تیر، خرپا، پوسته و اجسام توپر) این مدل از مفهوم آسیب دیدگی همسانگرد در محدوده خطی و با ترکیب کشش ایزوتروپ و فشار پلاستیک جهت نمایش رفتار غیر خطی بتن استفاده می کند [۱۶]. به دلیل اندرکنش بین بتن و فولاد در ستون های دایروی پر شده با بتن، یک حالت تنش سه محوری در هسته بتی ایجاد می شود که به محصورشدگی بتن وابسته است [۱۷، ۱۸].

۳-۲-۳- بتن خارجی

از بتن محصورشده برای فرآیند مدل سازی بتن خارجی نمونه ها استفاده گردید [۱۹]. مدل بتن مورد استفاده، مدل پگولاتو (Pagoulatou) و همکاران می باشد [۲۰]، که بعدها به عنوان مدل پگولاتو مطرح شد. مدل بتن پیشنهاد شده توسط پگولاتو و همکاران [۲۰]، همانطور که در شکل ۵ نشان داده شده است، شامل مجموعه ای از معادلات زیر می باشد:



شکل ۵: منحنی بتن پیشنهاد شده پگولاتو و همکاران [۲۰]

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

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

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

$$\frac{f_1}{f_{y1}} = 0.01844 - 0.00055(\frac{B_0}{t_0}) - 0.0004(\frac{B_i}{t_i}) + 0.00001(\frac{B_0}{t_0})^2 + 0.00001(\frac{B_0}{t_0})(\frac{B_i}{t_i}) - 0.00002(\frac{B_i}{t_i})^2 \quad (5)$$

$$\frac{f_1}{f_{y0}} = 0.01791 - 0.00036(\frac{B_0}{t_0}) - 0.00013(\frac{B_i}{t_i}) + 0.00001(\frac{B_0}{t_0})^2 + 0.00001(\frac{B_0}{t_0})(\frac{B_i}{t_i}) - 0.00002(\frac{B_i}{t_i})^2 \quad (6)$$

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

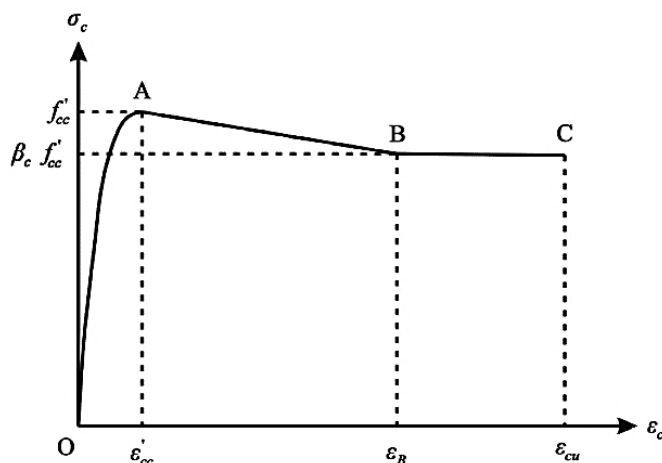
$$E_c = 4700 \sqrt{f_{cc}} \quad (8)$$

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

$$R_E = \frac{E_c \varepsilon_{cc}}{f_{cc}} \quad (10)$$

۳-۲-۲- بتن داخلی برای مقاطع دایره‌ای

منحنی تنش - کرنش نشان داده شده در شکل ۶، در تحلیل اجزای محدود حاضر استفاده شده است که توسط لیانگ و فراگامنی (Fragomeni) [۲۱] که در مقاله‌ی حسنین و همکاران [۲۲] نیز استفاده شده است:



شکل ۶: منحنی تنش - کرنش بتن برای مقطع دایره‌ای [۲۱]

در این مدل، اثر محرک بتن باعث افزایش قدرت و انعطاف پذیری بتن می‌شود. بخش OA منحنی تنش کرنش با استفاده از معادلات پیشنهاد شده توسط مندر (Mander) و همکاران ارائه شده است [۲۳]. داریم:

$$\sigma_c = \frac{f'_{cc} \lambda (\epsilon_c / \epsilon'_{cc})}{\lambda - 1.0 + (\epsilon_c / \epsilon'_{cc})^\lambda} \quad (11)$$

$$\lambda = \frac{E_c}{E_c - (f'_{cc} / \epsilon'_{cc})} \quad (12)$$

در بالا، σ_c تنش فشاری طولی بتن، f'_{cc} مقاومت فشاری در بتن محصورشده، ϵ_c کرنش فشاری طولی بتن، ϵ'_{cc} کرنش در f'_{cc} و E_c مدول یانگ است، که از طریق توصیه‌های موجود در ACI 318 [۲۴] تعیین می‌شوند که به صورت رابطه (۱۳) تعریف می‌شود:

$$E_c = 3320 \sqrt{\gamma_c f'_c} + 6900 \quad (13)$$

که در آن γ_c عامل کاهش قدرت برای اثرات اندازه ستون است، کیفیت بتن و نرخ بارگذاری در مقاومت فشاری بتن است. این عامل (γ_c) توسط لیانگ (Liang) [۲۵] بر اساس معادله زیر داده شده است:

$$\gamma_c = 1/85 D_c^{-0.135} \quad (0/85 \leq \gamma_c \leq 1/0) \quad (14)$$

که در فرمول بالا D_c قطر هسته بتن است. مقاومت بتن محصورشده (f'_{cc}) و کرنش مربوطه (ϵ'_{cc}) توسط مندر و همکاران پیشنهاد شده است [۲۳]. با استفاده از ضریب کاهش مقاومت (γ_c) معادله به صورت زیر است [۲۵]:

$$f'_{cc} = \gamma_c f'_c + k f'_{rp} f'_c \quad (15)$$

$$\epsilon'_{cc} = \epsilon'_c \left[1 + 5k \frac{f'_{rp}}{\gamma_c f'_c} \right] \quad (16)$$

مقدار k توسط ریچارد و همکاران [۲۶]، ۴/۱ انتخاب شد. ϵ'_{cc} کرنش در f'_{cc} بتن غیر محصورشده و می‌توان آن را به صورت زیر

تعریف کرد:

$$\varepsilon'_c = \begin{cases} 0/002 & \gamma_c f'_c \leq 28 (MPa) \\ 0/002 + \frac{\gamma_c f'_c - 28}{54000} & 28 < \gamma_c f'_c \leq 82 (MPa) \\ 0/003 & \gamma_c f'_c > 82 (MPa) \end{cases} \quad (17)$$

یک مدل فشار محصورشده برای بتن معمولی و با مقاومت بالا توسط یک لوله فولادی معمولی یا با مقاومت بالا توسط لیانگ و فراگامنی [۲۱] بر اساس کار هو و همکاران [۲۷] و تانگ و همکاران [۲۸] ارائه شده است. این معادله عددی به صورت زیر می‌باشد. داریم:

$$f'_{cp} = \begin{cases} 0/7(v_e - v_s) \frac{2t}{D-2t} f_{sy} & \frac{D}{t} \leq 47 \\ \left(0/006241 - 0/0000357 \frac{D}{t}\right) f_{sy} & 47 < \frac{D}{t} \leq 150 \end{cases} \quad (18)$$

