



Journal of Structural and Construction Engineering

www.jsce.ir



Numerical analysis of concrete-filled double skin tubular slender columns with internal circular and external hexagonal tubes

M. Naghipour^{1*}, M. Mahdavi, Sh², S. M. Ebrahimzadeh S.³

1- Professor, Civil Eng Dept, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

2- Msc, Civil Eng Dept, Shomal University, Amol, Iran

3- Civil Eng Dept Babol Noshirvani university of Technology

ABSTRACT

A new kind of double skin CFT has more benefits in construction of bridge and especial buildings due to easily multi beam connections for central columns. In this study 27 double skin specimens filled with concrete, consist of internal circular tube and external hexagonal tubes have been studied using ABAQUSE finite element software. The effects of some parameters on behavior of CFT consists of: height of column, width to thickness ratio of external steel tube, diameter to thickness of internal tube and eccentricity were considered. Loading was applied as an axially compression in a displacement control state. The results show that whenever the eccentricity is matched through gap of two skins, the concrete confinement does not reduce, which is not the same as some codes of practice recommendations. The increase on strength of column depends on height, eccentricity and width to thickness ratio of external tube. The strength reduction of columns is up to 15% when height increases 50%. When the diameter to thickness, eccentricity and height of specimens remain constant, it was considered through the results that, the effects of width to thickness ratio of models is more significant than other parameters. The results also show that, when the height is constant and the width to thickness of external tube increases some outward foldings on columns were existe

ARTICLE INFO

Receive Date: 11 December 2018

Revise Date: 17 April 2019

Accept Date: 23 April 2019

Keywords:

Double skin CFT
Hexagonal tube
Confinement effect
Ultimate Capacity
Numerical Modeling

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/JSCE.2019.160790.1732

*Corresponding author: Morteza Naghipour
Email address: m-naghi@nit.ac.ir

مدلسازی و بررسی رفتار ستونهای مرکب فولادی بتنی دوجداره با جداره داخلی

دایره ای و جداره خارجی شش ضلعی

مرتضی نقی پور^{۱*}، سیده مائده مهدوی شلمانی^۲، صالح محمد ابراهیم زاده سپاسگزار^۳

۱-استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران

۲-کارشناس ارشد مهندسی سازه، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شمال، آمل، ایران

۳-دانشجوی دکتری مهندسی سازه، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران

چکیده

نوع جدیدی از ستونهای پر شده با بتن به صورت دوجداره مزیت‌های بهتری در ساخت پایه های پل و ساختمانهای خاص از جمله چگونگی اتصال چندین تیر (حداکثر ۶ تیر) به ستون مورد نظر واقع در مرکز ساختمان دارد. در این پژوهش به شبیه‌سازی ۲۷ نمونه ستون مرکب دوجداره فولادی با جداره داخلی دایره‌ای و جداره خارجی شش ضلعی، به روش اجزای محدود و به کمک نرم افزار آباکوس پرداخته شده است. اثر تعدادی از پارامترهای موثر در رفتار ستون‌های مرکب شامل: ارتفاع ستون، نسبت بعد به ضخامت جداره فولادی خارجی، نسبت قطر به ضخامت جداره فولادی داخلی و برون محوری در نظر گرفته شد. بارگذاری اعمالی به هر یک از نمونه‌ها به صورت محوری فشاری و به صورت کنترل جابجایی انجام گرفت. نتایج حاصل شده از پارامترهای مورد بررسی نشان داد که با وجود اینکه در آیین‌نامه‌های مختلف وقتی که نسبت برون محوری به قطر افزایش می‌یابد از میزان محصور شدگی کم می‌گردد، اما در مقاطع دولایه زمانی که این محدوده در بین فضای دو لوله قرار گیرد به دلیل فشار لوله داخلی به بتن، میزان محصور شدگی را حفظ می‌کند. همچنین درصد افزایش مقاومت سازه وابسته به ارتفاع سازه و برون محوری و نسبت بعد به ضخامت خارجی می‌باشد. میزان کاهش مقاومت نهایی محوری سازه با افزایش نسبی ۵۰ درصدی در ارتفاع ستون و نسبت قطر به ضخامت ثابت، کاهش بین ۱ تا ۱۵ درصد را به همراه دارد. با ثابت ماندن نسبت قطر به ضخامت داخلی و برون محوری و ارتفاع، تاثیر نسبت بعد به ضخامت خارجی بسیار بیشتر از سه پارامتر دیگر می‌باشد. با ثابت ماندن ارتفاع و افزایش نسبت بعد به ضخامت خارجی مود چروک شدگی نیز در ستون دولایه ایجاد شده است.

کلمات کلیدی: ستون دوجداره مرکب، جداره فولادی شش ضلعی، اثر محصورشدگی، ظرفیت باربری نهایی، مدلسازی عددی

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	10.22065/JSCE.2019.160790.1732	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2019.160790.1732	۱۴۰۰/۰۲/۳۰	۱۳۹۸/۰۲/۰۳	۱۳۹۸/۰۲/۰۳	۱۳۹۸/۰۱/۲۸	۱۳۹۷/۰۹/۳۰
				مرتضی نقی پور	*نویسنده مسئول:	
				m-naghi@nit.ac.ir	پست الکترونیکی:	

۱- مقدمه

ستون‌های دو جداره فولادی پر شده با بتن CFDST شامل دو جداره هم مرکز و بتن پر شده بین آن‌ها و یک فضای خالی در مرکز آن‌ها است. مقاطع دو جداره فولادی را می‌توان با یکدیگر متفاوت یا مشابه در نظر گرفت؛ به عنوان مثال دایره‌ای-دایره‌ای، دایره‌ای-مربعی و ... که با توجه به اهداف ساخت و ساز از ترکیب‌های مختلف استفاده می‌شود. مقطع خارجی با شکل هندسی شش ضلعی در ستون‌های مرکب دو جداره به دلیل نیازهای معماری، اجرای بهتر اتصالات و محصورشدگی بهتر نسبت به ستون‌های مربعی اهمیت و کاربرد بالاتری دارد. ستون‌های دوجداره پر شده با بتن متعلق به خانواده‌ی ستون‌های مرکب هستند و از بهترین کیفیت فولاد و بتن بهره برده‌اند. این ستون‌ها همان رفتار ستون‌های تک جداره اما با وزن کمتر و استحکام بالاتر را دارند. همچنین در مورد ظرفیت و شکل پذیری عملکرد بهتری را از خود نشان می‌دهند. برخی مزایای ستون‌های مرکب شامل: سرعت ساخت، عدم نیاز به قالب‌بندی برای بتن‌ریزی، حمل و مونتاژ سریع، حفاظت سطح بتن از آسیب، کاهش هزینه‌های ساخت، ظرفیت تحمل بار محوری و خمشی عالی، خاصیت شکل‌پذیری زیاد و بار بحرانی بزرگ‌تر در هنگام کم‌انرژی است. مزیت اصلی این سیستم، اندرکنش بین لوله فولادی و بتن است. کم‌انرژی موضعی لوله فولادی به دلیل حضور بتن به تعویق می‌افتد و لوله‌ی فولادی اثرات محصورکنندگی مناسبی را برای بتن فراهم می‌کند [۱]. نتایج تحقیقات خاروب و حسنین در سال ۲۰۱۴ نشان می‌دهد که تأثیر محصورشدگی با افزایش نسبت لاغری کاهش می‌یابد، زیرا تغییر شکل جانبی قبل از گسیختگی، لنگر خمشی ثانویه را افزایش می‌دهد و بنابراین کرنش فشاری میانگین در بتن کم می‌شود [۲].

در ستون‌های CFDST، بخش عمده‌ای از محصورشدگی وارد بر بتن توسط جداره فولادی خارجی تأمین می‌شود. نقش جداره‌ی داخلی عمدتاً ایجاد یک قالب برای هسته بتنی است؛ هرچند می‌تواند در تحمل بارهای فشاری به لوله خارجی و بتن نیز کمک کند. از نظر اقتصادی، لوله‌ی داخلی می‌تواند نازک‌تر از لوله‌ی خارجی باشد اما لوله‌ی فولادی نازک‌تر امکان کم‌انرژی بیشتری نیز دارد بنابراین می‌توان از مصالح دیگری مانند پلاستیک برای لوله‌ی داخلی استفاده کرد. یکی از گزینه‌های موجود، استفاده از لوله PVC به‌عنوان لوله داخلی در ستون‌های CFDST است. آزمایش‌ها امکان استفاده از لوله PVC را به‌عنوان لوله داخلی ستون‌های CFDST، به اثبات رسانده است. با در نظر گرفتن مزایای لوله‌های PVC نظیر ارزان بودن، قالب بندی مناسب، نصب و اجرای آسان و امکان استفاده به‌عنوان لوله‌های سرویس، به نظر می‌رسد لوله PVC بتواند گزینه خوبی برای مسائل اجرایی باشد [۳]. مود گسیختگی ستون‌های CFDST محصور نشده، شکست لوله‌ی خارجی و کم‌انرژی به سمت داخل لوله‌ی داخلی در کرنش‌های محوری بزرگ اتفاق می‌افتد. در طراحی، ضخامت لوله‌ی داخلی به طوری انتخاب می‌شود که قبل از شکست لوله‌ی خارجی، شکسته شود تا فشار محصور شدگی فراهم شده برای بتن داخلی، حداکثر شود. وقتی لوله‌ی داخلی شروع به شکست می‌کند، ظرفیت باربری لوله‌ی داخلی به طور ناگهانی کاهش می‌یابد. همچنین کم‌انرژی به سمت داخل لوله‌ی داخلی، فشار محصورشدگی وارد بر بتن را به طور قابل توجهی کاهش می‌دهد بنابراین ظرفیت باربری بتن داخلی کاهش می‌یابد. تحت چنین شرایطی، بارهای اضافه‌ای که نمی‌توانند به وسیله‌ی لوله‌ی داخلی و بتن تحمل شوند، سریعاً به لوله‌ی خارجی منتقل می‌شوند که نهایتاً سبب شکست لوله خارجی می‌شود [۴].

