

Experimental and numerical investigation of the behavior of a Strengthened section of concrete filled double-skin steel tube columns under cyclic loading

Vahid Faramarzadeh¹, Adel Ferdousi^{2*}, Yousef Zandi²

1- PhD candidate, Faculty of Civil Engineering, Department of Civil Engineering, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran

2- Assistant Professor, Faculty of Technical and Engineering, Department of Civil Engineering, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran

ABSTRACT

In this paper, the main purpose is to investigate the behavior of a reinforced section with vertical stiffeners and circular stirrups of Concrete filled double-skin steel tube (CFDST) columns under cyclic and fixed axial loading. So, the proposed reinforced section with a simple section (not reinforced) in this type of columns with a length of 200 cm has been loaded and examined in the structural laboratory and then modeled in ABAQUS software and their displacement- force cycle diagram has been extracted. In this research, by designing a new reinforced cross section of this type of columns and comparing it with a simple cross section, the improvement of seismic behavior of this type of columns, including ductility, bearing capacity, and energy absorption capacity, has been investigated. To ensure the accuracy of finite element modeling, the results of numerical analysis were compared with laboratory results and the modeling accuracy was also ensured. In addition, the column with reinforced cross section has a significant improvement in its cyclic behavior compared to the simple cross section of this type of column, so that vertical stiffeners and circular stirrups prevent a sharp drop in column strength after the outer wall of the steel pipe deteriorates.

ARTICLE INFO

Receive Date: 21 August 2021

Revise Date: 21 November 2021

Accept Date: 16 December 2021

Keywords:

Concrete filled double-skin-steel tube (CFDST) columns, Strengthened section, Experimental Investigation, Finite element method, Cyclic loading.

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2021.300375.2538>

*Corresponding author: Adel Ferdousi
Email address: a_ferdousi@iaut.ac.ir

بررسی آزمایشگاهی و عددی رفتار یک مقطع تقویت شده از ستون‌های دوجداره

فولادی پر شده با بتن تحت بارگذاری چرخه‌ای

وحید فرامرزاده^۱، عادل فردوسی^{۲*}، یوسف زندی^۳

۱- دانشجوی دکتری مهندسی سازه، گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تبریز، تبریز، ایران

۲- استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تبریز، تبریز، ایران

۳- استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تبریز، تبریز، ایران

چکیده

در این مقاله هدف اصلی بررسی رفتار یک مقطع تقویت شده با سخت کننده‌های قائم و میلگردهای حلقوی در ستون‌های دوجداره فولادی پر شده با بتن تحت بارگذاری چرخه‌ای و نیز بار محوری ثابت می‌باشد. بدین منظور مقطع تقویت شده پیشنهادی با مقطع ساده (تقویت نشده) در این نوع از ستون‌ها با طول ۲۰۰ سانتی‌متر در آزمایشگاه سازه بارگذاری و بررسی شده‌اند و سپس در نرم افزار آباکوس مدل‌سازی شده و نمودار چرخه‌ای نیرو-تغییر مکان آن‌ها استخراج گردیده است. در این تحقیق با طرح مقطع تقویت شده جدیدی از این نوع ستون‌ها و مقایسه آن با مقطع ساده به بررسی بهبود رفتار لرزه‌ای این نوع از ستون‌ها از جمله شکل پذیری، ظرفیت باربری، قابلیت جذب انرژی پرداخته شده است. برای اطمینان از صحت مدل‌سازی عناصر محدود، نتایج تحلیل‌های عددی با نتایج آزمایشگاهی مقایسه و از درستی مدل‌سازی نیز اطمینان حاصل گردید. در ضمن، ستون با مقطع تقویت شده بهبود قابل ملاحظه‌ای در رفتار چرخه‌ای آن در مقایسه با مقطع ساده این نوع از ستون‌ها دارد، طوریکه سخت کننده‌های قائم و میلگردهای حلقوی پس از زوال جداره خارجی لوله فولادی از افت شدید مقاومت ستون جلوگیری می‌کنند.

کلمات کلیدی: ستون‌های دوجداره فولادی پر شده با بتن، مقطع تقویت شده، مطالعه آزمایشگاهی، روش عناصر محدود، بارگذاری چرخه‌ای.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	https://doi.org/10.22065/jsce.2021.300375.2538	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2021.300375.2538	۱۴۰۱/۰۷/۳۱	۱۴۰۰/۰۹/۲۵	۱۴۰۰/۰۹/۲۵	۱۴۰۰/۰۸/۳۰	۱۴۰۰/۰۵/۳۰
عادل فردوسی a_ferdousi@iaut.ac.ir					*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:	

۱- مقدمه

یکی از حساس‌ترین تصمیماتی که طراح سازه بایستی مدنظر قرار دهد، انتخاب نوع مصالح مصرفی و مشخصات هندسی مقاطع در سازه می‌باشد. این تصمیم در بسیاری از اوقات تابع نوع سازه، مسایل مالی و همچنین تجربه و مهارت طراح است. هدف اصلی دنبال شده در طراحی بدست آوردن سازه‌های اقتصادی و در عین حال با عملکرد مطلوب می‌باشد. بتن و فولاد مصالحی هستند که به صورت گسترده در ساخت و سازها مورد استفاده قرار می‌گیرند. مزایای هر دو مصالح امروزه به خوبی شناخته شده است، طوریکه بتن مصالحی در دسترس، ارزان قیمت (نسبت به سایر مصالح) و دارای مقاومت قابل توجه در برابر آتش‌سوزی بوده، و فولاد نیز مصالحی با شکل‌پذیری و مقاومت بالا و وزن کم است، با این وجود استفاده از فولاد به تنهایی در ساختن ستون‌ها بخصوص در سازه‌های بلند می‌تواند غیراقتصادی باشد. همچنین سازه‌های بلند با ستون‌های فولادی معمولاً دارای تغییرشکل‌های نسبتاً بزرگ تحت بارهای جانبی بوده و در مقابل آتش‌سوزی مقاومت پایینی دارند. البته استفاده از بتن تنها در ستون‌های ساختمان‌های بلند در طبقات پائین فضای بیشتری را اشغال نموده و دارای وزن نسبتاً بیشتری است و به علت ترد و شکننده بودن بتن، سازه حاصل دارای شکل‌پذیری کمتری بوده و در بارهای لرزه‌ای افت مقاومت در سازه به وجود خواهد آمد. ترکیب هوشمندانه این دو مصالح، یک سیستم موثر و کارا تر از استفاده مجزا از آن‌ها را نتیجه می‌دهد.

ستون‌های دوجداره فولادی پر شده با بتن (CFDST¹) نوعی از ستون‌های مرکب می‌باشند، که از دو جداره فولادی با مقطع دایره‌ای یا مربع مستطیلی شکل تشکیل شده و به صورت هم مرکز مونتاژ می‌شوند و بین دو جداره آن با بتن پرمی‌گردد (شکل ۱). ستون‌های دوجداره فولادی پر شده با بتن دارای مزایایی همچون سختی و استحکام بالا، قابلیت شکل‌پذیری مناسب، ظرفیت جذب انرژی زیاد و عملکرد بهتر آن در بارگذاری‌های چرخه‌ای و بهبود عملکرد لرزه‌ای، مقاومت بیشتر در برابر آتش‌سوزی و حریق و ساخت سریع و اقتصادی می‌باشند. [۱،۲،۳،۴،۵]

در شرایط ظرفیت باربری یکسان، ستون‌های دوجداره فولادی پر شده با بتن در مقایسه با ستون‌های فولادی تک جداره پر شده با بتن دارای وزن کمتری می‌باشند، همچنین دارای سختی خمشی، استحکام، شکل‌پذیری، قابلیت جذب انرژی و عملکرد لرزه‌ای بالایی می‌باشند [۶،۷]. [۸،۹،۱۰،۱۱]

مطالعه بر روی این ستون‌ها از سال ۱۹۶۰ برای مشخص نمودن رفتار آن‌ها شروع شد. هان و همکاران [۱۲] در سال ۲۰۰۶ به بررسی رفتار ستون‌های دوجداره فولادی پر شده با بتن، تحت بارگذاری محوری و چرخه‌ای خمشی پرداختند. نتایج حاصل از این آزمایش نشان داد که در حالت کلی استهلاک انرژی و شکل‌پذیری در نمونه‌های دایروی بیشتر از نمونه‌های مستطیلی می‌باشد. عابدی و همکاران [۱۳] در سال ۲۰۰۸ مقاله‌ای با عنوان رفتار یک مقطع جدید از ستون‌های فولادی پر شده با بتن تحت بارگذاری محوری (با استفاده از برشگیرها در داخل لوله فولادی) ارائه شد، که طرح مقطع جدید پیشنهادی، موجب افزایش شکل‌پذیری و ظرفیت باربری بیشتری در ستون‌های تک جداره فولادی پر شده با بتن به علت افزایش محبوس‌شدگی توسط سخت‌کننده‌ها گردید. در مطالعه دیگری توسط دینگ و همکاران [۱۴] در سال ۲۰۱۸ به مقایسه ستون‌های تک جداره فولادی پر شده با بتن در شکل محصورکننده‌های متفاوت در داخل لوله فولادی پرداخته است، در این مطالعه ستون‌های تک جداره فولادی پر شده با بتن (CFST) با سه نوع محصورکننده داخلی شامل میلگردهای حلقوی، میلگردهای متعامد و میلگردهای قطری می‌باشد. هدف از این تحقیق بررسی تاثیر نوع میلگردهای به کار رفته و نیز مقدار آنها بر نحوه رفتار ستون مورد ارزیابی قرار گرفته است. طوریکه نتایج نشان داد استفاده از میلگردهای محصورکننده در داخل لوله فولادی تاثیر بسزایی در ظرفیت باربری ستون‌های تک جداره فولادی پر شده با بتن را دارد. لی و همکاران [۱۵] در سال ۲۰۱۹ رفتار چند نمونه از ستون‌های کوتاه دوجداره فولادی پر شده با بتن تحت بار محوری فشاریکه جداره خارجی ستون‌ها نیز از نوع فولاد با مقاومت بالا می‌باشد، مورد مطالعه قرار گرفت، طوریکه نتایج نشان داد استفاده از فولاد با مقاومت بالا در جداره خارجی تاثیر بسزایی در افزایش مقاومت و شکل‌پذیری این نوع از ستون‌ها را دارد. دنگ و همکاران [۱۶] در سال ۲۰۲۱ به بررسی ستون‌های کوتاه دوجداره فولادی پر شده با بتن به شکل مخروط تحت بار محوری فشاری پرداختند که نتایج نشان داد با کاهش میزان توخالی بودن ستون (نسبت شعاع لوله فولادی داخلی به لوله فولادی خارجی) و یا با افزایش ضخامت جداره لوله فولادی خارجی، سختی و مقاومت نهایی این نوع از ستون‌ها بهبود یافته است.