که در معادله بالا D قطر بیرونی لوله فولادی است، t ضخامت دیوار لوله فولادی است، v_s و v_e نسبت پواسون یک جداره فولادی با بتن و بدون بتن پرکننده می‌باشد. نسبت پواسون v_s مقدار $0/5$ در حداکثر نقطه مقاومت و v_e توسط تانگ و همکاران ارائه شده است [۲۹]. قسمت های AB و BC از شکل ۵ منحنی تنش- کرنش را نشان می‌دهد، که به صورت زیر می‌باشد:

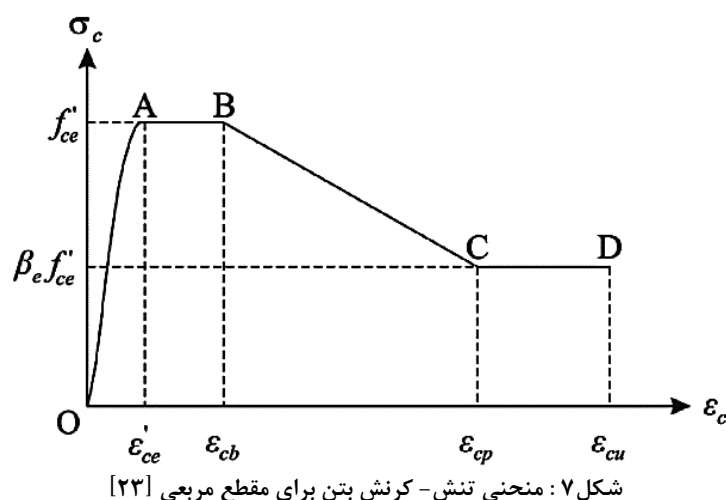
$$\sigma_c = \begin{cases} \beta_c f'_{cc} + \left(\frac{\varepsilon_B - \varepsilon_c}{\varepsilon_B - \varepsilon'_{cc}}\right) (f'_{cc} - \beta_c f'_{cc}) & \varepsilon'_{cc} < \varepsilon_c \leq \varepsilon_B \\ \beta_c f'_{cc} & \varepsilon_c > \varepsilon_B \end{cases} \quad (19)$$

جایی که ε_{cu} براساس نتایج تجربی به دست آمده توسط لیانگ و فراگامنی، $0/2$ پیشنهاد شده است [۲۰]، و β_c توسط هو و همکاران [۲۷] ارائه شده است و به صورت زیر می‌باشد:

$$\beta_c = \begin{cases} 1/0 & \frac{D}{t} \leq 40 \\ 0/0000339 \left(\frac{D}{t}\right)^2 - 0/0102285 \left(\frac{D}{t}\right) + 1/3491 & 40 < \frac{D}{t} \leq 150 \end{cases} \quad (20)$$

۳-۲-۳- بتن داخلی برای مقاطع مربعی

شکل ۷ منحنی تنش کرنش مورد استفاده در تحلیل اجزای محدود حاضر را برای شبیه سازی رفتار بتن محصورشده در مقطع مربع را نشان می‌دهد. قسمت OA منحنی تنش- کرنش نیز با استفاده از معادلات مندر و همکاران ارائه شده است [۲۳]. داریم:



$$\sigma_c = \frac{f'_{ce} \lambda (\varepsilon_c / \varepsilon'_{ce})}{\lambda - 1.0 + (\varepsilon_c / \varepsilon'_{ce})^2} \quad (21)$$

$$\lambda = \frac{E_c}{E_c - (f'_{ce} / \varepsilon'_{ce})} \quad (22)$$

در بالا، f'_{ce} مقاومت فشاری در موثر بتن، ε'_{ce} کرنش در f'_{ce} و E_c مدول یانگ است، که از طریق توصیه‌های موجود در ACI 318 [24] تعیین می‌شوند که به صورت رابطه (23) تعریف می‌شود:

$$E_c = 3320 \sqrt{f'_{ce}} + 6900 \quad (23)$$

کرنش در f'_{ce} به صورت زیر می‌باشد:

$$\varepsilon'_{ce} = \begin{cases} 0 / 002 & f'_{ce} \leq 28 (MPa) \\ 0 / 002 + \frac{f'_{ce} - 28}{54000} & 28 < f'_{ce} \leq 82 (MPa) \\ 0 / 003 & f'_{ce} > 82 (MPa) \end{cases} \quad (24)$$

قسمت‌های AB، BC و CD منحنی تنش-کرنش برای بتن محصور شده که در شکل ۷ نشان داده شده است براساس مدل ارائه شده توسط تامی (Tomii) و ساکینو (Sakino) [29] می‌باشد. داریم:

$$\sigma_c = \begin{cases} f'_{ce} & \varepsilon'_{ce} < \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cb} \\ \beta_e f'_{ce} + \frac{(\varepsilon_{cp} - \varepsilon_c)(f'_{ce} - \beta_e f'_{ce})}{(\varepsilon_{cp} - \varepsilon_{cb})} & \varepsilon_{cb} < \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cp} \\ \beta_e f'_{ce} & \varepsilon_c > \varepsilon_{cp} \end{cases} \quad (25)$$

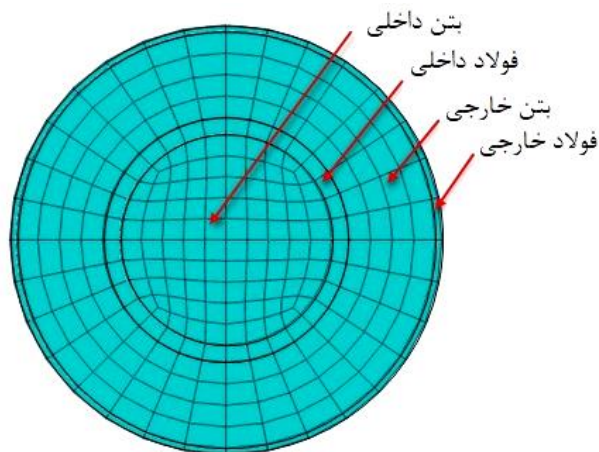
جایی که ε_{cb} است کرنش فشاری بتن در نقطه B، ε_{cp} کرنش فشاری بتن در نقطه C، که در شکل ۷ نشان داده شده است. مقدار کرنش ε_{cb} ، ε_{cp} در نظر گرفته شده است در حالی که کرنش ε_{cp} ، 0.15 در نظر گرفته شده است. براساس نتایج تجربی ارائه شده توسط تامی و ساکینو [29] مقدار β_e به صورت زیر می‌باشد:

$$\beta_e = \begin{cases} 1.0 & \frac{B_s}{t} \leq 24 \\ 1.5 - \frac{1}{48} \frac{B_s}{t} & 24 < \frac{B_s}{t} \leq 48 \\ 0.5 & \frac{B_s}{t} > 48 \end{cases} \quad (26)$$

۳-۳- نوع المان و مش بندی

برای مدل‌سازی ستون‌های دوجداره فولادی پر شده با بتن، هسته بتنی و جداره فولادی از در نرم افزار، از المان Continuum یا Solid شش وجهی هشت گرهی، دارای سه درجه آزادی انتقالی در هر گره با روش انتگرال گیری کامل خطی که در نرم افزار ABAQUS با 8DR3C نشان داده می‌شود، استفاده شد [30، 31، 32]. این المان در هر گره دارای سه درجه آزادی جابجایی در جهت محورهای X، Y و Z است. این المان برای آنالیزهای خطی، غیر خطی پیچیده، مسائل تماسی و پلاستیسیته‌ی همراه با تغییر شکل‌های بزرگ مناسب می‌باشد [33]. در المان‌های سه بعدی Solid می‌توان خصوصیات مصالح را در چندین لایه با مقادیر متفاوت و در جهت‌های مختلف اعمال کرد. در این برنامه تمام المان‌های Solid اثرات کرنش محدود را در نظر می‌گیرند. مفهوم کرنش محدود آن است که ماده رفتار غیر الاستیک داشته باشد. در تمام موارد المان‌های Solid این توانایی را دارند که میزان تنش را به طور دقیق تعیین کنند.