در سال ۲۰۱۶ رومرو و همکاران در یک مطالعه آزمایشگاهی با ساخت ۱۴ نمونه ستون CFDST تأثیر بتن پر مقاومت در رفتار این نوع ستون‌ها در هنگام بارگذاری خارج از محور را بررسی کردند. تأثیر درجه بتن ریخته شده داخل لوله‌ها (معمولی یا پر مقاومت)، مکان بتن‌ریزی (لایه‌ی داخلی یا بیرونی) و نسبت ضخامت لوله‌ها از جمله پارامترهایی بود که در این تحقیق بررسی شد [۵]. در سال ۲۰۱۲ لی و همکاران، به بررسی مقاومت محوری ستون‌های CFDST با اعمال پیش بارگذاری بر جداره‌های فولادی پرداختند. با توجه به اینکه در این ستون‌ها ابتدا جداره‌های فولادی نصب می‌شود و سپس بتن‌ریزی صورت می‌گیرد، بنابراین جداره‌های فولادی در معرض تنش‌ها و تغییر شکل‌های اولیه قرار دارند. در این تحقیق با روش آزمایشگاهی و روش المان محدود تأثیر این پیش‌بارگذاری بر روی مقاومت ستون بررسی شده و روابطی برای تعیین مقاومت ستون‌های CFDST با و بدون پیش‌بارگذاری تعیین شده است [۶]. در سال ۲۰۱۳ لی و همکاران، رفتار ستون‌های CFDST را تحت بارگذاری محوری با خروج از مرکزیت مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق ستون‌ها دارای مقطع متغیر در ارتفاع می‌باشند. رفتار این ستون‌ها با ستون‌هایی که دارای مقطع ثابت در ارتفاع می‌باشند مقایسه شده و این نتیجه حاصل شده است که مد شکست ستون‌های با مقطع متغیر با ستون‌های دارای مقطع ثابت یکسان است ولی حداکثر تغییر شکل‌ها بالاتر از وسط ستون رخ می‌دهد [۷]. در سال ۲۰۱۴ لی و همکاران، به بررسی رفتار کششی مقاطع CFDST پرداختند. در این تحقیق بار محوری کششی با و بدون خروج از مرکزیت به مقاطع CFDST اعمال شده است. نتایج تحقیق نشان می‌دهد که بتن پر شده بین دو جداره‌ی فولادی به خوبی رفتار

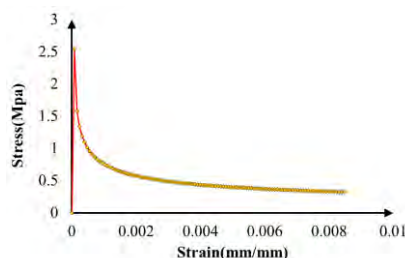
می‌کند و تکیه‌گاه مناسبی برای مقاطع فولادی در کشش فراهم می‌آورد [۸]. در سال ۲۰۱۴ پاگولاتو و همکاران، بر روی ستون‌های فولادی دایره‌ای دوجداره‌ی پر شده از بتن تحت بارهای محوری آنالیز المان محدود انجام دادند. در این تحقیق به منظور بررسی اثر پارامترهایی مانند نسبت قطر مقطع به ضخامت جداره (D/t)، مقاومت هسته بتنی و مقاومت تسلیم ستون فولادی، ۲۵ نمونه مورد بررسی قرار گرفته است و در نهایت رابطه‌ی جدیدی بر اساس Eurocode4 برای ارزیابی مقاومت ستون‌های فولادی دوجداره‌ی پر شده از بتن ارائه شده است [۹]. یوناکا و همکاران در سال ۲۰۱۶ رفتار ستون‌های CFDST با مقطع دایره در لایه‌ی بیرونی و مقطع مربع در لایه‌ی داخلی را بررسی کردند؛ نتایج نشان داد نمونه‌هایی که فولاد بیشتری دارند دارای مقاومت بیشتری هستند ولی شکل‌پذیری آن‌ها کمتر است [۱۰]. خراسانی و همکاران در سال ۱۳۹۶ پژوهشی در زمینه مقایسه رفتار قاب‌های خمشی مرکب (RCS) و فولادی تحت زلزله‌های حوزه نزدیک گسل انجام دادند [۱۱]. حقیقت و همکاران نیز در سال ۱۳۹۶ در پژوهشی به بررسی اتصال خمشی ترکیبی نوین تحت بارگذاری چرخه‌ای و اثر آن در قاب مرکب یک طبقه پرداختند [۱۲]. حال در تحقیق پیش رو به شبیه‌سازی ۲۷ نمونه ستون مرکب دوجداره فولادی با جداره‌ی داخلی دایره‌ای و جداره‌ی خارجی شش ضلعی، به روش اجزای محدود و به کمک نرم افزار آباکوس پرداخته شده است.

۲- مدل‌سازی

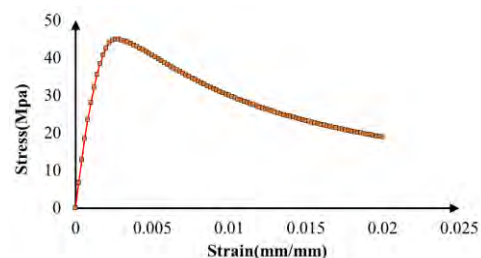
در تحلیل‌های غیرخطی، آباکوس به صورت خودکار، نمودار بار و دامنه‌ی تغییرات همگرایی مناسب را انتخاب و به طور پیوسته در طول تحلیل این پارامترها را تنظیم می‌کند تا از بدست آمدن نتایج دقیق اطمینان حاصل شود. به علت قابلیت‌های بالای نرم افزار آباکوس نسبت به سایر نرم افزارهای اجزای محدود در این پژوهش از این نرم افزار برای انجام شبیه‌سازی‌ها استفاده شده است. مدل‌سازی هندسی دقیق ابعاد یک سازه تاثیر مهمی بر تحلیل عددی و نتیجه‌گیری‌های پس از آن دارد. الگوی شکست و یا توسعه‌ی کمانش‌های کلی و موضعی تا حد زیادی تابع هندسه اولیه ستون بوده و تاریخچه‌ی تنش و کرنش به هنگام بارگذاری را تحت تاثیر قرار می‌دهد. بنابراین برای بررسی عددی دقیق یک ستون مرکب، مشخص نمودن عیوب و نقایص اولیه در جداره‌ی فولادی دارای اهمیت می‌باشد. برای مثال مقداری انحراف در راستای مد اول در ستون مرکب از حالت قائم به عنوان عیب یا نقص اولیه در مدل‌های عددی مطرح می‌باشد که در تمامی مدل‌های این پژوهش در نظر گرفته شده است. برای تعریف مدل رفتاری بتن آسیب دیده پلاستیک پارامترهای زاویه‌ی اتساع، خروج از مرکزیت، نسبت مقاومت فشاری دو محوره به یک محوره (F_{b0}/f_{c0})، نسبت تنش جریان (k) و ویسکوزیته مورد نیاز است که مقادیر آن مطابق جدول ۱ در نظر گرفته شده است. منحنی تنش-کرنش برای بتن محصور شده از مدل هان و همکاران استفاده گردید که نمودار تنش-کرنش آن در شکل ۱ نشان داده شده است. به منظور شبیه‌سازی رفتار ستون‌های مرکب دوجداره‌ی فولادی در تحقیق حاضر، از یک نوع فولاد در جداره‌های خارجی و داخلی استفاده گردید. رفتار سخت شوندگی فولاد بصورت کینماتیک و معیار گسیختگی مورد استفاده، فون مایسز می‌باشد. نمودار تنش-کرنش فولاد بصورت الاستوپلاستیک در نظر گرفته شده است که در شکل ۲ قابل مشاهده است.