نسبت شعاع لوله فولادی داخلی به لوله فولادی خارجی تاثیر بسزایی در شکل پذیری این نوع از ستون‌ها دارد. همچنین در مقابل، با افزایش زاویه مخروطی از ۱،۱۳ درجه به ۱،۹۲ درجه، شاخص مقاومت و شاخص شکل پذیری تنها به ترتیب ۱،۷ و ۱،۹ درصد کاهش می‌یابد. جونچانگ و همکاران نیز [۱۷] در سال ۲۰۲۱ ستون‌های فولادی دوجداره پر شده با بتن تحت بار فشاری غیر هم محور را مورد بررسی قرار داده‌اند، طوریکه در مطالعه مذکور ستون‌ها به سه گروه تقسیم بندی شده است، ستون‌های فولادی دوجداره پر شده با بتن طوریکه کل ستون با بتن پر شده است، ستون‌های فولادی دوجداره پر شده با بتن به نحوی که لوله فولادی داخلی توخالی و بتن فقط مابین جداره دو لوله می‌باشد و نهایتاً ستون‌های فولادی تک جداره پر شده با بتن که نتایج نشان داد ستون‌های فولادی دوجداره پر شده با بتن طوریکه کل ستون با بتن پر شده است دارای مقاومت نهایی، شکل پذیری و سختی اولیه بسیار بالایی نسبت به دو نوع دیگر ستون‌ها تحت بار فشاری غیر هم محور را دارد.

ستون‌های دوجداره فولادی پر شده با بتن به لحاظ ساخت بسیار شبیه ستون‌های فولادی تک جداره پر شده با بتن هستند، پدیده آتش نیز همانند سایر بارهای موجود در طبیعت، ذهن طراحان و سازندگان را به خود معطوف کرده است، زیرا فولاد در برابر آتش بخش عظیمی از مقاومت خود را از دست می‌دهد. شکسته بند و همکاران [۱۸] در سال ۲۰۲۰ به بررسی رفتار ستون‌های دوجداره فولادی پر شده با بتن دارای سخت کننده‌های قائم تحت بارگذاری چرخه‌ای و سپس اعمال بارگذاری آتش پرداخته است، نتایج نشان داد افزایش سطح مقطع تیوب فولادی خارجی به منظور تقویت آن باعث کاهش زمان مقاومت ستون در برابر آتش می‌شود. از طرفی وجود و یا عدم وجود خرابی ناشی از زلزله، از مواردی بود که زمان مقاومت در برابر آتش ستون‌های فولادی دوجداره پر شده با بتن مورد بررسی قرار گرفته است. دریافت پسماند و کمانش موضعی تیوب فولادی خارجی از جمله خرابی‌های ناشی از زلزله می‌باشد که تاثیر جزئی در زمان مقاومت ستون‌های تقویت شده دوجداره فولادی پر شده با بتن در مواجهه با آتش را دارد، اما باعث کاهش زمان مقاومت ستون‌های تقویت نشده می‌شود.

هو و همکاران در سال ۲۰۱۴ [۱۹] با در نظر گرفتن رینگ‌های فولادی دور ستون‌های دو جداره فولادی پر شده با بتن توانستند مقاومت، سختی و شکل پذیری این ستون‌ها را توسط خاصیت محصورکنندگی خارجی رینگ‌های فولادی بهبود دهند. فراهانی و حیدرپور [۲۰] در سال ۲۰۱۶ مطالعه‌ای با استفاده از ورق‌های چین دار چندضلعی فولادی در جداره داخلی (شکل مقطع جداره داخلی) در ستون‌های دو جداره فولادی پر شده با بتن باعث افزایش نسبی در ظرفیت باربری نهایی این نوع از ستون‌ها به علت افزایش سطح تماس بتن و فولاد و نیز افزایش تنش محصورکنندگی به تبع آن انجام یافت. یوناکا و همکاران [۲۱] در سال ۲۰۱۶ رفتار ستون‌های دوجداره فولادی پر شده با بتن با مقطع دایروی در لایه بیرونی و مقطع مربع در لایه داخلی را بررسی کردند که نتایج نشان داد نمونه‌هایی که فولاد بیشتری دارند دارای مقاومت بیشتری بوده ولی شکل پذیری آن‌ها کمتر است.

وجه تمایز این تحقیق نسبت به سایر مطالعات استفاده از سخت کننده‌های قائم و میلگردهای حلقوی در ستون‌های دوجداره فولادی پر شده با بتن بوده و نیز مقایسه آن‌ها با مقطع ساده (بدون سخت کننده) ستون‌های دوجداره فولادی پر شده با بتن است. همچنین میزان تاثیر سخت کننده‌های قائم و میلگردهای حلقوی در جذب انرژی، سختی و شکل پذیری این نوع از ستون‌ها مورد بحث و مطالعه قرار گرفته است.

۲- طرح مقطع پیشنهادی (مقطع تقویت شده)

اگرچه ستون‌های با مقطع مختلط فولاد-بتن در ساختمان‌ها و دیگر سازه‌ها به‌طور 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 نگرسته 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 فرآیند طراحی این ستون‌ها است.

در سالیان اخیر، احداث ساختمان‌هایی با امنیت بالا در برابر شرایط ضربه، انفجار و آتش‌سوزی یک مسأله بسیار مهم در دنیا محسوب می‌شود. بنابراین یکی از راهکارهای مناسب در این زمینه، استفاده از ستون‌های مرکب فولادی-بتنی بوده، به طوری که در هسته ستون از بتن استفاده شود تا دوام و پایداری آن در برابر حرارت‌های بالا حفظ شود.

باتوجه به مزایای اشاره شده برای ستون‌های دوجداره فولادی پر شده با بتن، نقاط ضعفی نیز برای این نوع از ستون‌ها علی‌الخصوص در ساختمان‌هایی که از اهمیت بیشتری برخوردارند، وجود دارد. استفاده از اثرمحصورشدگی بتن میان دو لوله فولادی در ستون‌های دوجداره فولادی پر شده با بتن، با هدف بهبود خواص مقاومتی آن، یکی از نکات مهم در به‌کارگیری و طراحی سازه‌های بتن آرمه است، طوری که این ویژگی در مورد مقاطع بتن مسلح با استفاده از المان خاموت حاصل می‌گردد. اما نقطه ضعف این ستون‌ها در ازدست دادن محصورشدگی بتن در شرایط مانند ضربه (ناشی از برخورد کشتی‌ها به پایه‌های پل) انفجار، آتش‌سوزی و سایر عوامل محیطی است که منجر به زوال جداره خارجی لوله فولادی و متعاقباً افت ناگهانی مقاومت و تغییر رفتار آن‌ها می‌گردد. لذا در تحقیق حاضر با ارائه طرح پیشنهادی مقطع تقویت شده توسط فردوسی، در این نوع از ستون‌ها که در شکل ۲-ب می‌توان مشاهده نمود، منجر به بهبود رفتار لرزه‌ای ستون گردید.

۳- انتخاب مقاطع

مشخصات هندسی مقاطع درجداول ۱ و ۲ ارایه شده است. انتخاب ابعاد، طول و مشخصات هندسی (شکل ۱) و ضخامت جداره لوله‌های فولادی در ستون‌ها با توجه به امکانات آزمایشگاهی و مصالح موجود در بازار مدنظر قرار گرفته است. باتوجه به اینکه لوله‌های فولادی حتماً باید بدون درز بودند، و از طرفی باید مابین جداره دو لوله فولادی فضای کافی برای تعبیه کردن سخت‌کننده‌های قائم و حلقوی را داشت. میلگردهای حلقوی نیز به علت فضای کم موجود بین جداره‌های دو لوله فولادی حداقل سائز انتخاب گردیده است. از طرفی تعداد و طول عرضی سخت‌کننده‌های قائم نیز به نحوی انتخاب گردیده است که میلگردهای حلقوی با در نظر گرفتن حداقل کاور ۲ سانتی‌متری در دورتادور جداره داخلی لوله خارجی در داخل بتن به صورت کاملاً یکسان مدفون گردند. هدف از پیشنهاد این نوع از تقویت‌کننده‌ها، ایجاد یک لایه مازاد محافظی میان دو لوله (همانند مقطع بتنی مسلح) برای جلوگیری از افت ناگهانی مقاومت ستون به هنگام زوال جداره خارجی ستون است.