همچنین در این المان‌ها مولفه‌های تنش- کرنش بر حسب جهات محورهای اصلی تعیین می‌شوند؛ به جز در مواردی که برای المان محورهای محلی تعریف شده باشد [۳۴]. در تحقیق حاضر برای تعیین مش بندی مناسب، حساسیت مش بندی مورد مطالعه قرار گرفت [۳۵، ۳۶، ۳۷]. حداکثر اندازه مش بندی برای ستون‌ها، ۲۰ mm انتخاب شد (شکل ۸).



شکل ۸: نحوه مش بندی کردن یک نمونه ستون CFDST

۳-۴- مدل اندرکنش بین فولاد و بتن

اندرکنشی که در مدل ABAQUS استفاده می‌شود، اندرکنش سطح به سطح است. هر مدل نیاز به دو اندرکنش دارد. اولین تماس بین لوله بیرونی و بخش بتنی بود که در آن قسمت داخلی لوله خارجی سطح اصلی بود و قسمت خارجی بتن سطح پیرو بود [۳۸]. با در نظر گرفتن تماس سخت، نفوذ سطح بتن به سطح فولاد در محل‌های مقید شده به حداقل می‌رسد و اجازه انتقال تنش کششی را در طول بخش اندرکنش نمی‌دهد. از سوی دیگر تماس بین فولاد و بتن صفحه به صفحه در نظر گرفته شده است. در این بخش از مدل اصطکاکی کلمب استفاده شده است که تنش برشی بحرانی را از رابطه $\tau_{crit} = \mu P$ تعیین می‌کند که در این معادله μ ضریب اصطکاک و P فشار تماسی است. ضریب اصطکاک در نظر گرفته شده بین فولاد و بتن ۰/۳ می‌باشد [۳۹].

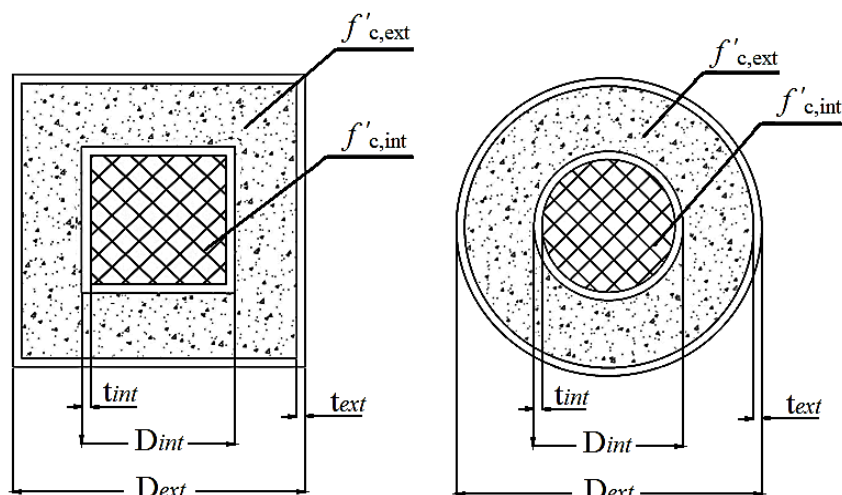
۳-۵- شرایط مرزی

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 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 می‌کند که بار به طور یکنواخت روی سطح مقطع بالای ستون مرکب بارگذاری شده محوری توزیع شود.

۴- بررسی رفتار ستون‌های مرکب دو لایه

۴-۱- معرفی نمونه

در مطالعه حاضر، در مجموع بیست نمونه ستون دوجداره فولادی پر شده با بتن (CFDST)، با دو مقطع دایره (CHS-CHS) و مربع (SHS-SHS) تحت بار محوری، توسط نرم افزار اجزای محدود مدل سازی شده است. تا اثر شکل هندسی مقاطع، مقاومت فشاری بتن و اثر عرض به ضخامت (D/t) در این ستون‌ها تحت نیروی محوری بررسی گردد. همچنین نمونه‌ها را به دو سری تقسیم کردیم که، تا بتوانیم ستون‌های با جداره داخلی بزرگ‌تر را با ستون‌های جداره داخلی کوچک‌تر را مقایسه کنیم، در شکل ۹ نمای شماتیک سطح مقطع ستون‌های طراحی شده نشان داده شده است.



شکل ۹: نمای شماتیک سطح مقطع ستون ها

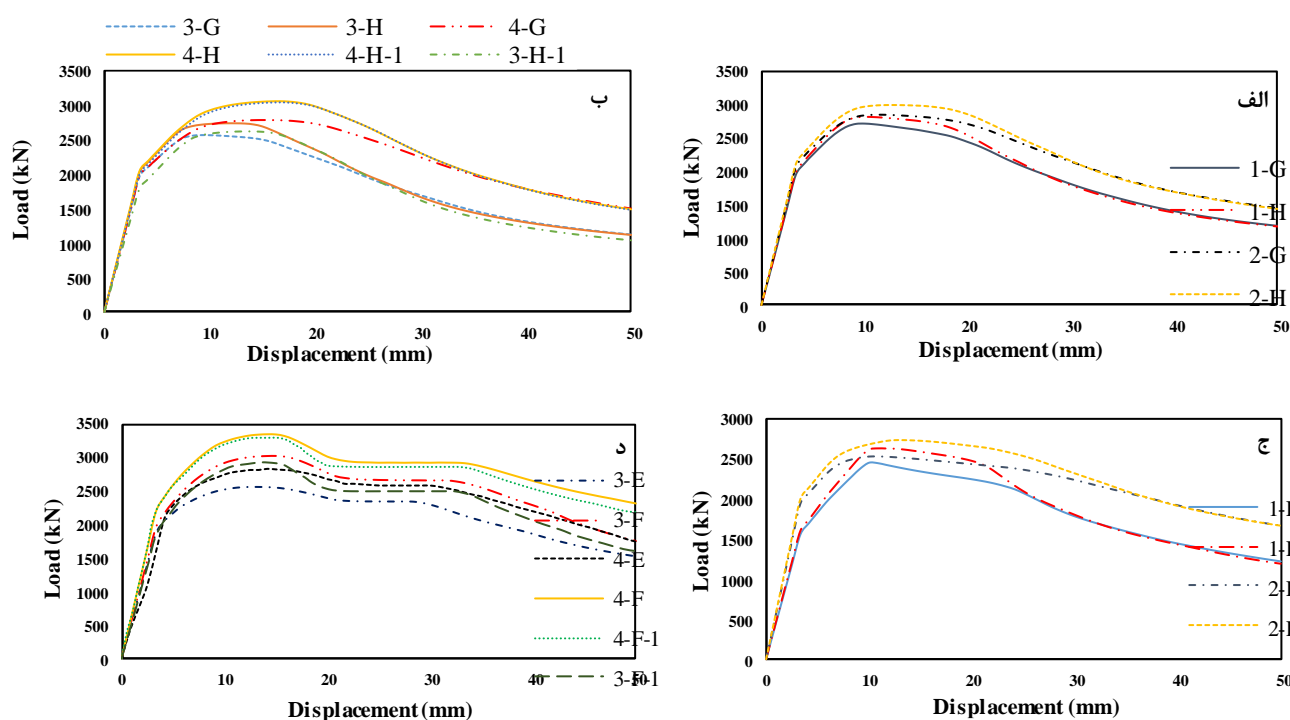
جدول ۳ مشخصات نمونه ها را نشان می دهد. در این جدول، D_{ext} و t_{ext} به ترتیب عرض و ضخامت لوله بیرونی، D_{int} و t_{int} به ترتیب عرض و ضخامت لوله داخلی، $f'_{c,ext}$ و $f'_{c,int}$ به ترتیب بتن خارجی و بتن داخلی، L_{int} طول ستون در جداره‌ی داخلی و L_{ext} طول ستون در جداره‌ی خارجی می باشد.