جدول ۱: پارامترهای مدل رفتاری Damage Plasticity

Dilation angle	Eccentricity γ	F_{b0}/f_{c0}	K	Viscosity Parameter
20	0.1	1.16	$\frac{0.6}{6}$	0.0001

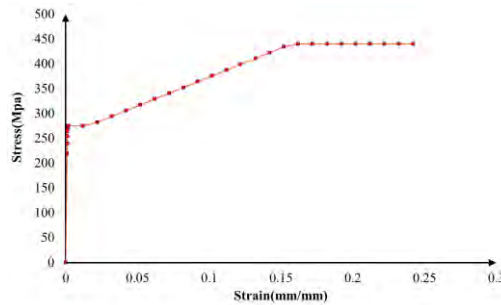


(ب)



(الف)

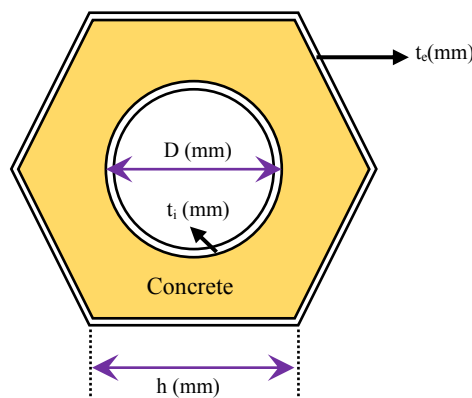
شکل ۱: نمودار تنش-کرنش بتن محصور، (الف) تنش فشاری، (ب) تنش کششی



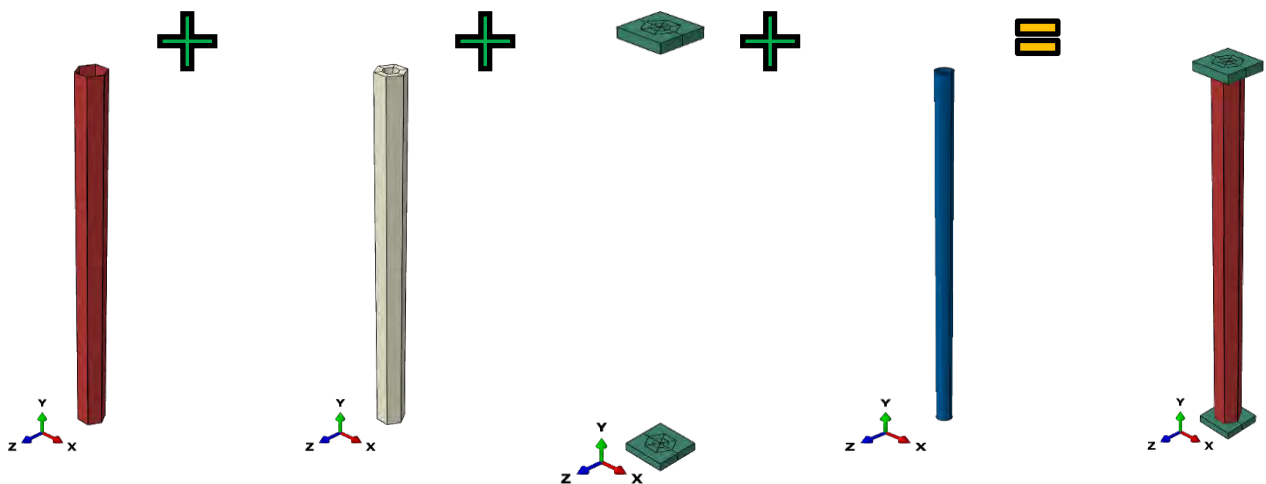
شکل ۲: نمودار تنش-کرنش فولاد

۳- نمونه‌های مورد بررسی

مدل‌های مورد بررسی در این پژوهش در سه گروه اصلی دسته بندی شده است. در گروه اول نسبت قطر لوله فولادی داخلی به ضخامت جداره فولادی ۱۴/۲۸۸، در گروه دوم ۱۲/۴۲۴ و در گروه سوم ۱۶/۴۳۱ در نظر گرفته شد. متغیرهای مورد بررسی در هر گروه از نمونه‌ها شامل ارتفاع نمونه، قطر لوله‌ی داخلی، ضخامت لوله‌ی داخلی و بعد شش ضلعی مقطع فولادی خارجی می‌باشد. در شکل ۳ نمونه‌ای از ستون دوجداره مورد بررسی آورده شده است که در آن پارامترهای مقطع هندسی مورد ارزیابی بصورت مجزا مشخص شده است. تعداد نمونه‌های مورد بررسی ۲۷ نمونه می‌باشد. بارگذاری اعمالی به هریک از نمونه‌ها بصورت کنترل-جابجایی اعمال گردید که با افزایش جابجایی محوری ستون همراه بود. مقاومت فشاری بتن و تنش تسلیم فولاد در نمونه‌ها ثابت در نظر گرفته شده است. در شکل ۴ نمونه‌ای از مدل سرهم‌بندی شده قابل مشاهده است. در جدول ۲ و ۳ ابعاد مقطع تمامی مدل‌ها و خواص هندسی نمونه‌ها آورده شده است.



شکل ۳: مقطع مدل‌ها



شکل ۴: نمونه‌ای از مدل سرهم بندی شده

جدول ۲: مشخصات نمونه های مورد بررسی

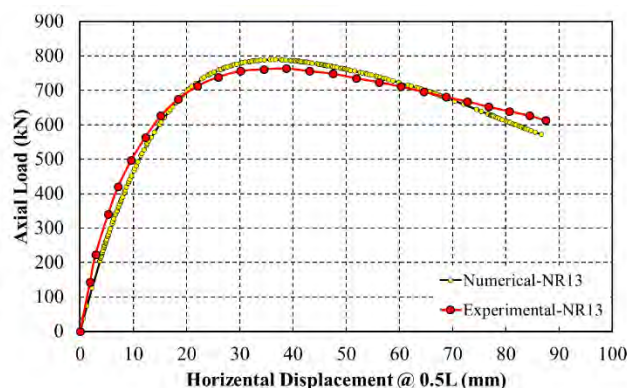
	h(mm)	t _c (mm)	D(mm)	t _s (mm)	L(mm)	f _c (mpa)	f _s (mpa)
CFDST-01	101.600	3.000	114.300	8.000	1657.500	45	318
CFDST-02	101.600	3.000	114.300	8.000	2486.300	45	318
CFDST-03	101.600	3.000	114.300	8.000	3315.000	45	318
CFDST-04	116.840	3.000	131.445	9.200	1657.500	45	318
CFDST-05	116.840	3.000	131.445	9.200	2486.300	45	318
CFDST-06	116.840	3.000	131.4450	9.200	3315.000	45	318
CFDST-07	132.080	3.000	148.590	10.400	1657.500	45	318
CFDST-08	132.080	3.000	148.590	10.400	2486.300	45	318
CFDST-09	132.080	3.000	148.590	10.400	3315.000	45	318
CFDST-10	101.600	3.000	99.391	8.000	1657.500	45	318
CFDST-11	101.600	3.000	99.391	8.000	2486.300	45	318
CFDST-12	101.600	3.000	99.391	8.000	3315.000	45	318
CFDST-13	116.840	3.000	114.300	9.200	1657.500	45	318
CFDST-14	116.840	3.000	114.300	9.200	2486.300	45	318
CFDST-15	116.840	3.000	114.3000	9.200	3315.000	45	318
CFDST-16	132.080	3.000	129.209	10.400	1657.500	45	318
CFDST-17	132.080	3.000	129.209	10.400	2486.300	45	318
CFDST-18	132.080	3.000	129.209	10.400	3315.000	45	318
CFDST-19	101.600	3.000	131.445	8.000	1657.500	45	318
CFDST-20	101.600	3.000	131.445	8.000	2486.300	45	318
CFDST-21	101.600	3.000	131.445	8.000	3315.000	45	318
CFDST-22	116.840	3.000	151.162	9.200	1657.500	45	318
CFDST-23	116.840	3.000	151.162	9.200	2486.300	45	318
CFDST-24	116.840	3.000	151.1618	9.200	3315.000	45	318
CFDST-25	132.080	3.000	170.879	10.400	1657.500	45	318
CFDST-26	132.080	3.000	170.879	10.400	2486.300	45	318
CFDST-27	132.080	3.000	170.879	10.400	3315.000	45	318