به منظور بررسی تاثیر مقاومت بتن پرکننده و میزان بارمحوری، لازم است که مقاطع فولادی پر شده با بتن برای هر مورد از پارامترها و با رعایت اصول آیین نامه‌ای طراحی گردد. شکل هندسی مقطع تقویت شده و ساده در شکل ۲ نشان داده شده است. مشخصات و ابعاد هندسی مقطع‌ها در جدول‌های ۱ و ۲ و ۳ ارایه شده است. در انتخاب مقاطع آزمایشگاهی (لوله‌های بدون درز موجود در بازار) دقت شده است که ابعاد و مشخصات آن مطابق با استانداردهای معتبر باشد. در هیچ یک از مقاطع نباید نسبت قطر لوله به ضخامت جداره‌ی آن از مقدار توصیه شده در آیین نامه AISC360-16 [۲۳] کمتر شود. (رابطه ۱)

$$D_o = 254, f_y = 311.6, E_s = 204958 \quad \text{برای جداره خارجی}$$

$$D_i = 101.6, f_y = 311.6, E_s = 204958 \quad \text{برای جداره داخلی}$$

$$\frac{D}{t} < 0.31 \left(\frac{E_s}{f_y} \right) \quad [23] \quad (1)$$

$$\frac{254}{6.3} < 0.31 \left(\frac{E_s}{f_y} \right) \quad ok \quad \text{برای جداره خارجی}$$

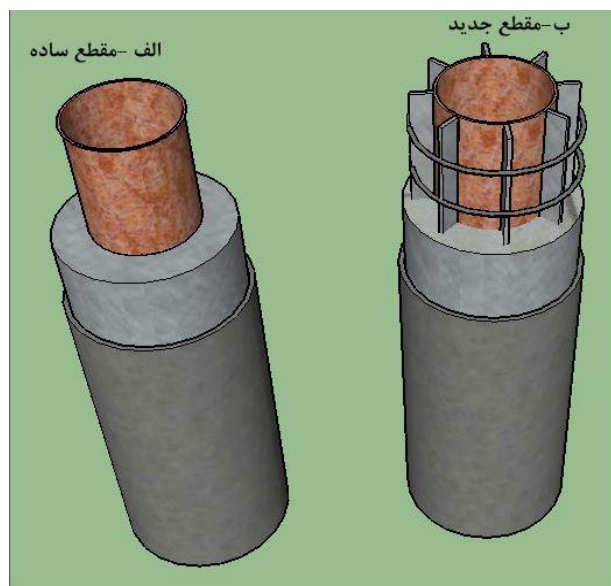
$$\frac{101.6}{4} < 0.31 \left(\frac{E_s}{f_y} \right) \quad ok \quad \text{برای جداره داخلی}$$



شکل ۱: مشخصات هندسی ستون های فولادی دوجداره پر شده با بتن

۴- برنامه آزمایشگاهی

باتوجه به این که مقاومت، شکل پذیری و در نتیجه جذب انرژی پارامترهای مهم در طراحی لرزه ای بشمار می آیند، در این تحقیق ضمن انجام آزمایش بارگذاری چرخه ای (یک جهت رفت و برگشتی) بر روی نمونه با مقطع ساده و با مقطع تقویت شده در ستون های دوجداره فولادی پر شده با بتن و صحت سنجی هر کدام از دو مقطع مذکور در نرم افزار عناصر محدود (آباکوس 6.14) به مقایسه رفتار لرزه ای هر دو مقطع ستون با یکدیگر و نیز تاثیر مقاومت های فشاری متفاوت بتن و نیز ضخامت های متفاوت جداره ی لوله های فولادی مورد بررسی قرار می گیرد.



شکل ۲: شکل مقطع ستون های دو جداره فولادی پر شده با بتن الف-مقطع ساده ب- مقطع تقویت شده

ساخت نمونه ها با دو مقطع ساده و تقویت شده مطابق شکل ۳ در آزمایشگاه سازه دانشگاه صنعتی سهند تبریز انجام و مورد آزمایش قرار گرفتند. در این آزمایش یک ستون دایروی دو جداره فولادی با مقطع ساده (شکل ۳-الف) و ستون دیگر با مقطع تقویت شده (شکل ۳-ب) که مابین دو لوله با بتن پر شده است. درپوش فلزی بالای لوله داخلی به علت عدم نفوذ بتن به داخل لوله و نیز میلگردهای انتظار جوش شده در انتهای لوله فولادی داخلی، موقتاً برای جابه جایی ستون توسط جرثقیل تعبیه گردیده است.



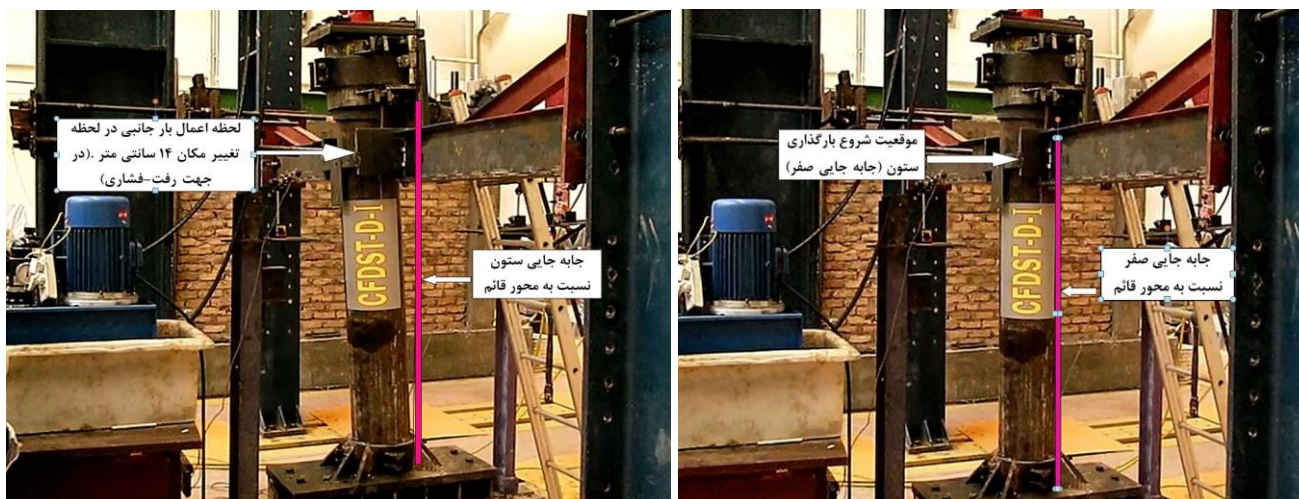
الف-مقطع ساده

ب-مقطع تقویت شده

شکل ۳: مقاطع آزمایشگاهی مورد مطالعه در ستون‌های دوجداره فولادی پر شده با بتن الف: مقطع ساده ب: مقطع تقویت شده

تجهیزات آزمایش شامل نمونه ستون‌ها، سیستم بارگذاری و قاب صلب می‌باشد. (شکل ۶-الف) بارچرخه‌ای جانبی [۲۴] با استفاده از یک جک افقی ۲۵۰ کیلونیوتنی از یک طرف ستون به صورت یک جهته رفت و برگشتی اعمال شده است، و از طرفی همزمان، بار محوری توسط یک جک قائم ۵۰۰ کیلونیوتنی به مرکز سطح یک ورق فولادی به ضخامت ۵ سانتی‌متر که کاملاً منطبق بر سطح مقطع ستون می‌باشد به صورت بارگسترده به ستون اعمال گردیده است (شکل ۵). اتصال مفصلی ورق فولادی به ضخامت ۵ سانتی‌متر به جک بالا به علت ایجاد قابلیت حرکت رفت و برگشتی ستون در اثر بارگذاری چرخه‌ای می‌باشد. هر چرخه بارگذاری شامل دو نیم چرخه می‌باشد. نیم چرخه اول از سمت چپ به راست و نیم چرخه دوم از سمت راست به چپ می‌باشد. با استفاده از دو دستگاه اندازه‌گیری تغییر مکان (LVDT) جابه‌جایی‌های ایجاد شده در اثر بارگذاری اندازه‌گیری و به وسیله یک دستگاه اتوماتیک ثبت شده‌اند. قبل از اعمال بار جانبی یک پیش‌فشار به میزان ۳۲۰ کیلونیوتنی (۱۰ درصد از ظرفیت محوری خالص ستون) برای شبیه‌سازی بارثقلی توسط جک بالایی به ستون به صورت یکنواخت (به صورت کنترل نیرو) اعمال گردیده است، سپس با ثابت ماندن مقدار پیش‌فشار، بار جانبی پروتکل به صورت چرخه‌ای به ستون اعمال می‌گردد (به صورت کنترل جابه‌جایی). لازم به ذکر است در جهت دیگر ستون (جهتی که بارگذاری چرخه‌ای اعمال نمی‌شود) دو طرف ستون توسط تکیه‌گاههایی که انتهای آنها غلطکی می‌باشد (مطابق شکل ۵)، مهار شده‌اند که بار جانبی رفت و برگشتی ستون دقیقاً در یک جهت مستقیم و بدون انحراف به جهات دیگر اعمال گردد.