جدول ۳: جزئیات مشخصات نمونه‌ها

شناسه	نمونه ستون	جداره خارجی				جداره داخلی				
		D_{ext} (mm)	t_{ext} (mm)	$f'_{c,ext}$ (MPa)	L_{ext} (mm)	D_{int} (mm)	t_{int} (mm)	$f'_{c,int}$ (MPa)	L_{int} (mm)	
سری اول مربع	1-E	S200-3-30-S100-6-40	۲۰۰	۳	۳۰	۳۰۰۰	۱۰۰	۶	۴۰	۳۰۰۰
	1-F	S200-3-30-S100-6-80	۲۰۰	۳	۳۰	۳۰۰۰	۱۰۰	۶	۸۰	۳۰۰۰
	2-E	S200-6-30-S100-3-40	۲۰۰	۶	۳۰	۳۰۰۰	۱۰۰	۳	۴۰	۳۰۰۰
	2-F	S200-6-30-S100-3-80	۲۰۰	۶	۳۰	۳۰۰۰	۱۰۰	۳	۸۰	۳۰۰۰
سری اول دایره	1-G	C220-3-30-C110-6-40	۲۲۰	۳	۳۰	۳۰۰۰	۱۱۰	۶	۴۰	۳۰۰۰
	1-H	C220-3-30-C110-6-80	۲۲۰	۳	۳۰	۳۰۰۰	۱۱۰	۶	۸۰	۳۰۰۰
	2-G	C220-6-30-C110-3-40	۲۲۰	۶	۳۰	۳۰۰۰	۱۱۰	۳	۴۰	۳۰۰۰
	2-H	C220-6-30-C110-3-80	۲۲۰	۶	۳۰	۳۰۰۰	۱۱۰	۳	۸۰	۳۰۰۰
سری دوم مربع	3-E	S200-3-30-S120-6-40	۲۰۰	۳	۳۰	۳۰۰۰	۱۲۰	۶	۱۰	۳۰۰۰
	3-F	S200-3-30-S120-6-80	۲۰۰	۳	۳۰	۳۰۰۰	۱۲۰	۶	۸۰	۳۰۰۰
	4-E	S200-6-30-S120-3-40	۲۰۰	۶	۳۰	۳۰۰۰	۱۲۰	۳	۴۰	۳۰۰۰
	4-F	S200-6-30-S120-3-80	۲۰۰	۶	۳۰	۳۰۰۰	۱۲۰	۳	۸۰	۳۰۰۰
	3-F-1	S200-3-30-S120-5-80	۲۰۰	۳	۳۰	۳۰۰۰	۱۲۰	۵	۸۰	۳۰۰۰
	4-F-1	S200-3-30-S120-2.5-80	۲۰۰	۳	۳۰	۳۰۰۰	۱۲۰	۲/۵	۸۰	۳۰۰۰
سری دوم دایره	3-G	C220-3-30-C132-6-40	۲۲۰	۳	۳۰	۳۰۰۰	۱۳۲	۶	۴۰	۳۰۰۰
	3-H	C220-3-30-C132-6-80	۲۲۰	۳	۳۰	۳۰۰۰	۱۳۲	۶	۸۰	۳۰۰۰
	4-G	C220-6-30-C132-3-40	۲۰۰	۶	۳۰	۳۰۰۰	۱۳۲	۳	۴۰	۳۰۰۰
	4-H	C220-6-30-C132-3-80	۲۲۰	۶	۳۰	۳۰۰۰	۱۳۲	۳	۸۰	۳۰۰۰
	3-H-1	C220-3-30-C132-5-80	۲۲۰	۳	۳۰	۳۰۰۰	۱۳۲	۵	۸۰	۳۰۰۰
	4-H-1	C220-3-30-C132-2.5-80	۲۲۰	۳	۳۰	۳۰۰۰	۱۳۲	۲/۵	۸۰	۳۰۰۰

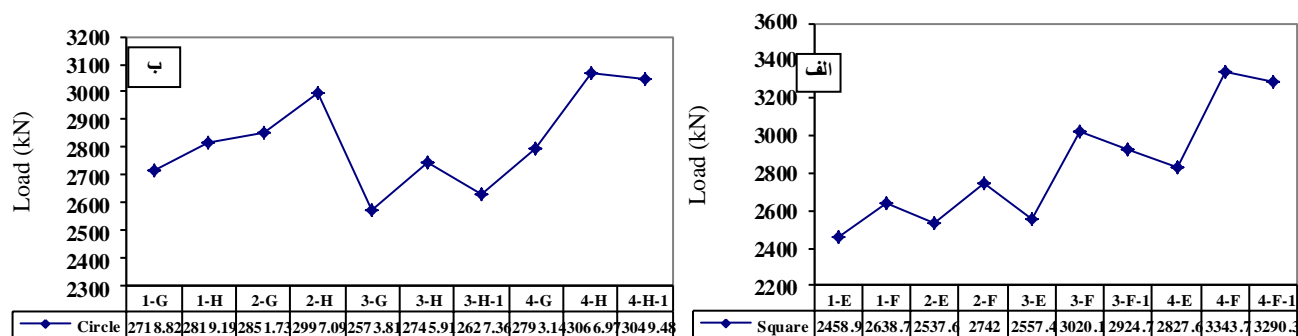
۲-۴- ظرفیت بار محوری

شکل ۱۰، منحنی بار-جابجایی ستون‌های مدل‌سازی شده را به نمایش می‌گذارد. در ایده آل‌ترین حالت ستون مرکب 4-F با جداره بیرونی ۶mm و جداره داخلی ۳mm با نیروی محوری ۳۳۴۳/۶۶kN دارای بالاترین ظرفیت باربری نسبت به ستون‌های دیگر می‌باشد. شکل ۱۰ نشان می‌دهد که ستون‌های با مقطع دایره‌ای رفتار بهتری نسبت به ستون‌های با مقطع مربعی داشتند و مقاطع دایره‌ای کمترین ظرفیت باربری را داشتند. همچنین با توجه به شکل ۱۰، ستون 2-E دارای شکل‌پذیری بیشتری نسبت به دیگر ستون‌ها داشته است. همچنین در نمونه‌های سری اول، ستون‌های مربعی حدوداً ۲٪ ظرفیت باربری کمتری را نسبت به ستون‌های دایره‌ای تحمل کردند. در نمونه‌های سری دوم، ستون‌های دایره‌ای حدوداً ۱۰٪ ظرفیت باربری بیشتری را نسبت به ستون‌های مربعی تحمل همچنین نمونه 2-F در سری اول و نمونه 4-F در سری دوم مقدار انرژی بیشتری را داشتند.