جدول ۳: مشخصات نسبی ابعاد نمونه های مورد بررسی

	h/t _c	D/t _c	h/D	t _s /t _c
CFDST-01	33.867	14.288	0.889	0.375
CFDST-02	33.867	14.288	0.889	0.375
CFDST-03	33.867	14.288	0.889	0.375
CFDST-04	38.947	14.288	0.889	0.326
CFDST-05	38.947	14.288	0.889	0.326
CFDST-06	38.947	14.288	0.889	0.326
CFDST-07	44.027	14.288	0.889	0.288
CFDST-08	44.027	14.288	0.889	0.288
CFDST-09	44.027	14.288	0.889	0.288
CFDST-10	33.867	12.424	1.022	0.375
CFDST-11	33.867	12.424	1.022	0.375
CFDST-12	33.867	12.424	1.022	0.375
CFDST-13	38.947	12.424	1.022	0.326
CFDST-14	38.947	12.424	1.022	0.326
CFDST-15	38.947	12.424	1.022	0.326
CFDST-16	44.027	12.424	1.022	0.288
CFDST-17	44.027	12.424	1.022	0.288
CFDST-18	44.027	12.424	1.022	0.288
CFDST-19	33.867	16.431	0.773	0.375
CFDST-20	33.867	16.431	0.773	0.375
CFDST-21	33.867	16.431	0.773	0.375
CFDST-22	38.947	16.431	0.773	0.326
CFDST-23	38.947	16.431	0.773	0.326
CFDST-24	38.947	16.431	0.773	0.326
CFDST-25	44.027	16.431	0.773	0.288
CFDST-26	44.027	16.431	0.773	0.288
CFDST-27	44.027	16.431	0.773	0.288

۴- صحت سنجی و بررسی خروجی های مدل ها

صحت سنجی به معنی مدل سازی دقیق یک مدل آزمایشگاهی در محیط اجزای محدود آباکوس و تحلیل آن و بدست آوردن نتایج مشابهی نتایج آزمایشگاهی می باشد. برای صحت سنجی مدلی مشابه آنچه در پژوهش رومرو و همکارانش انجام شد، انتخاب گردید [۹]. از نظر هندسه و بارگذاری و ... انتخاب انجام می شود و مقاله آزمایشگاهی تست آن مدل را مطالعه نموده و نهایتاً در این صحت سنجی مدل NR13 از کار آزمایشگاهی مورد شبیه سازی قرار گرفت. همانگونه که در شکل ۵ مشاهده میشود، خروجی شبیه سازی و مدل آزمایشگاهی تطابق خوبی دارند.



شکل ۵: خروجی شبیه سازی و مدل آزمایشگاهی

یکی از پارامترهای موثر در رفتار ستون های مرکب دولایه ی فولادی، پارامتر ارتفاع می باشد. از آنجا که این پارامتر بر روی مد کمانش کلی ستون موثر است و میزان سختی و مقاومت ستون را به شدت تحت تاثیر قرار می دهد، به عنوان یکی از پارامترهای مورد بررسی انتخاب شد. تعداد کل نمونه های مورد بررسی بیست و هفت عدد می باشد که متشکل از سه گروه اصلی است که در هر گروه سه دسته از نمونه ها قرار گرفته است. در هر دسته از نمونه ها که شامل سه مدل می باشد، پارامتر ارتفاع در آنها متغیر است. ارتفاع های در نظر گرفته شده برای هر دسته به ترتیب ۱۶۵۷/۵، ۲۴۸۶/۳ و ۳۳۱۵ میلی متر می باشد. نسبت ارتفاع ها طوری در نظر گرفته شد که با افزایش ۵۰ درصدی و ۱۰۰ درصدی ارتفاع، میزان تغییرات سختی و مقاومت و وابستگی آن به تغییرات ارتفاع به صورت دقیق تعیین گردد.

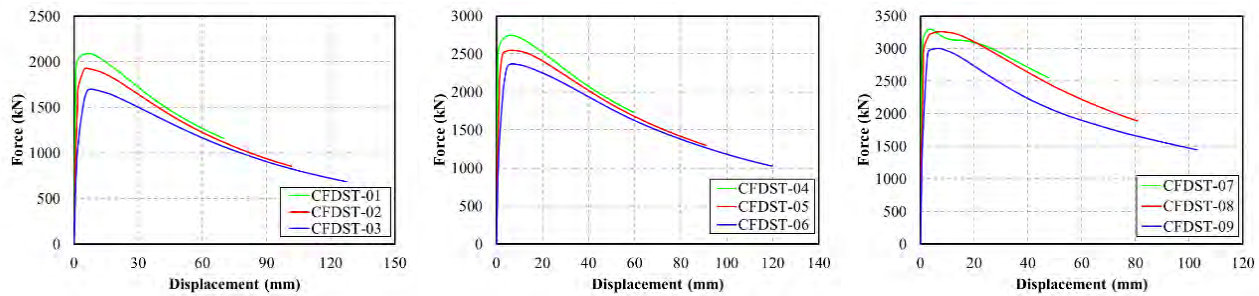
رفتار هر یک از نمودارهای نیروی محوری-جابجایی جانبی در میانه ستون، دارای دو بخش اصلی می باشد. در بخش اول رفتار نمونه ها بصورت الاستیک و در بخش دوم رفتار نمونه ها بصورت غیرالاستیک می باشد. بخش اول مربوط به قسمت الاستیک خطی نمودارها است که رفتار هر یک از اجزای ستون به صورت خطی می باشد و شیب نمودار در این قسمت معرف سختی می باشد. به طور مثال با توجه به شکل ۶ نتایج سختی اولیه ستون های مربوط به مدل های CFDST-01، CFDST-02، و CFDST-03، که به ترتیب دارای ارتفاع های ۱۶۵۷/۵، ۲۴۸۶/۳ و ۳۳۱۵ میلی متر می باشد، با توجه به شیب اولیه ی نمونه ها ۲۷۳۴/۹۱، ۱۰۵۸/۷۹ و ۶۴۰/۸۴ کیلونیوتن بر میلی متر، حاصل گردید.

بعد از مرحله خطی، رفتار نیرو-جابجایی وارد مرحله غیر خطی می شود و رفتار ستون از حالت خطی به غیرخطی تغییر حالت می دهد و تا مرحله ی مقاومت نهایی، افزایش نیرو ادامه پیدا می کند. مقدار مقاومت نهایی برای هر یک از نمونه ها برای ارتفاع های ۱۶۵۷/۵، ۲۴۸۶/۳ و ۳۳۱۵ میلی متر به ترتیب ۲۰۹۲/۵۲، ۱۹۲۴/۶۳ و ۱۶۹۸/۸۸ کیلونیوتن است.

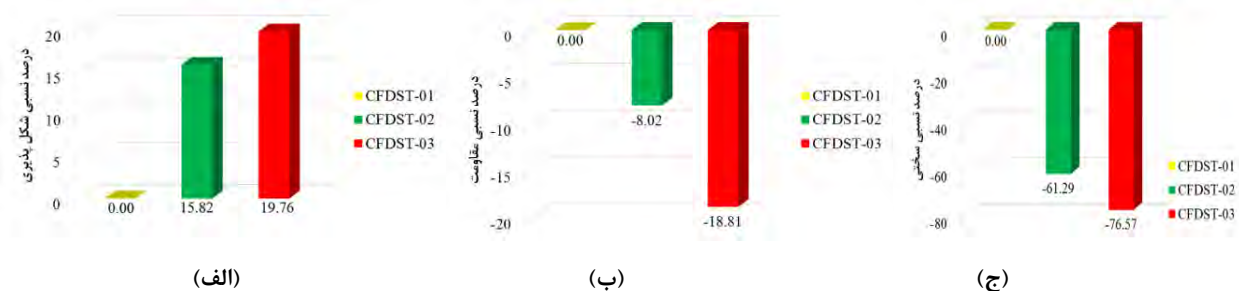
بعد از رسیدن نمودارهای نیرو-جابجایی جانبی به مقاومت نهایی ستون، وارد مرحله ی بعد یعنی پدیده ی نرم شدگی و کاهش نیرو می شود. بتن قرار گرفته در فضای بین دوجداره دچار آسیب و ترک خوردگی می شود و جداری فولادی خارجی کشش حاصل از بارگذاری را متحمل می شود و به تنش جاری شدگی می رسد. با افزایش بارگذاری، جاری شدگی در قسمت فشاری و کششی جداری فولادی رشد کرده و با جاری شدگی فولاد و آسیب بتن، تار خنثی در مقطع تغییر وضعیت می دهد و کاهش نیرو را در منحنی نیرو-جابجایی میانی

ستون ایجاد می‌کند که در نمودار شکل ۶ مشاهده می‌گردد. همچنین با توجه به شکل ۷ سختی و مقاومت نمونه‌ی CFDST-02، به ترتیب ۶۱/۲۹ و ۸/۰۲ درصد نسبت به سختی و مقاومت نمونه‌ی CFDST-01 کاهش یافته است و شکل‌پذیری نمونه‌ی CFDST-02، افزایش ۱۵/۸۲ درصدی را نسبت به شکل‌پذیری نمونه‌ی CFDST-01 داشته است. همچنین سختی و مقاومت نمونه‌ی CFDST-03، به ترتیب ۷۶/۵۷ و ۱۸/۸۱ درصد

نسبت به سختی و مقاومت نمونه‌ی CFDST-01 کاهش یافته است و شکل‌پذیری نمونه‌ی CFDST-03، افزایش ۱۹/۷۶ درصدی را نسبت به شکل‌پذیری نمونه‌ی CFDST-01 داشته است.