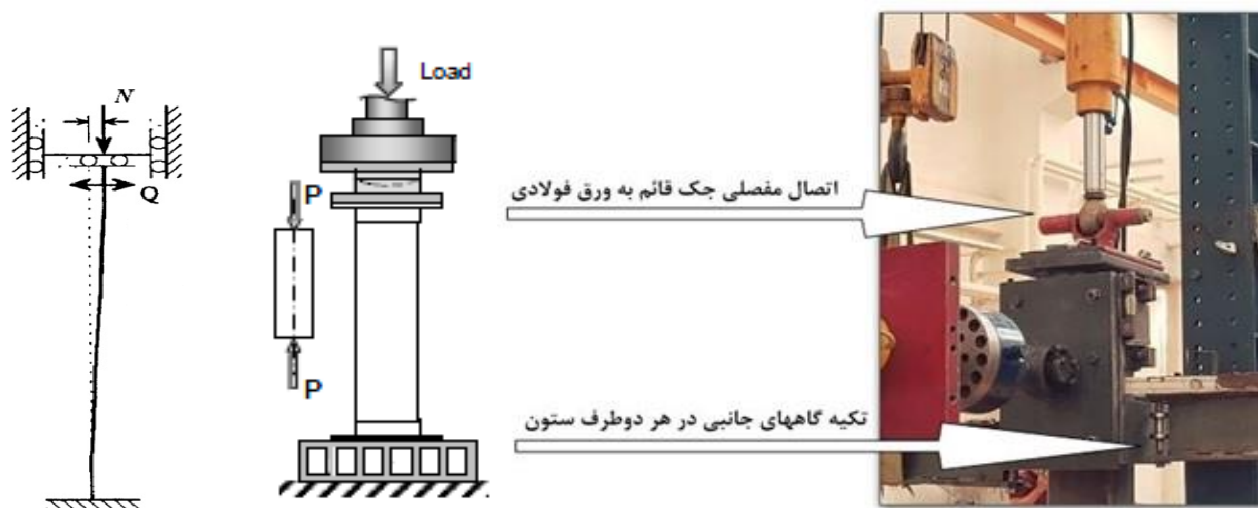
به علت محدودیت‌های آزمایشگاهی (امکان جابه‌جایی افقی جک اعمال کننده بار محوری تا ۱۴ سانتی‌متر به صورت رفت و برگشتی) بارگذاری جانبی تا بازه ۱۴ سانتی‌متر به صورت رفت و برگشتی اعمال گردیده است.



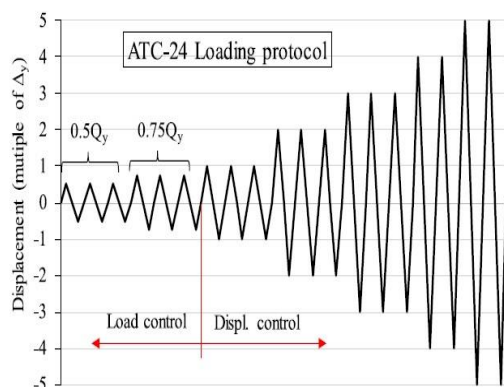
ب- لحظه اعمال بار جانبی در تغییر مکان ۱۴ سانتی متر

الف- لحظه شروع بارگذاری در جابه جایی صفر

شکل ۴: فازهای رفتاری نمونه آزمایش شده



شکل ۵: اعمال همزمان بار محوری بر روی هر دو سطح بتن و فولاد توسط ورق فولادی و شرایط تکیه گاهی تحلیلی



ب) پروتکل بارگذاری اعمالی

الف) برپایی و تجهیزات آزمایش

شکل ۶: تجهیزات آزمایش و بارگذاری، الف) برپایی و تجهیزات آزمایش ب) پروتکل بارگذاری اعمالی

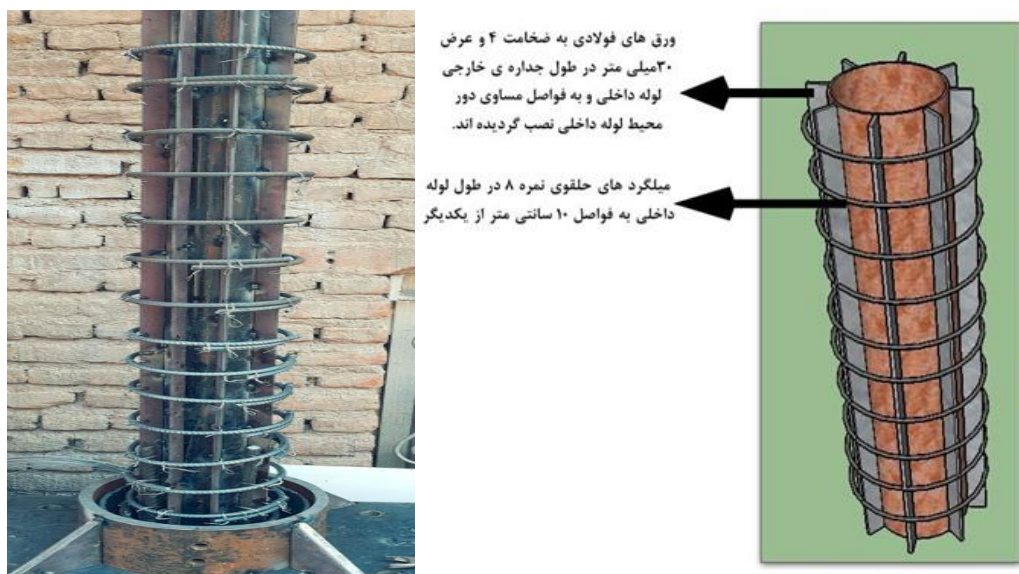
مقدار بار تراز محوری n توسط رابطه $(n=N_0/N_u)$ معرفی می‌شود که در آن N_0 معرف بار محوری موثر بر روی نمونه و N_u معرف ظرفیت فشاری محوری ستون است. مطابق با جداول ۱ و ۲ مشخصات هندسی مقاطع ارایه گردیده است. لازم به توضیح است تمامی مشخصات هندسی در جدول ۱ برای مقطع ساده شامل مقطع تقویت شده نیز بوده و فقط میلگردهای حلقوی و تسمه‌های فولادی (سخت‌کننده‌های قائم) در مشخصات مقطع تقویت شده اضافه شده‌اند (جدول ۲). لازم به ذکر است تمامی سخت‌کننده‌های قائم به صورت خال جوش به جداره لوله داخلی متصل گردیده‌اند، از طرفی میلگردهای حلقوی نیز با ایجاد سوراخکاری با قطر بسیار کم به وسیله سیم‌های آرماتور به سخت‌کننده‌های قائم متصل شده‌اند (مطابق شکل ۷). لذا تاثیر تنش پسماند ناشی از جوشکاری در ستون ناچیز می‌باشد.

جدول ۱: مشخصات هندسی نمونه آزمایشگاهی با مقطع ساده

نام نمونه	طول نمونه (mm)	ضخامت جداره‌ی لوله داخلی (mm)	ضخامت جداره‌ی لوله خارجی (mm)	قطر لوله خارجی (mm)	قطر لوله داخلی (mm)	$n=N_0/N_u$
CFDST-S-C	۲۰۰۰	۴	۶/۳	۲۵۴	۱۰۱/۶	۰/۱

جدول ۲: مشخصات هندسی نمونه آزمایشگاهی با مقطع تقویت شده

نام نمونه	سایز میلگردهای حلقوی (Φ)	فواصل میلگردهای حلقوی (mm)	ابعاد هندسی تسمه‌های فولادی دور تادور جداره‌ی خارجی لوله داخلی			
			تعداد	ضخامت (mm)	عرض (mm)	طول (mm)
CFDST-D-C	۸	۱۰۰	۲۰۰۰	۳۰	۴	۸

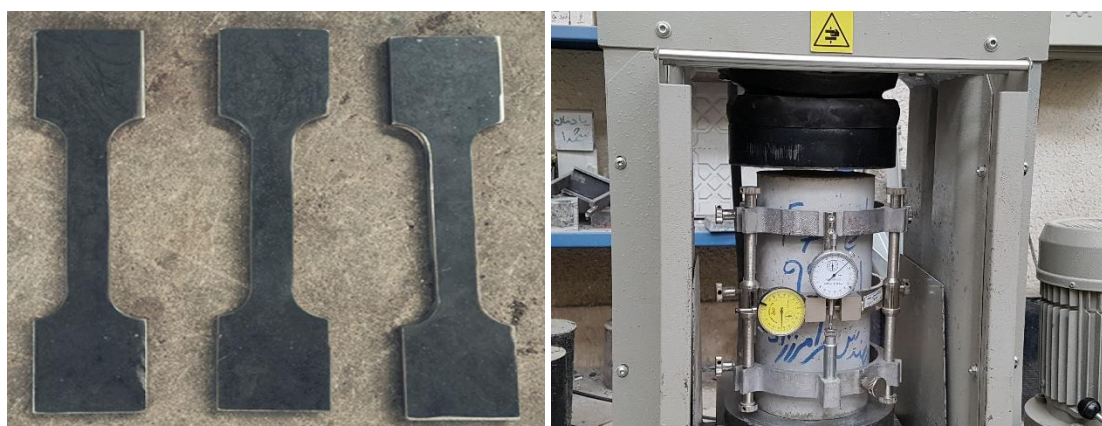


شکل ۷: طرح مقطع تقویت شده

برای بدست آوردن خواص مصالح بکارفته از جمله فولاد و بتن به ترتیب مطابق با استانداردهای ASTM-E8 [۲۵] و ASTM-C39 [۲۶] آزمایشات لازم انجام یافته است. برای تست کشش فولاد از ۳ نمونه فولادی که از جنس جداره لوله ها می باشند، انجام گردیده است که خواص مکانیکی فولاد در جدول شماره ۳ خلاصه شده است، ۳ نمونه استوانه ای بتنی نیز پس از رسیدن به سن ۲۸ روزه تحت آزمایش فشار قرار گرفتند (شکل ۸-الف)، طوریکه میانگین مقاومت فشاری بتن از نمونه های برداشت شده برابر ۳۳ مگاپاسکال می باشد (جدول ۳). در مقطع تقویت شده نیز میلگردهای حلقوی از نوع میلگرد آجدار رده S400 ($F_y=400 \text{ MPa}$)، و تسمه های فولادی دور لوله داخلی از نوع ST-37 ($F_y=240 \text{ MPa}$) می باشد.