شکل ۱۰: منحنی بار - جابجایی ستون‌های CFDST

دلیل کاهش مقاطع دایره‌ای این می‌باشد که سطح مقطع بتن در جداره خارجی کمتر می‌شود و بار وارد شده روی نمونه بلافاصله با توجه به این که جداره داخلی تحت اثر فشار محوری به سمت بیرون فشار می‌آورد، که باعث خرد شدن بتن می‌شود و اثر محصورشدگی توسط لوله‌های فولادی نمی‌تواند به طور کامل ایجاد شوند. همچنین دلیل افزایش مقاطع مربعی این می‌باشد که در مقاطع مربع، محصورشدگی در گوشه‌های مقطع مربع بیشتر اتفاق می‌افتد. جدول ۴ نتایج نمونه‌ها و شکل ۱۱ ظرفیت باربری را نشان می‌دهد.



شکل ۱۱: نمودار ظرفیت باربری ستون‌ها

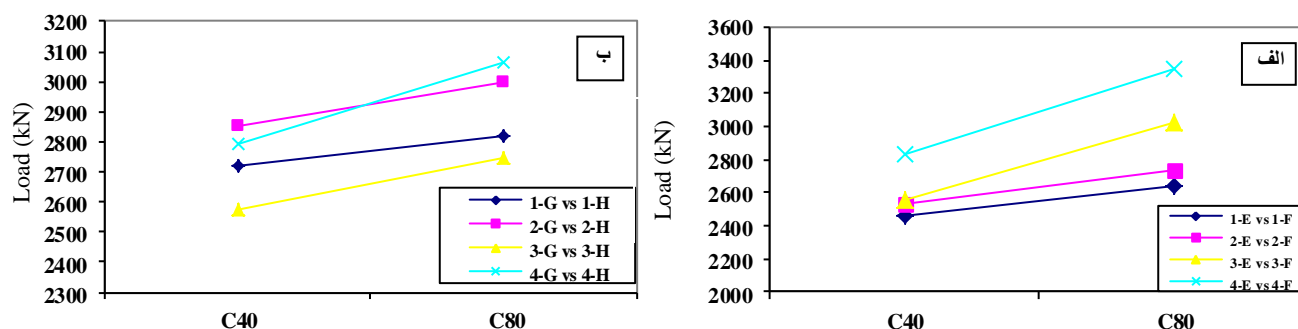
جدول ۴: نتایج نمونه‌های مدل‌سازی شده

شناسه	نمونه‌های ستون	D/t	Δ (mm)	P _{max} (kN)	P/P _{max}	(/)*	E (J)	نسبت انرژی	(/)**	
مربعی	1-E	S200-3-30-S100-6-40	۶۶/۶	۲۵/۸۹	۲۴۵۸/۹۲	۰/۸۹	۵/۴۲	۹۳۴۸۹/۳۶	۰/۸۴	۸/۸۸
	1-F	S200-3-30-S100-6-80	۶۶/۶	۲۱/۴۶	۲۶۳۸/۷۴	۰/۹۶	۱/۹۱	۹۷۱۱۸/۴۱	۰/۸۷	۶/۶۹
	2-E	S200-6-30-S100-3-40	۳۳/۳	۱۷/۵۶	۲۵۳۷/۵۶	۰/۹۲	۳/۸۷	۱۰۶۲۰۳/۹۴	۰/۹۵	۲/۲۳
	2-F	S200-6-30-S100-3-80	۳۳/۳	۱۱/۵۳	۲۷۴۱/۹۷	۱	۰	۱۱۱۰۵۵/۸۰	۱	۰
	3-E	S200-3-30-S120-6-40	۶۶/۶	۲۰/۳۵	۲۵۵۷/۴۲	۰/۹۳	۳/۴۸	۱۰۴۳۰۰/۵۱	۰/۹۴	۳/۱۳
	3-F	S200-3-30-S120-6-80	۶۶/۶	۱۵/۶۲	۳۰۲۰/۰۸	۱/۱۰	-۴/۸۲	۱۲۱۶۷۵/۳۶	۱/۰۹	-۴/۵۶
	4-E	S200-6-30-S120-3-40	۳۳/۳	۱۲/۰۴	۲۸۲۷/۶۱	۱/۰۳	-۱/۵۳	۱۱۸۷۵۷/۲۰	۱/۰۶	-۳/۳۵
	4-F	S200-6-30-S120-3-80	۳۳/۳	۶/۶۲	۳۳۴۳/۶۶	۱/۲۱	-۹/۸۸	۱۳۷۳۲۲/۸۰	۱/۲۳	-۱۰/۵۷
	3-F-1	S200-3-30-S120-5-80	۶۶/۶	۱۷/۱۵	۲۹۲۴/۶۶	۱/۰۶	-۳/۲۲	۱۱۳۷۱۸/۶۵	۰/۹۷	-۱/۱۸
	4-F-1	S200-3-30-S120-2.5-80	۶۶/۶	۷/۴۱	۳۲۹۰/۲۸	۱/۲۰	-۹/۰۹	۱۳۳۶۹۲/۶۹	۰/۸۳	-۹/۲۵
دایره‌ای	1-G	C220-3-30-C110-6-40	۷۲/۳	۱۵/۸۸	۲۷۱۸/۸۲	۰/۹۰	۲/۳۸	۹۵۶۲۶/۳۱	۰/۸۹	۵/۹۰
	1-H	C220-3-30-C110-6-80	۷۲/۳	۱۰/۸۵	۲۸۱۹/۱۹	۰/۹۴	۰/۵۷	۹۷۲۹۵/۰۱	۰/۹۰	۵/۰۴
	2-G	C220-6-30-C110-3-40	۳۶/۳	۱۲/۶۵	۲۸۵۱/۷۲	۱	۰	۱۰۷۶۲۶/۱۳	۱	۰
	2-H	C220-6-30-C110-3-80	۳۶/۳	۶/۵۸	۲۹۹۷/۰۹	۱/۰۵	-۲/۴۸	۱۱۰۴۳۷/۷۷	۱/۰۲	-۱/۳۰
	3-G	C220-3-30-C132-6-40	۷۲/۳	۱۳/۱۸	۲۵۷۳/۸۱	۰/۸۳	۵/۱۲	۹۰۵۲۵/۰۱	۰/۸۴	۸/۶۳
	3-H	C220-3-30-C132-6-80	۷۲/۳	۸/۹۶	۲۷۴۵/۹۱	۰/۸۹	۱/۸۹	۹۳۱۰۹/۵۹	۰/۸۶	۷/۲۳
	4-G	C220-6-30-C132-3-40	۳۶/۳	۱۰/۹۹	۲۷۹۳/۱۴	۰/۹۱	۱/۰۳	۱۰۸۷۷۷/۲۸	۱/۰۱	-۰/۵۳
	4-H	C220-6-30-C132-3-80	۳۶/۳	۴/۶۶	۳۰۶۶/۹۷	۱/۰۷	-۳/۶۳	۱۱۴۱۵۳/۶۹	۱/۰۶	-۲/۹۴
	3-H-1	C220-3-30-C132-5-80	۷۲/۳	۹/۳۶	۲۶۲۷/۳۶	۰/۹۲	۴/۰۹	۸۹۰۸۷/۵۸	۰/۸۲	۹/۴۲
	4-H-1	C220-3-30-C132-2.5-80	۷۲/۳	۵/۴۲	۳۰۴۹/۴۸	۱/۰۷	-۳/۳۵	۱۱۳۴۹۳/۷۹	۱/۰۵	-۲/۶۵