شکل ۶: منحنی نیرو-جابجایی مربوط به مدل ۷

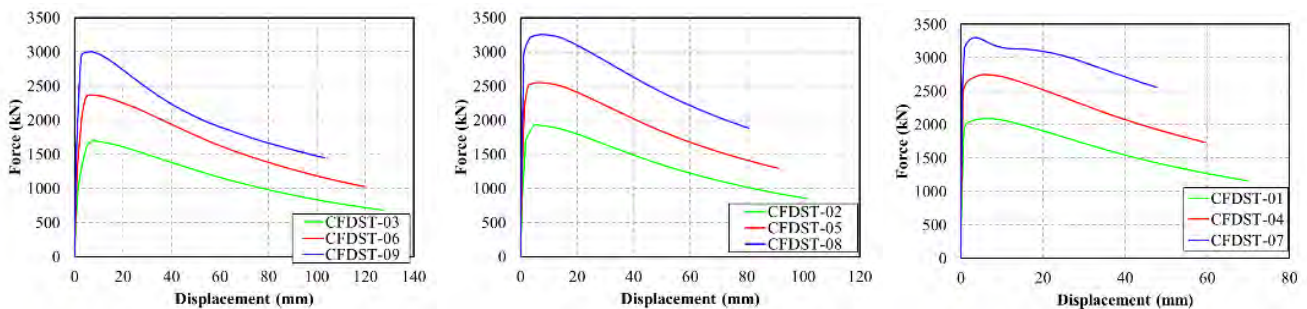


شکل ۷: درصد تغییرات مدل‌های CFDST-01، CFDST-02، و CFDST-03 از جنبه، الف) سختی، ب) مقاومت، ج) شکل‌پذیری

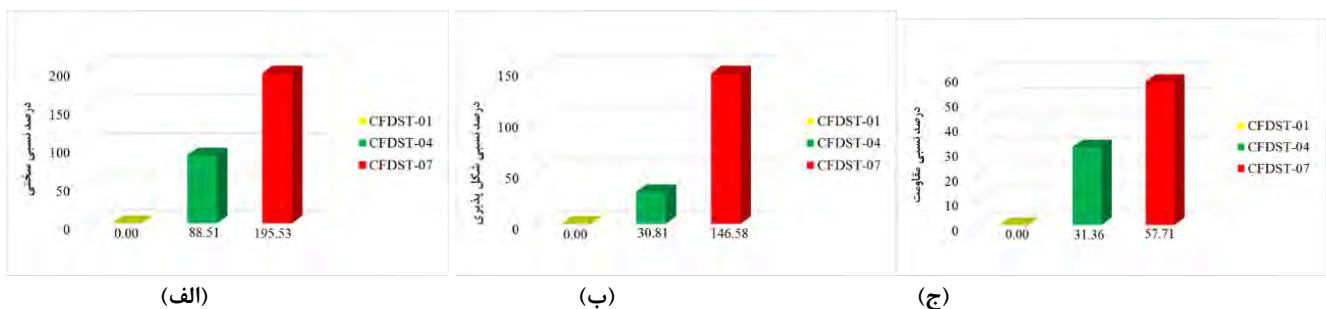
با بررسی منحنی نیرو-جابجایی میانی ستون در ارتفاع‌های ۱۶۵۷/۵، ۲۴۸۶/۳، و ۳۳۱۵ میلی‌متر در حالتی که خروج از مرکزیت نمونه‌ها صفر می‌باشد و بار بصورت محوری فشاری بر نمونه‌ها اعمال می‌گردد، مشاهده می‌شود که با افزایش ارتفاع ستون مرکب دولایه‌ی فولادی با مقطع شش ضلعی در جداره‌ی خارجی و دایره‌ای در جداره‌ی داخلی، مقاومت و سختی اولیه کاهش می‌یابد. دلیل کاهش درصد سختی نمونه‌ها با افزایش ارتفاع، کاهش پارامتر (EA/L) و دلیل کاهش درصد مقاومت نمونه‌ها با افزایش ارتفاع، کاهش عبارت $(KL)^2 / \pi(EI)$ است. اما دلیل افزایش شکل‌پذیری با کاهش ارتفاع میزان تحمل بالای ظرفیت باربری و شیب کاهش نیروی کمتر در شاخه نزولی نمودار نیرو-جابجایی می‌باشد. در اینجا پارامتر (K) ضریب شرایط تکیه‌گاهی، (E) مدول الاستیسیته، (I) ممان اینرسی که برای مقطع مرکب از $[I_{eff}]$ صلبیت خمشی موثر استفاده می‌شود. (L) ارتفاع سازه و (A) سطح مقطع لوله فولادی و بتن پرکننده بین دو جداره‌ی فولادی است.

با توجه به دوجداره بودن ستون‌ها، نسبت بعد شش ضلعی به ضخامت برای جداره‌ی فولادی خارجی حائز اهمیت است. تغییرات در مقدار این نسبت با تغییرات در فشار محیطی وارد شده به بتن پرکننده‌ی بین دو جداره‌ی فولادی رابطه‌ی مستقیم دارد. بطوری‌که با افزایش مقادیر مختلف این نسبت میزان محصورشدگی بتن پرکننده تغییر می‌کند اما میزان افزایش ظرفیت محوری ستون دولایه با جداره‌ی خارجی شش ضلعی مشخص نمی‌باشد. به همین دلیل با تغییر در میزان $[I_{out}]$ یا (h/t) نسبت بعد به ضخامت خارجی، درصد تاثیر بر ظرفیت محوری یکی از پارامترهای این پژوهش انتخاب گردید. مقادیر $[I_{out}]$ یا (h/t) نسبت بعد به ضخامت خارجی در نظر گرفته شده در این پژوهش ۳۳/۸۶۷، ۳۸/۹۴۷، و ۴۴/۰۲۷ می‌باشد. نتایج حاصل از شبیه سازی عددی برای مدل‌های اول هر سه دسته از

گروه اول که دارای نسبت قطر به ضخامت داخلی ثابت با مقدار ۱۴/۲۸۸ می باشد، آورده شده است. در این سه مدل پارامتر ارتفاع ۱۶۵۷/۵ در نظر گرفته شده است و نسبت بعد به ضخامت خارجی سه مدل متفاوت می باشد. در شکل ۸ منحنی نیرو-جابجایی میانی ستون برای نسبت بعد به ضخامت خارجی متفاوت با ثابت در نظر گرفته شدن ارتفاع و نسبت قطر به ضخامت داخلی، نشان داده شده است. نتایج سختی اولیه‌ی ستون‌های مربوط به مدل‌های CFDST-01، CFDST-04، و CFDST-07 مورد بررسی که دارای نسبت بعد به ضخامت خارجی به ترتیب ۳۳/۸۶۷، ۳۸/۹۴۷ و ۴۴/۰۲۷ می باشد، با توجه به شیب اولیه‌ی نمونه‌ها ۲۷۳۴/۹۱، ۵۱۵۵/۶ و ۸۰۸۲/۴۹ کیلونیوتن بر میلی‌متر، حاصل گردید. همچنین مقدار مقاومت نهایی در مرحله‌ی رفتار غیرخطی ستون مرکب دوجداره با مقطع خارجی شش ضلعی و داخلی لوله، برای نسبت بعد به ضخامت خارجی ۳۳/۸۶۷، ۳۸/۹۴۷ و ۴۴/۰۲۷ به ترتیب ۲۰۹۲/۵۲، ۲۷۴۸/۶۸ و ۳۳۰۰/۰۵ کیلونیوتن، حاصل شده است. با توجه به شکل ۹ سختی و مقاومت نمونه‌ی CFDST-4، به ترتیب ۸۸/۵۱ و ۳۱/۳۶ درصد نسبت به سختی و مقاومت نمونه‌ی CFDST-1 افزایش یافته است و شکل‌پذیری نمونه‌ی CFDST-4، افزایش ۳۰/۸۱ درصدی را نسبت به شکل‌پذیری نمونه‌ی CFDST-1 داشته است. همچنین سختی و مقاومت نمونه‌ی CFDST-7، به ترتیب ۱۹۵/۵۳ و ۵۷/۷۱ درصد نسبت به سختی و مقاومت نمونه‌ی CFDST-1 افزایش یافته است و شکل‌پذیری نمونه‌ی CFDST-7، افزایش ۱۴۶/۵۸ درصدی را نسبت به شکل‌پذیری نمونه‌ی CFDST-1 داشته است.