جدول ۳: مشخصات مصالح نمونه های آزمایشگاهی و پارامترهای مدل سازی بتن

مشخصات لوله های فولادی			مشخصات بتن		
F_y (MPa)	E_s (MPa) میانگین	ν	F_c (MPa)	E_c (MPa)	ν
۳۱۱/۶	۲۰۴۹۵۸	۰/۳	۳۳	۲۲۰۰۰	۰/۲



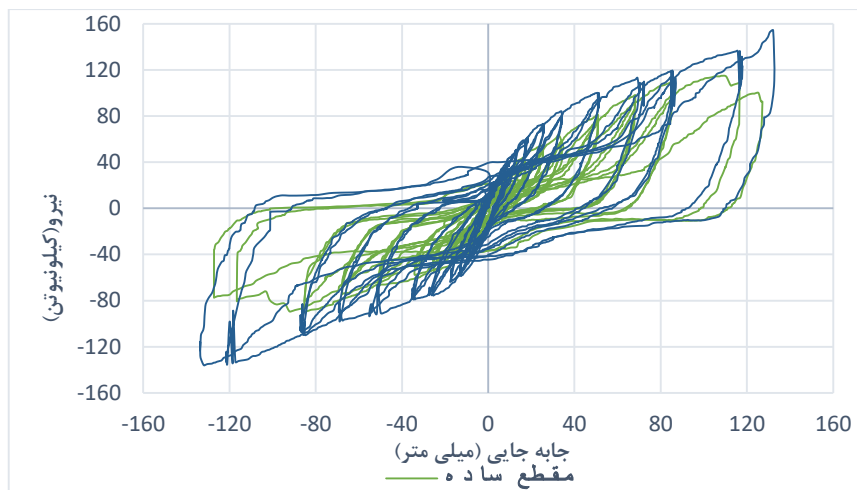
ب: نمونه های فولادی از جداره لوله ها

الف: نمونه های بتنی استوانه ای

شکل ۸: نمونه های بتنی و فولادی برای تست خواص مصالح مصرفی [۲۵ و ۲۶]

۵- نتایج آزمایشگاهی

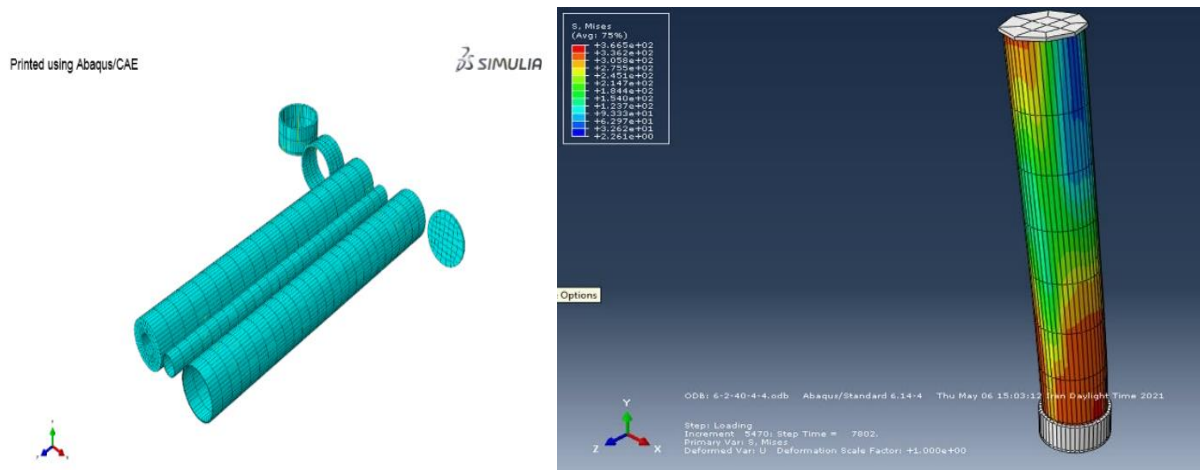
نمودارهای چرخه‌ای بار تغییرمکان و نتایج به دست آمده از آزمایش برای هر دو مقطع ساده و تقویت شده در شکل ۹ نشان داده شده است. با مقایسه هر دو نمودار می‌توان نتیجه گرفت بهبود قابل ملاحظه‌ای در رفتار منحنی بارگذاری چرخه‌ای ستون با مقطع تقویت شده در مقایسه با مقطع ساده می‌باشد، به طوری که تنها ظرفیت باربری ستون با مقطع تقویت شده در مقایسه با مقطع ساده در یک تغییرمکان یکسان ۲۵ درصد افزایش یافته است.



شکل ۹: مقایسه منحنی‌های بارگذاری چرخه‌ای نمونه آزمایشگاهی مقطع ساده و مقطع تقویت شده

۶- مدل‌سازی عددی

یکی از روش‌های عددی که به دلیل سرعت و دقت بالا و هزینه کم نسبت به سایر روش‌ها رواج بیشتری دارد، روش اجزای محدود است. ولی درستی مدل‌سازی اجزای محدود مورد استفاده باید با نتایج آزمایشگاهی تأیید شود. در این پژوهش با استفاده از روش اجزای محدود نرم افزار آباکوس آزمایش انجام یافته مورد بررسی و صحت سنجی قرار گرفت. برای مدل‌سازی اعضاء از جزء Solid و شبکه هشت-گره‌ای C3D8R استفاده شده است. اصطکاک و لغزش بین فولاد و هسته‌ی بتنی توسط تماس سطح به سطح (SURFACE TO SURFACE) مدل‌سازی شده است. این تماس اجازه‌ی جدا شدن دو سطح از یکدیگر را داده و مانع فرورفتن آنها در یکدیگر می‌شود. در این تحقیق طبق توصیه لام و همکاران [۲۷] مشخصات سطح تماس در راستای مماس بر سطح از نوع اصطکاک کولمب با ضریب ۰/۳ در نظر گرفته شده است.



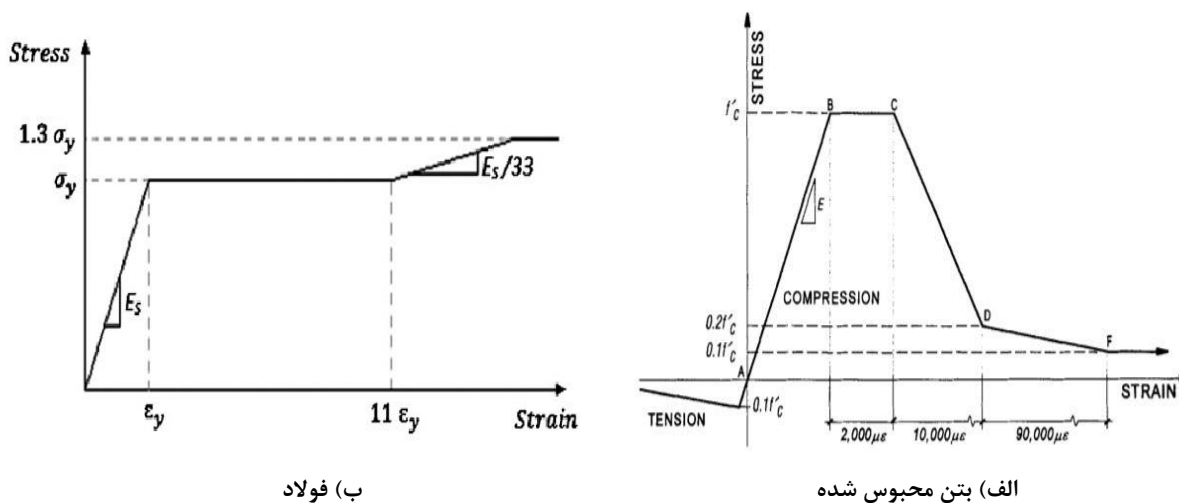
شکل ۱۰: مدل سازی در نرم افزار آباکوس

در کتابخانه مصالح از پیش تعریف شده‌ی نرم افزار آباکوس از میان سه نوع مدل رفتاری مختلف ارائه شده برای خصوصیات بتن، مدل رفتاری بتن آسیب دیده پلاستیک [۲۸] مطابق جدول ۴ جهت مدل سازی بتن پرکننده داخل مقطع استفاده گردیده است. برای تعریف مدل رفتاری بتن آسیب دیده پلاستیک پارامترهای زاویه‌ی اتساع، خروج از مرکزیت، نسبت مقاومت فشاری دو محوره به یک محور (F_{b0}/f_{c0})، نسبت جریان تنش (k) و ویسکوزیته مورد نیاز است که مقادیر آن مطابق جدول ۴ در نظر گرفته شده است. برای اعمال رفتار مصالح فولادی در بارگذاری چرخه‌ای از حالت غیرخطی سینماتیک دو خطی و برای تعریف سطح تسلیم از معیار خرابی فون-میسز^۳ و نیز برای حل مسائل غیرخطی (غیرخطی هندسی و مصالح) از الگوریتم حل تکراری نیوتن-رافسون^۴ استفاده شده است.