* درصد تغییر میزان ظرفیت باربری
** درصد تغییر میزان انرژی جذب شده

۴-۳- اثر مقاومت فشاری بتن بر روی ستون‌ها

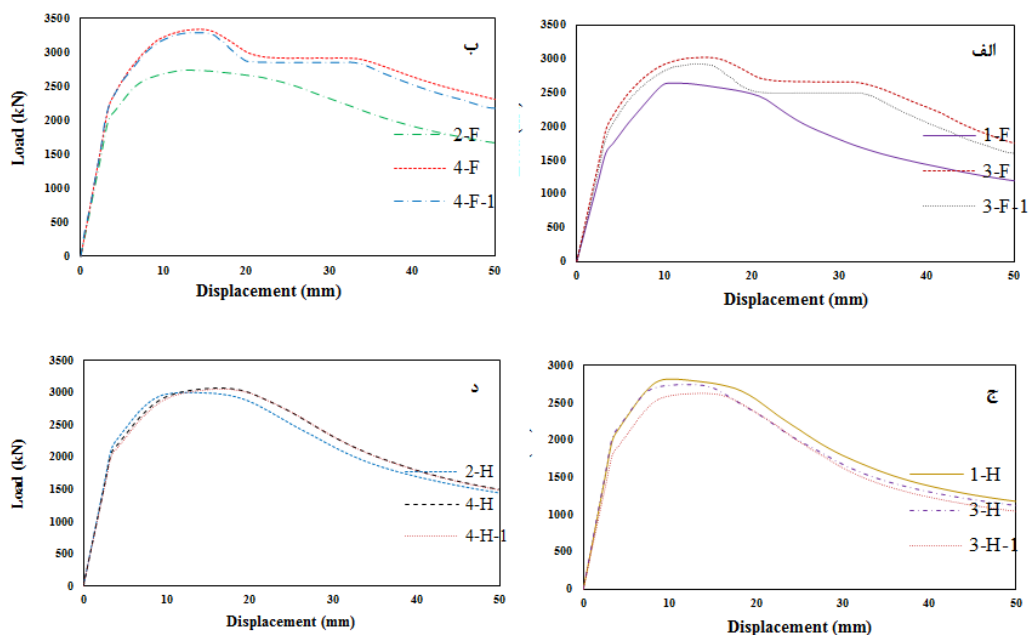
ستون‌های CFDST مدل‌سازی شده در نرم افزار اجزای محدود، با مقاومت فشاری ۴۰ و ۸۰ مگاپاسکال در جداره داخلی مورد بررسی قرار گرفتند. همان‌طور که در شکل ۱۲ نشان داده شده است با افزایش مقاومت فشاری بتن ظرفیت محوری ستون افزایش پیدا می‌کند. بطور کلی، مقاومت و سختی ستون‌های CFDST، با افزایش مقاومت بتن، افزایش پیدا می‌کنند. ستون‌های دارای بتن مقاومت بالاتر، در مرحله الاستیک، صلبیت الاستیک بیشتری دارد، زیرا مدول الاستیک اولیه بتن، با افزایش مقاومت بتن، زیاد می‌شود.



شکل ۱۲: مقایسه ظرفیت باربری ستون‌های CFDST

۴-۴- تاثیر افزایش مقطع بر روی ستون‌ها

به منظور بررسی تاثیر افزایش مقطع بر رفتار ستون‌های CFDST، ۱۲ نمونه را با هم مقایسه کردیم (شکل ۱۳). همچنین تمام مقاطع را به اندازه ۱۰٪ در جداره داخلی افزایش دادیم. در این مقایسه، مساحت نمونه‌های 3-F-1، 4-F-1، 3-H-1 و 4-H-1 را با نمونه‌های 1-F، 2-F، 1-H و 2-H برابر گرفته شد تا بتوانیم رفتار آن‌ها را با نمونه‌های 3-F، 4-F، 3-H و 4-H مقایسه کنیم. همان‌طور که در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود، افزایش مقطع داخلی نمونه 3-F باعث می‌شود که ظرفیت باربری حدوداً ۵٪ افزایش پیدا می‌کند. در نمونه 2-F افزایش مقطع داخلی باعث می‌شود که ظرفیت باربری حدوداً ۹٪ افزایش پیدا می‌کند. در نمونه 3-H با افزایش مقطع در جداره داخلی ظرفیت باربری حدوداً ۴٪ کاهش پیدا می‌کند، اما در نمونه 4-F ظرفیت باربری ۱/۵٪ افزایش پیدا می‌کند.

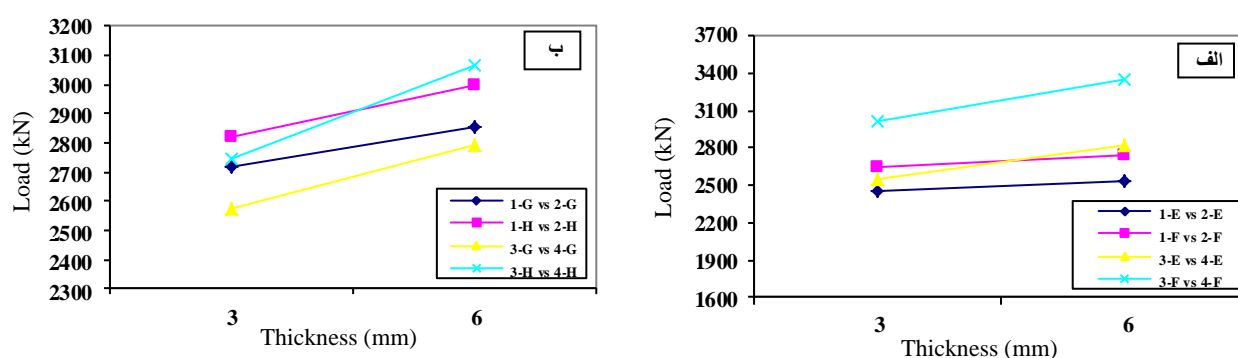


کل ۱۳: نمودار بار - جابجایی ستون‌های CFDST تحت اثر افزایش مقطع

۴-۶- اثر تغییر ضخامت بر روی ستون‌ها

برای بررسی تاثیر ضخامت فولاد بر روی نمونه‌ها از دو ضخامت ۳ و ۶ میلی متر برای نمونه‌ها استفاده شد. بنابراین، برای بررسی اثر ضخامت در جداره‌های فولادی نمونه‌ها، برای نمونه‌های 4-E, 4-G, 4-H, 4-F, 2-H, 2-G, 2-F, 2-E، ضخامت جداره خارجی ۶mm و ضخامت جداره داخلی ۳mm در نظر گرفته شد. همچنین، برای نمونه‌های 1-E, 1-F, 1-G, 1-H, 3-F, 3-H, 3-G و 3-E ضخامت جداره خارجی ۶mm و ضخامت جداره داخلی ۳mm در نظر گرفته شد.

شکل ۱۴ اثر ضخامت فولاد و نسبت (D/t) نمونه‌ها را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۱۴ با کاهش نسبت (D/t)، نیروی محوری افزایش می‌یابد، این اتفاق احتمالاً ناشی از این واقعیت است که سطح مقطع لوله بیرونی افزایش پیدا می‌کند. به این معنی که نمونه می‌تواند مقاومت در برابر بارهای بیشتر را داشته باشد.