شکل ۸: منحنی نیرو-جابجایی مربوط به تعدادی از مدل‌ها

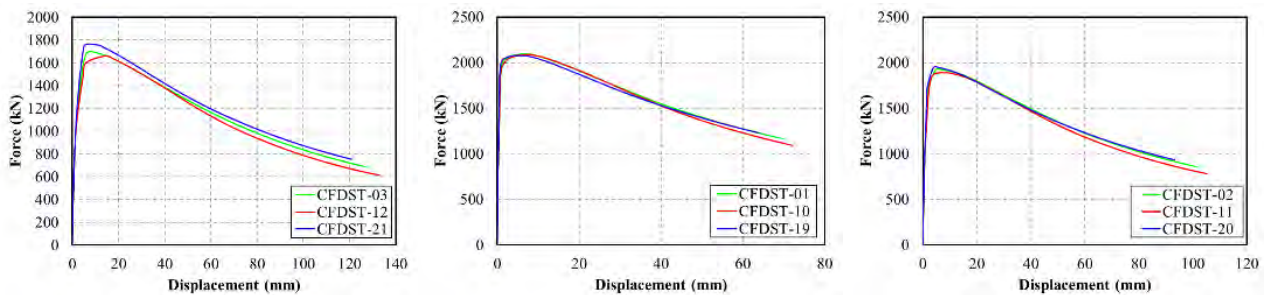


شکل ۹: درصد تغییرات مدل‌های CFDST-1، CFDST-4، و CFDST-7 از جنبه، (الف) سختی، (ب) مقاومت، (ج) شکل‌پذیری

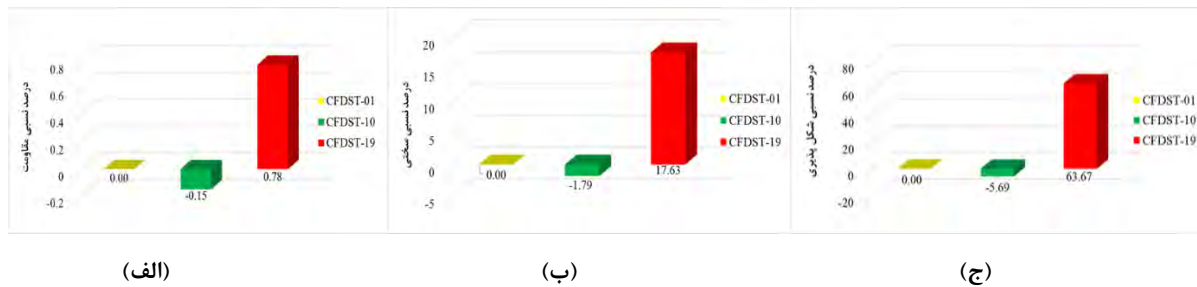
تغییر بعد به ضخامت در جداری خارجی فولاد شش ضلعی سبب تغییر در میزان محصورشدگی بتن پرکننده می‌گردد. با افزایش نسبت بعد به ضخامت شش ضلعی، محصورشدگی در بتن افزایش می‌یابد. با توجه به ثابت نگه داشتن پارامترهای وابسته و تاثیرگذاری بر روی رفتار محوری ستون میزان تغییرات نسبت بعد به ضخامت شش ضلعی نشان از افزایش حداکثری ۸۰/۵۱ درصد در مقاومت و ۶۵۰/۴۸ درصد در سختی بوده است. همچنین این پارامتر به دلیل قرار گرفتن فولاد در مکانی دورتر از تار خنثی تاثیرات و حساسیت بیشتری را بر روی رفتار محوری ستون دارد. اما میزان این تغییرات که چه مقداری است و تا چه حد بر روی رفتار محوری تاثیرگذار است، در این پژوهش تعیین شد.

نسبت قطر به ضخامت جداری داخلی فولادی یکی از پارامترهای موثر در رفتار خمشی این ستون‌ها است که دلیل آن افزایش ممان اینرسی خمشی می‌باشد. در ادامه مقادیر ۱۴/۲۸۸، ۱۲/۴۲۴ و ۱۶/۴۳۱ برای $\left[\frac{D}{t} \right]_{in}$ یا نسبت قطر به ضخامت داخلی در نظر

گرفته شد تا تاثیرات آن بر روی رفتار محوری و میزان افزایش یا کاهش آن تعیین گردد. نتایج حاصل از شبیه سازی عددی برای مدل های اول از دسته ی اول هر سه گروه که دارای نسبت بعد به ضخامت خارجی ثابت با مقدار ۳۳/۸۶۷ می باشد، آورده شده است. در این سه مدل پارامتر ارتفاع ۱۶۵۷/۵ در نظر گرفته شده است و نسبت قطر به ضخامت داخلی سه مدل متفاوت می باشد. در شکل ۱۰ منحنی نیرو-جابجایی میانی ستون برای نسبت قطر به ضخامت داخلی متفاوت با ثابت در نظر گرفته شدن ارتفاع و نسبت بعد به ضخامت خارجی، نشان داده شده است. به طور مثال نتایج سختی اولیه ستون های مربوط به مدل های CFDST-01، CFDST-10، CFDST-19 مورد بررسی که دارای نسبت قطر به ضخامت داخلی به ترتیب ۱۴/۲۸۸، ۱۲/۴۲۴ و ۱۶/۴۳۱ می باشد، با توجه به شیب اولیه نمونه ها ۲۷۳۴/۹۶، ۲۷۳۴/۹۱ و ۲۷۸۳/۹۶ و ۳۲۱۶/۹۷ کیلونیوتن بر میلی متر، حاصل گردید. همچنین مقدار مقاومت نهایی در مرحله رفتار غیرخطی ستون مرکب دوجداره با مقطع خارجی شش ضلعی و داخلی لوله، برای نسبت قطر به ضخامت داخلی ۱۴/۲۸۸، ۱۲/۴۲۴ و ۱۶/۴۳۱ به ترتیب ۲۰۹۲/۵۲، ۲۰۸۹/۴۲ و ۲۰۷۶/۲۳ کیلونیوتن، حاصل شده است. با توجه به شکل ۱۱ سختی و مقاومت نمونه ی CFDST-10، به ترتیب ۱/۷۹ و ۰/۱۵ درصد نسبت به سختی و مقاومت نمونه ی CFDST-01 کاهش یافته است و شکل پذیری نمونه ی CFDST-10، کاهش ۵/۶۹ درصدی را نسبت به شکل پذیری نمونه ی CFDST-01 داشته است. همچنین سختی و مقاومت نمونه ی CFDST-19، به ترتیب ۱۷/۶۳ و ۰/۷۸ درصد نسبت به سختی و مقاومت نمونه ی CFDST-01 افزایش یافته است و شکل پذیری نمونه ی CFDST-19، افزایش ۶۳/۶۷ درصدی را نسبت به شکل پذیری نمونه ی CFDST-01 داشته است.

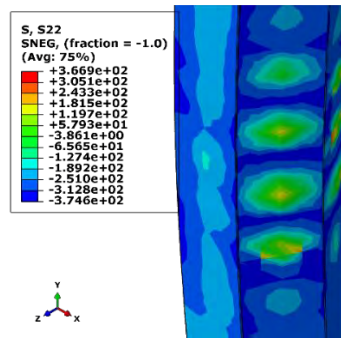


شکل ۱۰: منحنی نیرو-جابجایی مربوط به تعدادی از مدل های



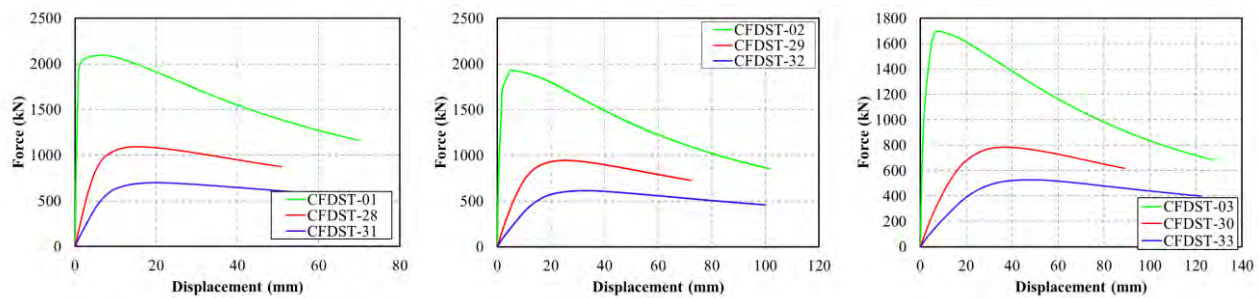
شکل ۱۱: درصد تغییرات مدل های CFDST-01، CFDST-10، CFDST-19 از جنبه، (الف) سختی، (ب) مقاومت، (ج) شکل پذیری

در نمونه های بررسی شده با تغییر $\left[\left(\frac{D}{t} \right)_{in} \right]$ یا نسبت قطر به ضخامت داخلی، به دلیل قرار گرفتن فولاد در نزدیکی تار خنثی و مرکز سطح، نیروی محوری نهایی با افزایش میزان فولاد داخلی تغییرات افزایشی کمی را به همراه دارد که بیشترین افزایش در حدود ۲/۹۵ درصد در مقاومت و ۱۸۰/۸۳ درصد در سختی می باشد. از طرفی تغییرات در فولاد داخلی نمونه ها سبب افزایش سختی می گردد همچنین در بعضی مدل ها سبب تغییر مود کمانشی از حالت مود کمانش کلی به مود کمانش موضعی به صورت چروک شدگی فولاد شد که برای نمونه مدل CFDST-7 در شکل ۱۲ قابل مشاهده است.