جدول ۴: پارامترهای مدل رفتاری Damage Plasticity [۲۸]

Dilation angle	Eccentricity	F_{b0}/F_{c0}	K	Viscosity Parameter
۳۶	۰/۱	۱/۱۶	۰/۶۷	۰/۰۱

مشخصات مصالح بتن در محدوده تغییر شکل‌های پلاستیک مطابق شکل (۱۱-الف) و همچنین نمودار تنش-کرنش اعمالی به مصالح فولادی مطابق شکل (۱۱-ب) می‌باشد. [۲۹]

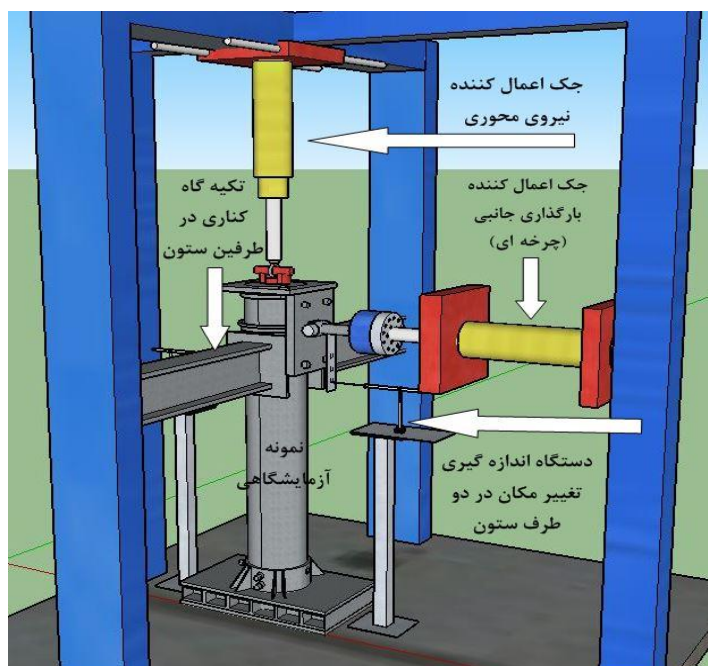


ب) فولاد

الف) بتن محبوس شده

شکل ۱۱: رفتار مصالح بکار رفته در مدل ستون‌ها (الف) بتن محبوس شده و (ب) فولاد

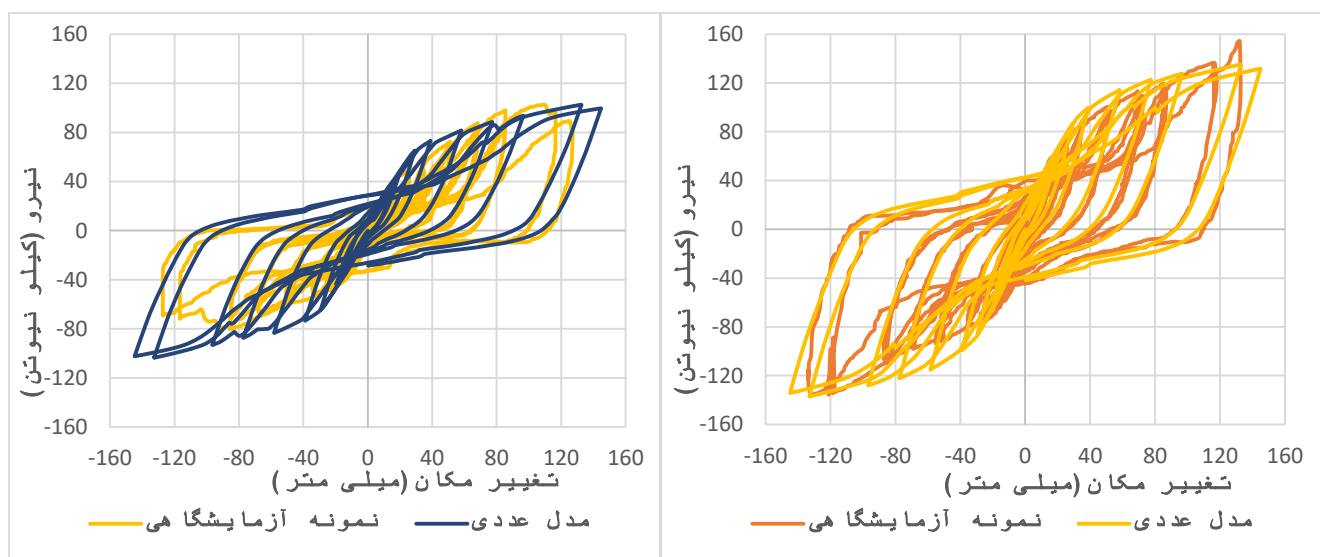
نمونه‌ها به صورت کنسول قائم مدل شده (شکل ۵) و همان گونه که اشاره شد ستون‌ها در انتهای آزاد تحت بار محوری تا $P_0 = A_s F_y (\times) 0.1 P_0$ و با بار جانبی افزایشی به صورت کنترل تغییر مکان و رفت و برگشتی یک جهته قرار گرفتند [۲۴ و ۲۲].



شکل ۱۲: مدل شماتیک از ستاپ آزمایشگاهی

۷- نتایج به دست آمده از تحلیل‌های عددی

پس از صحت‌سنجی هر دو مقطع در نرم‌افزار آباکوس با داده‌های آزمایشگاهی مطابق شکل ۱۳-الف برای ستون با مقطع تقویت شده و شکل ۱۳-ب برای ستون با مقطع ساده انجام گردید.



ب) مقطع ساده

الف) مقطع تقویت شده

شکل ۱۳: صحت‌سنجی نمودارهای داده‌های آزمایشگاهی با تحلیل‌های عددی الف-مقطع تقویت شده ب-مقطع ساده

در شکل ۱۳، منحنی‌های مربوط به روش تحلیلی عناصر محدود نشان دهنده سختی بیشتر نسبت به نتایج تجربی است که می‌تواند به دلیل اختلاف در مقاومت و رفتار بتن و فولاد در عمل، محدود کردن تغییر شکل‌ها به منظور دست‌یابی به همگرایی و نیز وجود ناکاملی‌های جزئی - همراه تنش‌های پسماند ناشی از جوش در نمونه‌های واقعی باشد. البته ابعاد المان‌ها و مش‌بندی نیز تاثیرگذار است که سعی شده با تحلیل - های مقدماتی ابعاد مناسبی انتخاب شود. برای بررسی رفتار این نوع از ستون‌ها (با مقاطع ساده و تقویت شده) با در نظر گرفتن پارامترهای متفاوت مقاومت فشاری بتن و ضخامت جداره‌ها طبق جدول ۵ مدلسازی صورت گرفته است، لازم به ذکر است قطر لوله‌های فولادی داخلی و خارجی در تمامی نمونه‌های تحلیلی ثابت می‌باشد.

مطابق جداول شماره ۵ و ۶ مشخصات نمونه‌های تحلیلی برای هر دو مقطع ساده و تقویت شده ارائه گردیده است، طوری که برای مطالعه اثر تغییر پارامترهای ضخامت جداره‌ی فولادی و مقاومت فشاری بتن در هر نوع مقطع ساده و تقویت شده، جمعاً ۱۸ نمونه تحلیلی مورد بررسی قرار گرفته است. لازم به ذکر است در نمونه‌های تحلیلی ضخامت هر دو جداره لوله داخلی و خارجی با هم یکسان در نظر گرفته شده - است.

۱۸ نمونه تحلیلی در هر دو نوع مقطع در ۳ نوع مقاومت فشاری بتن در رده‌های ۲۰ و ۳۰ و ۴۰ مگاپاسکال و جداره‌ی فولادی لوله‌ها نیز در ۳ ضخامت ۲ و ۳ و ۴ میلی‌متر مورد بررسی قرار گرفت.

جدول ۵: مشخصات نمونه‌های تحلیلی بررسی شده برای مقطع ساده

نام نمونه	مقاومت فشاری بتن (مگاپاسکال)	ضخامت جداره لوله داخلی (میلی‌متر)	ضخامت جداره لوله خارجی (میلی‌متر)	طول نمونه (میلی‌متر)
CFDST-S-20-T1	۲۰	۲	۲	۲۰۰۰
CFDST-S-20-T2	۲۰	۳	۳	۲۰۰۰
CFDST-S-20-T3	۲۰	۴	۴	۲۰۰۰
CFDST-S-30-T1	۳۰	۲	۲	۲۰۰۰
CFDST-S-30-T2	۳۰	۳	۳	۲۰۰۰
CFDST-S-30-T3	۳۰	۴	۴	۲۰۰۰
CFDST-S-40-T1	۴۰	۲	۲	۲۰۰۰
CFDST-S-40-T2	۴۰	۳	۳	۲۰۰۰
CFDST-S-40-T3	۴۰	۴	۴	۲۰۰۰