شکل ۱۴: نمودار مقایسه

تغییرات بار بر حسب ضخامت

۵- نتیجه‌گیری

در مقاله حاضر به بررسی تاثیر مقاومت فشاری بتن در عملکرد محوری ستون‌های دوجداره فولادی پر شده با بتن CFDST پرداخته شده است. در ابتدای امر، تحقیقات قبلی مربوط به طراحی ستون‌های دوجداره فولادی پر شده با بتن CFDST بررسی شد. نرم افزار اجزای محدود ABAQUS 2016 برای انجام تحلیل غیرخطی استفاده شده و دقت مدل سازی عناصر محدود پیشنهادی با مقایسه نتایج تحلیلی و آزمایشگاهی مربوطه مشاهده شد. در این مقاله در مجموع به بررسی بیست نمونه با مقاطع دایره ای و مربعی با تغییر مقاومت فشاری در جداره داخلی، پرداخته شده است. نتایج کلی زیر می‌تواند بر اساس نتایج کار تحقیقاتی ارائه شده در این مقاله باشد:

۱- بررسی‌ها نشان دادند که دلیل خاصیت ترد و شکنندگی ناگهانی بتن در مقاومت‌های بالا، شکل‌پذیری نمونه‌های CFDST کاهش پیدا می‌کند، بنابراین نتایج نشان می‌دهد افزایش مقاومت بتن نمی‌تواند یک روش بسیار موثر برای بهبود عملکرد ستون‌های CFDST باشد.

۲- بررسی‌ها نشان دادند که افزایش هسته، در مقاطع دایره‌ای محصورشدگی کاهش می‌یابد ولی در مقاطع مربعی، محصورشدگی افزایش پیدا کرد، که این اتفاق ناشی از وجود گوشه در مقاطع چهار ضلعی نسبت به مقاطع دایره‌ای بوده است.

۳- بررسی‌ها نشان دادند که در نمونه‌های سری اول، ستون‌های مربعی حدود ۲٪ ظرفیت باربری کمتری را نسبت به ستون‌های دایره‌ای تحمل کردند و در نمونه‌های سری دوم، ستون‌های مربعی حدود ۱۰٪ ظرفیت باربری بیشتری را نسبت به ستون‌های دایره‌ای تحمل کردند. همچنین، بررسی‌ها نشان دادند در نمونه‌های سری اول، کماتش کلی ستون‌های با مقطع مربعی حدود ۲۳٪/۹۶ بیشتر از مقاطع دایره‌ای بود، و در نمونه‌های سری دوم، کماتش کلی ستون‌های با مقطع مربعی حدود ۲۱٪/۱۴ بیشتر از با مقاطع دایره‌ای بود.

- ۴- بررسی‌ها نشان دادند که نسبت عرض به ضخامت (D/t) اثر معکوس بر روی ظرفیت باربری این نوع ستون‌ها دارد، یعنی با افزایش نسبت عرض به ضخامت ظرفیت باربری در مقاطع دایره‌ای حدود ۵٪ و در مقاطع مربعی حدود ۱۰٪ کاهش یافت.
- ۵- بررسی‌ها نشان داد که با افزایش مقطع در ستون‌های دایره‌ای انرژی حدود ۳٪ کاهش و ستون‌های مربعی حدود ۵٪ افزایش می‌یابد.
- ۶- بررسی‌ها نشان دادند با توجه به این موضوع که مربع حدود ۷٪ فولاد بیشتر از ستون‌های دایره‌ای مصرف کرده و حدود ۱۰٪ افزایش باربری داشته است، و همچنین ستون‌های دایره‌ای کمانش و رفتار بهتری را نسبت به ستون‌های مربعی از خود نشان دادند، پس می‌توان نتیجه گرفت نسبت به مصالح مصرفی، ستون‌های دایره‌ای دارای هزینه ساخت کمتری می‌باشد.
- ۷- بررسی‌ها نشان دادند که در مقاطع مربع با افزایش مقطع در جداره داخلی به اندازه ۱۰٪، ظرفیت باربری در حدود ۷٪ افزایش می‌یابد و در مقاطع دایره‌ای با افزایش مقطع در جداره داخلی به اندازه ۱۰٪، ظرفیت باربری در حدود ۳٪ کاهش می‌یابد.
- ۸- بررسی‌ها نشان دادند که محصورشدگی بتن یکی از مهمترین ویژگی‌های این نوع ستون‌ها می‌باشد که عدم در نظر گرفتن این موضوع به پاسخ‌هایی به مراتب کمتر از ظرفیت واقعی این ستون‌ها منتج خواهد شد.
- ۹- بررسی‌ها نشان داد که تغییرات در ضخامت خارجی از اهمیت بیشتری برخوردار می‌باشد، زیرا با افزایش ضخامت در جداره خارجی باعث افزایش ظرفیت باربری ستون‌ها می‌شود که سبب افزایش اثر محصورشدگی می‌شود.

مراجع

- [1] Li, W., Wang, T. and Han, L-H. (2019). Seismic performance of concrete-filled double-skin steel tubes after exposure to fire: Experiments, Vol. 154, pp. 209–223. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2018.12.003>
- [2] Ho, J.C.M. and Dong, C.X. (2014). "Improving strength, stiffness and ductility of CFDST columns by external confinement, Thin-Walled Structures, Vol. 75, pp.18–290. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2013.10.009>
- [3] Subramoni, P.T. and Saratha, J.P. (2018) Behaviour of Beam-Column Subjected to Reversed Lateral Loading, KSCE Journal of Civil Engineering, Vol. 22, NO. 7, pp. 2464–2468. <https://doi.org/10.1007/s12205-017-2023-6>
- [4] Tao, Z., Han, L.H. and Zhao, X.L. (2004). Behavior of concrete-filled double skin (CHS inner and CHS outer) steel tubular stub columns and beam-columns, Journal of Constructional Steel Research, Vol. 60, NO. 8 pp. 1129-1158. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2003.11.008>
- [5] Zhao, X.L., Han, B. and Grzebieta, R.H. (2002). Plastic mechanism analysis of concrete-filled double skin (SHS inner and SHS outer) stub columns, Thin Walled Structures, Vol. 40, NO. 10. pp. 815 - 833. [https://doi.org/10.1016/S0263-8231\(02\)00030-7](https://doi.org/10.1016/S0263-8231(02)00030-7)
- [6] Han, L.H., Li, Y.J. and Liao, F.Y. (2011). Concrete-filled double skin steel tubular (CFDST) columns subjected to long-term sustained loading, Thin Walled Structures, Vol. 49, NO. 12, pp. 1534-1543. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2011.08.001>
- [7] Essopjee, Y. and Dundu, M. (2015). Performance of concrete-filled double-skin circular tubes in compression, Composite Structures, Vol. 133, pp. 1276–83. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.08.033>
- [8] Romero, M.L., Espinos, A., Portolés, J.M., Hospitaler, A. and Ibañez, C. (2015). Slender double-tube ultra-high strength concrete-filled tubular columns under ambient temperature and fire". Engineering Structures, Vol. 99, pp.536–45. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2015.05.026>
- [9] Ibañez, C., Romero, M. L., Espinos, A., Portolés, J.M. and Alberó, V. (2017). Ultra-high strength concrete on eccentrically loaded slender circular concrete-filled dual steel columns, Structures, Vol. 12, pp. 64-74. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2017.07.005>
- [10] Ekmekyapar, T. and Hasan, H.G. (2019). The influence of the inner steel tube on the compression behaviour of the concrete filled double skin steel tube (CFDST) columns, Marine Structures, Vol. 66, pp. 197–212. <https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2019.04.006>