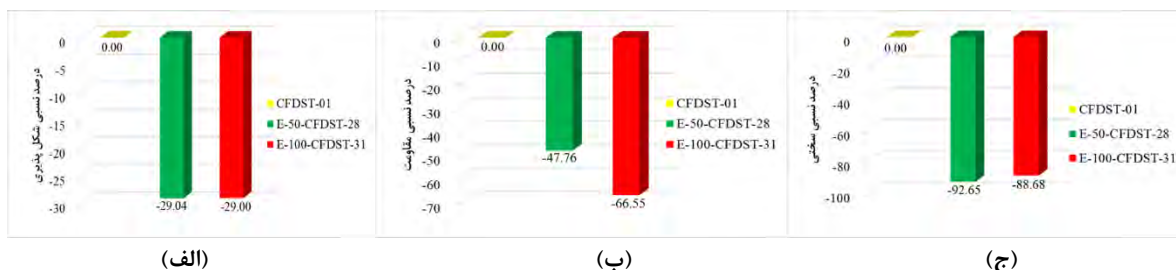


شکل ۱۲: کانتور توزیع تنش طولی در مدل CFDST-7

یکی دیگر از پارامترهای موثر در رفتار ستون‌های مرکب دو جداره، خروج از مرکزیت بارگذاری می‌باشد. پارامتر خروج از مرکزیت بار محوری باعث ایجاد لنگر خمشی علاوه بر بار محوری در ستون می‌گردد. این لنگر ایجاد شده باعث کاهش ظرفیت محوری ستون می‌شود. در این پژوهش مقادیر خروج از مرکزیت‌های صفر، پنجاه و صد میلی‌متر در نظر گرفته شده است. در مدل‌های E-50-CFDST-28، E-50-CFDST-29، E-50-CFDST-30، E-100-CFDST-31، E-100-CFDST-32 و E-100-CFDST-33 پارامتر خروج از مرکزیت برای ارتفاع‌های مختلف ستون دو جداره فولادی در نظر گرفته شده است. در شکل ۱۳ نمودار نیرو-جابجایی میانی (نیروی محوری بالای ستون-جابجایی جانبی وسط ستون) ستون‌های نمونه‌های CFDST-01، E-50-CFDST-28 و E-100-CFDST-31 آورده شده است. به طورمثال سختی اولیه‌ی نمونه‌های CFDST-01، E-50-CFDST-28 و E-100-CFDST-31 با ارتفاع ثابت ۱۶۵۷/۵ به ترتیب ۲۷۳۴/۹۱، ۲۰۰/۸۸ و ۸۸/۹ حاصل گردید. همچنین میزان مقاومت نهایی محوری فشاری هر یک از نمونه‌های ذکر شده به ترتیب ۲۰۹۲/۵۲، ۱۰۹۳/۱۲ و ۶۹۹/۹۵ بدست آمد. با توجه به شکل ۱۴ سختی و مقاومت نمونه‌ی CFDST-28، به ترتیب ۹۲/۶۵ و ۴۷/۷۶ درصد نسبت به سختی و مقاومت نمونه‌ی CFDST-01 کاهش یافته است و شکل‌پذیری نمونه‌ی CFDST-28، کاهش ۲۹/۰۴ درصدی را نسبت به شکل‌پذیری نمونه‌ی CFDST-01 داشته است. همچنین سختی و مقاومت نمونه‌ی CFDST-31، به ترتیب ۸۸/۶۸ و ۶۶/۵۵ درصد نسبت به سختی و مقاومت نمونه‌ی CFDST-01 کاهش یافته است و شکل‌پذیری نمونه‌ی CFDST-31، کاهش ۲۹ درصدی را نسبت به شکل‌پذیری نمونه‌ی CFDST-01 داشته است.



شکل ۱۳: نمودار نیرو-جابجایی میانی ستون‌های با خروج از مرکزیت



شکل ۱۴: درصد تغییرات مدل‌های CFDST-01، CFDST-28، CFDST-31 از جنبه، الف) سختی، ب) مقاومت، ج) شکل‌پذیری

با توجه به نتایج حاصل از خروج از مرکزیت بارگذاری محوری در ستون دوجداره‌ی مرکب با جداره‌ی داخلی دایره‌ای و جداره‌ی خارجی شش ضلعی، با افزایش پارامتر خروج از مرکزیت، بازه‌ی بار محوری فشاری بیشتر می‌شود و لنگر خمشی نیز افزایش می‌یابد. با

افزایش لنگر خمشی میزان بار محوری تحمل شده توسط ستون حداکثر به میزان ۲۴/۶۹ درصد کاهش و سختی نیز به میزان ۷۶/۳۶ درصد کاهش می‌یابد. در این بارگذاری به دلیل اندرکنش نیروی محوری و لنگر خمشی، فشار جانبی محیطی وارد به بتن از سمت فولاد، کاهش یافته است که این موضوع کاهش محصورشدگی را به دنبال دارد. هرچه خروج از مرکزیت در نظر گرفته شده برای بار اعمالی به سازه بیشتر باشد، کاهش محصورشدگی بیشتری در بتن پرکننده‌ی ستون رخ می‌دهد.

سه پارامتر مهم و کاربردی در ستون‌های مرکب محاسبه شده است. این سه پارامتر شاخص سختی الاستیک، شاخص مقاومت نهایی و شاخص شکل‌پذیری می‌باشد. برای بدست آوردن شاخص سختی، سختی الاستیک یکی از نمونه‌ها به‌عنوان سختی الاستیک پایه در نظر گرفته می‌شود و سختی دیگر نمونه‌ها نسبت به سختی پایه محاسبه می‌گردد و در ادامه برای محاسبه شاخص مقاومت نیز مقاومت همان نمونه‌ای که بعنوان سختی الاستیک پایه انتخاب گردید، به‌عنوان مقاومت پایه انتخاب می‌گردد و شاخص مقاومت برای نمونه‌ها محاسبه می‌گردد که در فرمول (۱) و (۲) به ترتیب روابط شاخص سختی و شاخص مقاومت مشاهده می‌شود.

$$KI = K_{ue} / K_{ur} \quad (1)$$

$$SI = N_{ue} / N_{ur} \quad (2)$$

محاسبه شاخص شکل‌پذیری برای هر یک از نمونه‌ها بر اساس فرمول (۳) انجام گرفته است. در بحث شکل‌پذیری در اعضای سازه‌ای جابجایی معادل مقاومت نهایی (u_{Δ}) و جابجایی معادل ۰/۸۵ مقاومت نهایی (0.85_{Δ}) در شاخه نزولی نمودار نیرو-جابجایی اهمیت دارد [۲۳].

$$DI = \Delta_{0.85} / \Delta_u \quad (3)$$

در ادامه نتایج بصورت مقادیر عددی شاخص‌های سختی الاستیک، مقاومت نهایی و شکل‌پذیری تنظیم گردید و در جدول ۴ آورده شده است.