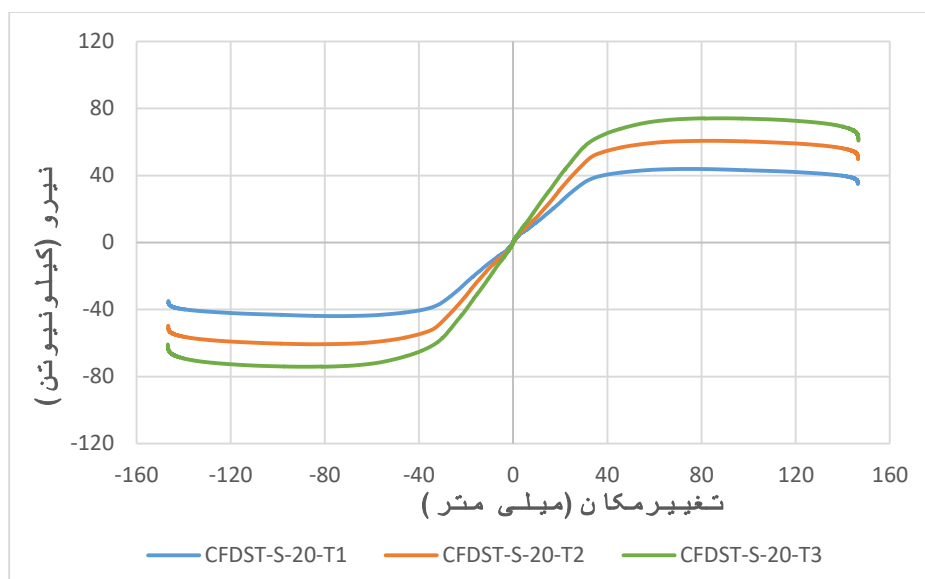
جدول ۶: مشخصات نمونه‌های تحلیلی بررسی شده برای مقطع تقویت شده

طول نمونه (میلی‌متر)	ضخامت جداره لوله خارجی (میلی‌متر)	ضخامت جداره لوله داخلی (میلی‌متر)	مقاومت فشاری بتن (مگاپاسکال)	نام نمونه
۲۰۰۰	۲	۲	۲۰	CFDST-D-20-T1
۲۰۰۰	۳	۳	۲۰	CFDST-D-20-T2
۲۰۰۰	۴	۴	۲۰	CFDST-D-20-T3
طول نمونه (میلی‌متر)	ضخامت جداره لوله خارجی (میلی‌متر)	ضخامت جداره لوله داخلی (میلی‌متر)	مقاومت فشاری بتن (مگاپاسکال)	نام نمونه
۲۰۰۰	۲	۲	۳۰	CFDST-D-30-T1
۲۰۰۰	۳	۳	۳۰	CFDST-D-30-T2
۲۰۰۰	۴	۴	۳۰	CFDST-D-30-T3
۲۰۰۰	۲	۲	۴۰	CFDST-D-40-T1
۲۰۰۰	۳	۳	۴۰	CFDST-D-40-T2
۲۰۰۰	۴	۴	۴۰	CFDST-D-40-T3

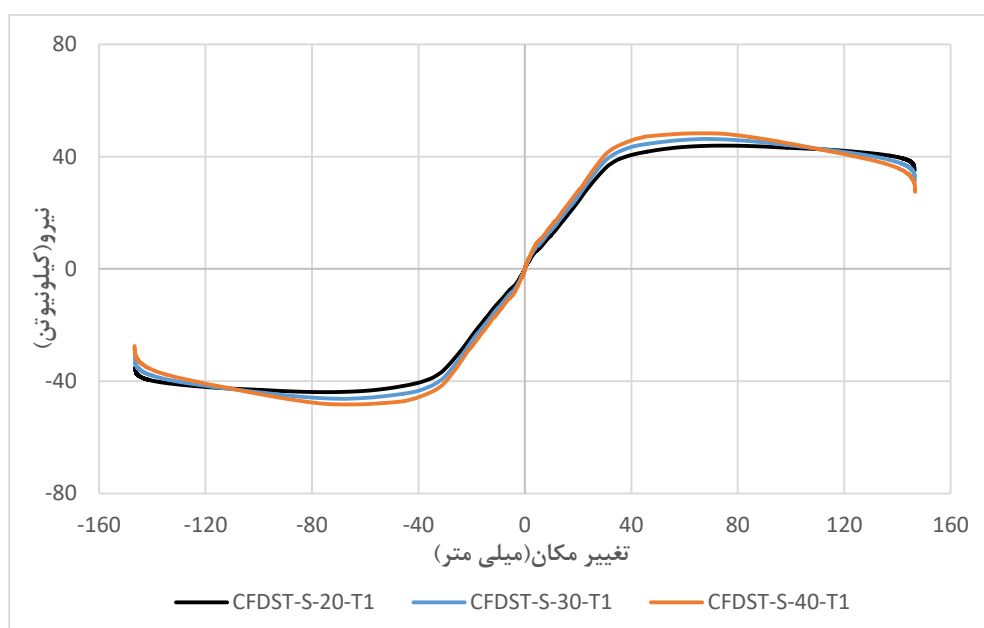
نمودار چرخه‌ای (نیرو-تغییر مکان) چندین مدل جهت مقایسه مقاطع با یکدیگر آورده شده است. به عنوان مثال برای مقایسه تاثیر ضخامت جداره‌ی فولادی در شکل مقطع ساده، ۳ نمونه تحلیلی با مقاومت فشاری ۲۰ مگاپاسکال ولی با ضخامت جداره‌های ۲ و ۳ و ۴ میلی‌متری همانند شکل ۱۴ و از طرفی با ثابت نگه داشتن ضخامت جداره‌ها به اندازه ۲ میلی‌متر در ۳ نمونه تحلیلی با مقطع ساده و مقاومت‌های فشاری بتن ۲۰ و ۳۰ و ۴۰ مگاپاسکال نتایج همانند شکل ۱۵ مورد بررسی و مقایسه قرار گرفتند.

در شکل ۱۴ نمودارهای پوش مربوط به ستون با مقطع ساده و به ضخامت‌های متفاوت T_1 و T_2 و T_3 و با مقاومت فشاری یکسان، نشان داد به ازای افزایش یک میلی‌متر از ضخامت جداره لوله‌ها میزان باربری ستون‌ها در شرایط مذکور به طور میانگین ۳۰ درصد افزایش می‌یابد.

در شکل ۱۵ نمودارهای پوش مربوط به ستون با مقطع ساده و به مقاومت‌های فشاری ۲۰ و ۳۰ و ۴۰ مگاپاسکال و با ضخامت جداره یکسان ۲ میلی‌متر لوله‌ها، نشان داد افزایش مقاومت فشاری بتن در شرایط مذکور تنها به طور میانگین ۷ درصد میزان باربری ستون را افزایش می‌دهد بنابراین می‌توان گفت در ستون با مقطع ساده تاثیر افزایش ضخامت جداره‌ها به مراتب بیشتر از افزایش مقاومت فشاری بتن است.



شکل ۱۴) مقایسه نمودارهای پوش مقطع ساده با ضخامت‌های متفاوت و مقاومت ثابت فشاری بتن

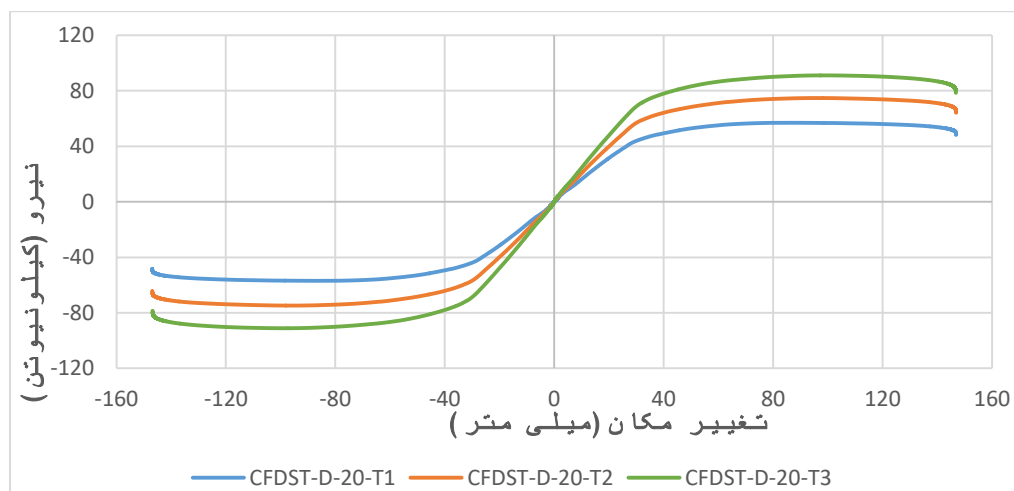


شکل ۱۵) مقایسه نمودارهای پوش مقطع ساده با ضخامت‌های ثابت و مقاومت متفاوت فشاری بتن

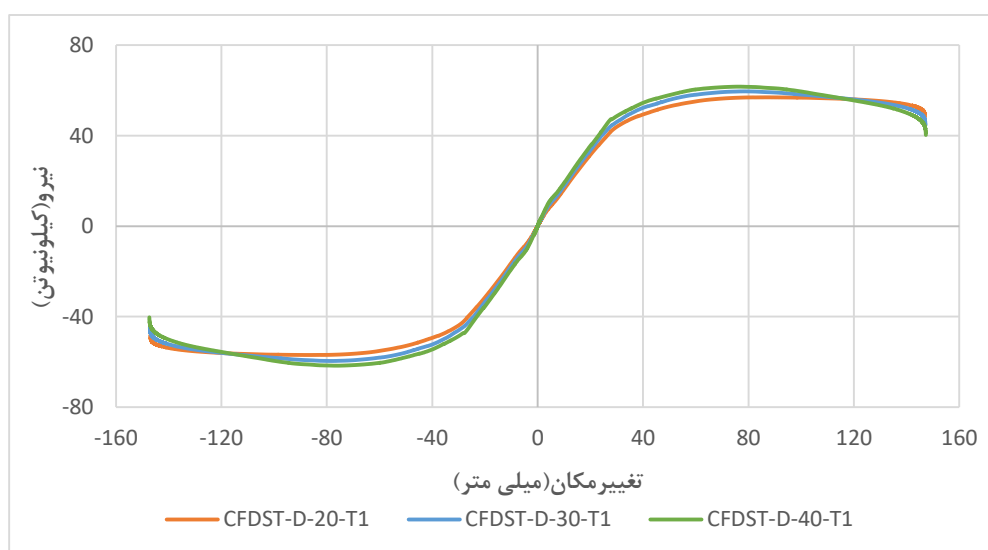
همچنین در مقطع تقویت شده با مقایسه ۳ نمونه تحلیلی با مقاومت فشاری ثابت و ضخامت جداره‌ی متفاوت و برعکس با ضخامت جداره‌ی ثابت و مقاومت فشاری متفاوت، نتایج همانند نمودارهای شکل ۱۶ و ۱۷ ارایه گردید.