- [11] Romero, M.L., Ibañez, C., Espinos, A., Portolés, J.M. and Hospitaler, A. (2017). Influence of Ultra-High Strength Concrete on Circular Concrete-filled Dual Steel Columns, Structures, Vol. 9, pp. 13-20. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2016.07.001>
- [12] Sulthana, U.M. and Jayachandran, S.A. (2017). Axial Compression Behaviour of Long Concrete Filled Double Skinned Steel Tubular Columns, Structures, Vol. 9, pp. 157-164. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2016.12.002>
- [13] Elchalakani, M., Patel, V.I., Karrech, A., Hassanein, M.F., Fawzia, S., and Yang, B. (2019). Finite element simulation of circular short CFDST columns under axial compression, Structures, Vol. 20, pp. 607-619. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2019.06.004>
- [14] AISC: American Institute of Steel Construction. (2010). Specification for Structural Steel Buildings, ANSI/AISC 360-10.
- [15] Khalili, A., Kheyroddin, A., Sharbatdar, M.K. and Farahani, A. (2016). Study on the Nonlinear Behavior of Strengthened RC Frames using Steel Prop and Curb in Connections and Strengthening of Beam and Column. Modelling in journal Engineering, Volume 14, Issue 46, Page 25-38. (In Persia) <http://dx.doi.org/10.22075/jme.2017.1773>
- [16] Lotfollahi Yaghin, M.A. and Ziyaeioun, M. (2013). Analytical Study of Concrete-Filled Double Skin Steel Tubular Columns Under Interaction of Bending Moment and Axial Load. Modelling in journal Engineering, Volume 10, Issue 31, Page 15-23. (In Persia) <http://dx.doi.org/10.22075/jme.2017.1627>
- [17] Xiong, M-X., Xiong, D-X. and Richard Liew, J.Y. (2017). Axial performance of short concrete filled steel tubes with high and ultra-high-strength materials. Engineering Structures, Vol. 136, pp. 494-510. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.01.037>
- [18] Pagoulatou, M., Sheehan, T., Dai, X.H. and Lam, D. (2014). Investigation The Behavior and Comparison of Reliable Codes on Concrete-Steel Composite Columns, Engineering Structures, Vol. 72, pp. 102-112. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.04.039>
- [19] Zhang, Y-B., Han, L-H. and Li, W. (2017). Analytical behaviour of tapered CFDST stub columns under axially partial compression, Journal of Constructional Steel Research, Vol. 139, pp. 302-314. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2017.09.023>
- [20] 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) <http://dx.doi.org/10.22075/jme.2017.1566>
- [21] Liang, Q.Q. and Fragomeni, S. (2009). Nonlinear Analysis of Circular Concrete-Filled Steel Tubular Short Columns under Axial Loading, Journal of Constructional Steel Research, Vol. 65, NO. 12, pp. 2186-2196. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2009.06.015>
- [22] Hassanein, M.F. and Patel, V.I. (2018). Round-Ended Rectangular Concrete-Filled Steel Tubular Short Columns: FE Investigation Under Axial Compression, Journal of Constructional Steel Research, Vol. 140, pp. 222-236. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2017.10.030>
- [23] Mander, J.B., Priestley, M.J.N. and Park, R. (1988). Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete, Journal of structural Engineering, ASCE, Vol. 114, NO. 8, pp. 1804-1826. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1988\)114:8\(1804\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1988)114:8(1804))
- [24] American Concrete Institute, (2011). Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-11) and Commentary.
- [25] Liang, Q.Q. (2009). Performance-Based Analysis of Concrete-Filled Steel Tubular Beam-Columns, Part I: Theory and Algorithms, Journal of Constructional Steel Research, Vol. 65, pp. 363-372. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2008.03.007>
- [26] Richart, F.E., Brandtzaeg, A. and Brown, R.L. (1928). A study of the failure of concrete under combined compressive stresses, Bull 185, Champaign (III): University of Illinois, Engineering Experimental Station; Vol. 185. <http://hdl.handle.net/2142/4277>
- [27] Hu, H.T., Huang, C.S., Wu, M.H. and Wu, Y.M. (2003). Nonlinear Analysis of Axially Loaded Concrete-Filled Tube Columns with Confinement Effect, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 129, NO. 10, pp. 1322-1329. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2003\)129:10\(1322\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2003)129:10(1322))

- [28] Tang, J., Hino, S., Kuroda, I. and Ohta, T. (1996). Modeling of stress-strain relationships for steel and concrete in concrete filled circular steel tubular columns. *Steel Construction Engineering, JSSC*, Vol. 3 NO. 11, pp. 35-46. https://doi.org/10.11273/jssc1994.3.11_35
- [29] Tomii, M. and Sakino, K. (1979). Elastic-Plastic Behavior of Concrete Filled Square Steel Tubular Beam-Columns, *Transactions of the Architectural Institute of Japan*, Vol. 280, pp. 111-120.
- [30] Yao, Y., Liu, M. and Guo, H. (2019). Concrete filled double skin steel tubular columns subjected to non-uniform heating. *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 158, pp. 263–278. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2019.03.035>
- [31] Alhalaby, M. and Wanga, Y. (2017). Second-order effects of cantilever concrete filled double skin tube (CFDST) transmission towers, Copenhagen, Denmark, Vol. 1, pp. 4390-4399. <https://doi.org/10.1002/cepa.498>
- [32] Wang, F-C., and Han, L-H. (2019). Analytical behavior of carbon steel-concrete-stainless steel double skin tube (DST) used in submarine pipeline structure, *Marine Structures*, Vol. 63, pp. 99–116. <https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2018.09.001>
- [33] 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)
- [34] Schneider, S.P. Alostaz, Y.M. (1998). Experimental Behavior of Connections to Concrete-filled Steel Tubes, *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 45, NO. 3, pp. 321-352. [https://doi.org/10.1016/S0143-974X\(97\)00071-0](https://doi.org/10.1016/S0143-974X(97)00071-0)
- [35] Hassanein, M.F., Elchalakani, Karrech, M.A., Patel, V.I. and Yang, B. (2018). "Behaviour of Concrete-filled Double-skin Short Columns Under Compression Through Finite Element Modelling: SHS Outer and SHS Inner Tubes", *Structures*, Vol. 14, pp. 358-375. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2018.04.006>
- [36] Pons, D., Espinós, A., Albero, V. and Romero, M.L. (2018). Numerical study on axially loaded ultra-high strength concrete-filled dual steel columns, *Steel and Composite Structures*, Vol. 26, NO. 6, pp. 705-717. <https://doi.org/10.12989/scs.2018.26.6.705>
- [37] Hassanein, M.F., Elchalakani, M. Patel, V.I. (2017). Overall buckling behaviour of circular concrete-filled dual steel tubular columns with stainless steel external tubes, *Thin-Walled Structures*, Vol. 115, pp. 336-348. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2017.01.035>
- [38] Pagoulatou, M., Sheehan, T., Dai, X.H. and Lam, D. (2014). Finite element analysis on the capacity of circular concrete-filled double-skin steel tubular (CFDST) stub columns. *Engineering Structures*, Vol. 72, NO. 1, pp. 102–12. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.04.039>
- [39] Johansont, M. and Gylltoft, K. (2001). Structural behavior of slender circular steel-concrete composite columns under various means of load application. *Steel and Composite Structures*, Vol. 1, pp. 393-410. <https://doi.org/10.12989/scs.2001.1.4.393>