جدول ۴: مقادیر عددی شاخص‌های سختی الاستیک، مقاومت نهایی و شکل‌پذیری

	Initial Stiffness (kN/mm)	Max. Strength (kN)	KI	SI	DI
CFDST-1	2734.91	2092.52	1.000	1.000	3.932
CFDST-2	1058.79	1924.63	0.387	0.920	4.554
CFDST-3	640.84	1734.43	0.234	0.853	4.709
CFDST-4	5155.60	2748.68	1.885	1.314	5.143
CFDST-5	2216.38	2547.74	0.810	1.218	5.347
CFDST-6	1114.42	2371.29	0.407	1.133	5.486
CFDST-7	8082.49	3300.05	2.955	1.577	9.695
CFDST-8	4313.90	3258.64	1.577	1.557	4.245
CFDST-9	2407.98	3004.77	0.880	1.436	4.068
CFDST-10	2783.96	2089.42	1.018	0.999	3.708
CFDST-11	965.72	1887.71	0.353	0.902	3.630
CFDST-12	660.20	1661.15	0.241	0.794	2.650
CFDST-13	4822.93	2746.36	1.763	1.312	5.319
CFDST-14	2113.22	2522.14	0.773	1.205	4.909
CFDST-15	1101.80	2317.84	0.403	1.108	4.411
CFDST-16	20893.16	3289.25	7.639	1.572	11.564
CFDST-17	4164.96	3235.46	1.523	1.546	4.232
CFDST-18	2225.28	2998.47	0.814	1.433	4.065
CFDST-19	3216.97	2076.23	1.176	0.992	6.435
CFDST-20	1223.89	1943.47	0.448	0.929	4.804
CFDST-21	712.90	1761.19	0.261	0.842	4.657
CFDST-22	5952.26	2722.26	2.176	1.301	5.514
CFDST-23	2479.12	2562.18	0.906	1.224	5.226
CFDST-24	1211.29	2367.96	0.443	1.132	5.130
CFDST-25	22698.23	3525.40	8.299	1.685	7.996
CFDST-26	4553.27	3260.56	1.665	1.558	5.462
CFDST-27	2122.78	2978.47	0.776	1.423	5.225
E-50-CFDST-28	200.88	1093.12	0.073	0.522	2.790
E-50-CFDST-29	90.71	944.85	0.033	0.452	2.267
E-50-CFDST-30	47.49	786.11	0.017	0.376	2.050
E-100-CFDST-31	88.90	699.95	0.033	0.335	2.792
E-100-CFDST-32	40.11	613.87	0.015	0.293	2.239
E-100-CFDST-33	21.42	527.15	0.008	0.252	1.971

۵- نتیجه گیری

در این پژوهش مدل‌های مختلفی از ستون مرکب دوجداره فولادی با جداری داخلی دارای شکل هندسی دایره‌ای و خارجی شش ضلعی در مقطع، مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل شده از پارامترهای مورد بررسی را می‌توان بصورت زیر ارائه کرد.

۱- در حالی که برون محوری بارگذاری صفر در نظر گرفته شد، برای نسبت بعد به ضخامت خارجی $33/867$ تغییرات مقاومت نهایی با افزایش ارتفاع از $1657/5$ به $2486/3$ و $1657/5$ به 3315 میلی‌متر، حداقل کاهش مقاومت $6/39$ درصد و حداکثر کاهش مقاومت $20/5$ درصد و برای نسبت بعد به ضخامت خارجی $38/947$ حداقل کاهش مقاومت $5/88$ درصد و حداکثر کاهش مقاومت $15/6$ درصد و برای نسبت بعد به ضخامت خارجی $44/027$ حداقل کاهش مقاومت $1/25$ درصد و حداکثر کاهش مقاومت $15/51$ درصد را به همراه داشت.

۲- در حالی که برون محوری بارگذاری صفر در نظر گرفته شد، برای ارتفاع $1657/5$ میلی‌متر میزان تغییرات مقاومت نهایی با افزایش نسبت بعد به ضخامت خارجی فولاد از $33/867$ به $38/947$ و $33/867$ به $44/027$ ، حداقل افزایش مقاومت $31/12$ درصد و حداکثر افزایش مقاومت $69/8$ درصد و برای ارتفاع $2486/3$ میلی‌متر حداقل افزایش مقاومت $31/84$ درصد و حداکثر افزایش مقاومت $71/4$ درصد و برای ارتفاع 3315 میلی‌متر حداقل افزایش مقاومت $34/45$ درصد و حداکثر افزایش مقاومت $80/51$ درصد را به همراه داشت.

۳- در حالی که برون محوری بارگذاری صفر در نظر گرفته شد، برای ارتفاع $1657/5$ میلی‌متر میزان تغییرات مقاومت نهایی با کاهش نسبت قطر به ضخامت داخلی فولاد از $14/288$ به $12/424$ حداقل کاهش مقاومت $0/08$ درصد و حداکثر کاهش مقاومت $0/33$ درصد و برای ارتفاع $2486/3$ میلی‌متر حداقل کاهش مقاومت $0/71$ درصد و حداکثر کاهش مقاومت $1/92$ درصد و برای ارتفاع 3315 میلی‌متر حداقل کاهش مقاومت $0/21$ درصد و حداکثر کاهش مقاومت $2/25$ درصد را به همراه داشت و همچنین میزان تغییرات مقاومت نهایی با افزایش نسبت قطر به ضخامت داخلی فولاد از $14/288$ به $16/431$ برای ارتفاع $1657/5$ ، حداقل افزایش مقاومت $0/72$ درصد و حداکثر افزایش مقاومت $0/96$ درصد و برای ارتفاع $2486/3$ میلی‌متر حداقل افزایش مقاومت $1/14$ درصد و حداکثر افزایش مقاومت $2/56$ درصد و برای ارتفاع 3315 میلی‌متر حداقل افزایش مقاومت $0/88$ درصد و حداکثر افزایش مقاومت $2/95$ درصد را به همراه داشت.

۴- در حالی که نسبت قطر به ضخامت فولاد داخلی و بعد به ضخامت فولاد خارجی ثابت در نظر گرفته شد، برای ارتفاع $1657/5$ ، میزان تغییرات مقاومت نهایی با افزایش برون محوری از صفر به 50 و از صفر به 100 میلی‌متر، کاهش مقاومت $47/76$ و $66/55$ درصد و برای ارتفاع $2486/3$ کاهش مقاومت $50/91$ و $68/10$ درصد و برای ارتفاع 3315 کاهش مقاومت $53/73$ و $68/97$ درصد را به همراه داشت.

۵- درصد افزایش مقاومت سازه وابسته به ارتفاع سازه و برون محوری و نسبت بعد به ضخامت خارجی می‌باشد. با ثابت ماندن نسبت قطر به ضخامت داخلی و برون محوری و ارتفاع، تاثیر نسبت بعد به ضخامت خارجی بسیار بیشتر از سه پارامتر دیگر می‌باشد.

۶- با افزایش برون محوری در ستون مرکب دوجداره فولادی شکل‌پذیری، مقاومت نهایی و سختی نمونه‌ها کاهش می‌یابد.

۷- مود کمانش در ستون مرکب وابسته به نسبت بعد به ضخامت خارجی و ارتفاع سازه است. با ثابت ماندن ارتفاع و افزایش نسبت بعد به ضخامت خارجی مود چروک شدگی نیز در ستون دولایه ایجاد شده است.

مراجع

[1] Mandal, A. (2010). Concrete Filled Steel Tube under Axial Compression. LAP LAMBERT Academic publishing, 96 pages.

[2] Hassanein, M.F. and Kharoob, O.F. (2014). Analysis of circular concrete-filled double skin tubular slender columns with external stainless steel tubes. Journal of Thin-Walled Structures, 79, 23-37.

- [3] Yuan, W.b. and Yang, J.J. (2013). Experimental and numerical studies of short concrete-filled double skin composite tube columns under axially compressive loads. *Journal of Constructional Steel Research*, 80, 23-31.
- [4] Ho, J.C.M. and Dong, C.X. (2014). Improving strength, stiffness and ductility of CFDST columns by external confinement. *Journal of Thin-Walled Structures*, 75, 18-29.
- [5] 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. *Journal of Structures*, 9, 13-20.
- [6] Li, W. Han, L.H. and Zhao, X.L. (2012). Axial strength of concrete-filled double skin steel tubular (CFDST) columns with preload on steel tubes. *Journal of Thin-Walled Structures*, 56, 9-20.
- [7] Li, W. Han, L.H. Ren, Q.X. and Zhao, X.L. (2013). Behaviour and calculation of tapered CFDST columns under eccentric compression. *Journal of Constructional Steel Research*, 83, 127-136.
- [8] Li, W. Han, L.H. and Chan, T.M. (2014). Tensile behavior of concrete-filled double-skin steel tubular members. *Journal of Constructional Steel Research*, 99, 35-46.
- [9] 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. *Journal of Engineering Structures*, 72, 102-112.
- [10] Uenaka, K. (2016). CFDST stub columns having outer circular and inner square sections under compression. *Journal of Constructional Steel Research*, 120, 1-7.
- [۱۱] خراسانی، ف؛ گرامی، م؛ خیرالدین، ع. (۱۳۹۶). مقایسه رفتار قاب‌های خمشی مرکب (RCS) و فولادی تحت زلزله‌های حوزه نزدیک گسل. فصلنامه سازه و ساخت.
- [۱۲] حقیقت، آ؛ حیدریان، ن؛ شربندار، م. (۱۳۹۶). بررسی اتصال خمشی ترکیبی نوین تحت بارگذاری چرخه ای و اثر آن در قاب مرکب یک طبقه. فصلنامه سازه و ساخت. دوره ۴، شماره ۲، تابستان ۱۳۹۶، صفحه ۸۵-۱۰۵.
- [13] Ibañez, C., Romero, M. L., Espinós, A., Portolés, J. M., & Albero, V. (2017, November). Ultra-high strength concrete on eccentrically loaded slender circular concrete-filled dual steel columns. In *Structures* (Vol. 12, pp. 64-74). Elsevier.