در شکل ۱۶ نمودارهای پوش مربوط به ستون با مقطع تقویت شده با ضخامت جداره‌های متفاوت، نشان داد T_1 و T_2 و T_3 و با مقاومت فشاری یکسان نشان داد به ازای افزایش یک میلی‌متر از ضخامت جداره لوله‌ها میزان باربری ستون‌ها در شرایط مذکور به طور میانگین ۱۸ درصد افزایش می‌یابد.

در شکل ۱۷ نمودارهای پوش مربوط به ستون با مقطع تقویت شده و به مقاومت‌های فشاری ۲۰ و ۳۰ و ۴۰ مگاپاسکال و با ضخامت جداره یکسان ۲ میلی‌متر لوله‌ها، نشان داد افزایش مقاومت فشاری بتن در شرایط مذکور تنها به طور میانگین ۵ درصد میزان باربری ستون را افزایش می‌دهد بنابراین می‌توان گفت در ستون با مقطع تقویت شده تاثیر افزایش ضخامت جداره‌ها به مراتب بیشتر از افزایش مقاومت فشاری بتن است. در نتیجه تاثیر افزایش ضخامت جداره لوله‌ها در ستون با مقطع ساده بر ظرفیت باربری ستون، بیشتر از افزایش ضخامت جداره‌ها در ستون با مقطع تقویت شده می‌باشد.



شکل ۱۶) مقایسه نمودارهای پوش مقطع تقویت شده با ضخامت‌های جداره‌ی متفاوت و مقاومت ثابت فشاری بتن



شکل ۱۷) مقایسه نمودارهای پوش مقطع تقویت شده با ضخامت‌های جداره‌ی ثابت و مقاومت فشاری بتن متفاوت

۱-۷- اثر تغییر مقاومت فشاری بتن و ضخامت فولاد بر میزان جذب انرژی

به منظور بررسی عملکرد ستون‌های مورد مطالعه تحت بارگذاری چرخه‌ای، از پارامتر جذب انرژی ستون تحت بار چرخه‌ای استفاده می‌گردد. میزان جذب انرژی ستون در هر چرخه، با مساحت سطح محصور ایجاد شده توسط منحنی تغییر مکان جانبی-برش در منحنی پسماند ستون معرفی می‌گردد، که بیانگر عملکرد ستون تحت بار چرخه‌ای می‌باشد و هر چه این مقدار بیشتر باشد، عملکرد ستون تحت بار چرخه‌ای بهتر و میزان مقاومت ستون بیشتر می‌باشد. با افزایش مقاومت بتن، شکل پذیری و جذب انرژی سازه‌های بتنی کاهش می‌یابد،

ولی در ستون‌های CFDST به علت محصوریت ایجاد شده برای بتن توسط جداره دو لوله باعث افزایش مقاومت و جذب انرژی می‌گردد (جدول ۷ و ۸)، و ضعف بتن در مقاومت‌های بالا را افزایش می‌دهد. (ترد بودن بتن در مقاومت‌های بالا با محصوریت ایجاد شده توسط جداره‌ی لوله‌ها تا حدودی بهبود می‌یابد)

به منظور مقایسه بهتر و کلی در هر مقطع نمونه‌های B-CFDST-S-20-T1 (مقطع ساده) و B-CFDST-D-20-T1 (مقطع تقویت شده) به عنوان نمونه مینا انتخاب گردیدند تا سایر نمونه‌ها نسبت به آنها مقایسه و بررسی گردد.

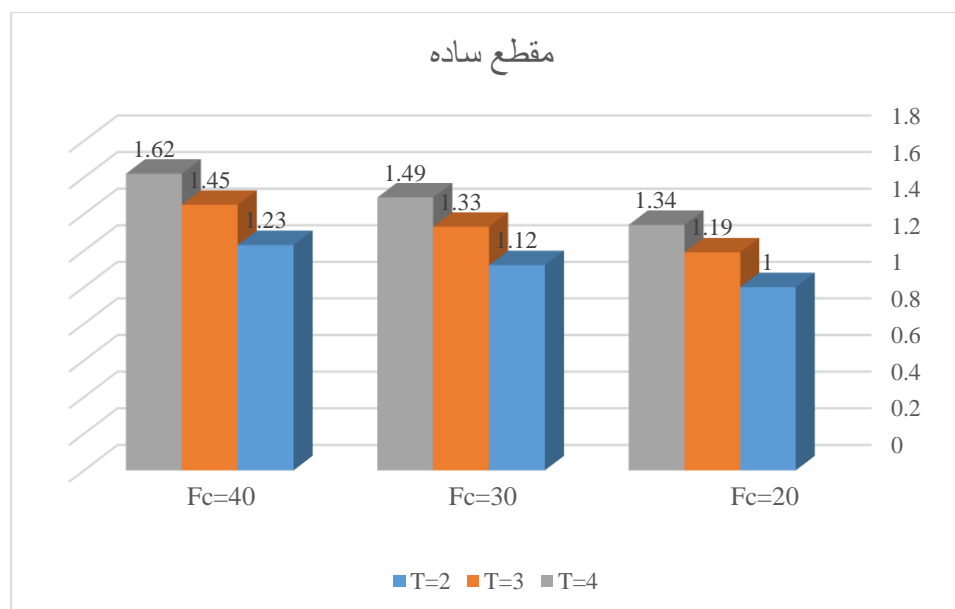
جدول ۷: مقادیر انرژی جذب شده در مقطع ساده

ردیف	نمونه	مقدار انرژی جذب شده (کیلو نیوتن-میلی متر)	مقدار انرژی جذب شده / مقدار انرژی جذب شده نمونه- مینا
۱	B-CFDST-S-20-T1	۴۷۰۷۲	۱
۲	CFDST-S-20-T2	۵۵۸۸۱	۱/۱۹
۳	CFDST-S-20-T3	۶۲۹۸۷	۱/۳۴
۴	CFDST-S-30-T1	۵۲۶۱۹	۱/۱۲
۵	CFDST-S-30-T2	۶۲۵۰۸	۱/۳۳
۶	CFDST-S-30-T3	۷۰۲۵۲	۱/۴۹
ردیف	نمونه	مقدار انرژی جذب شده (کیلو نیوتن-میلی متر)	مقدار انرژی جذب شده / مقدار انرژی جذب شده نمونه- مینا
۷	CFDST-S-40-T1	۵۷۷۵۸	۱/۲۳
۸	CFDST-S-40-T2	۶۸۴۰۳	۱/۴۵
۹	CFDST-S-40-T3	۷۶۲۷۳	۱/۶۲

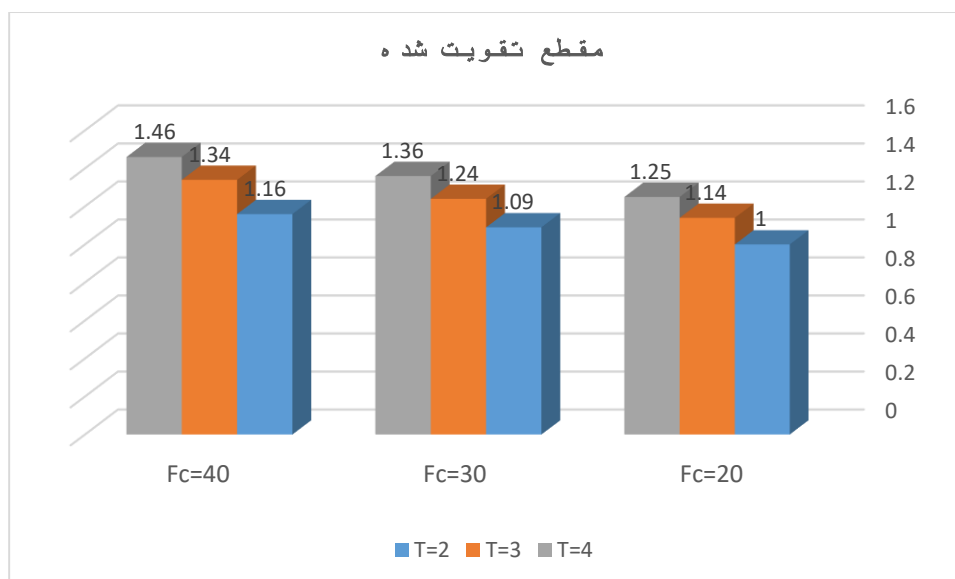
جدول ۸: مقادیر انرژی جذب شده در مقطع تقویت شده

ردیف	نمونه	مقدار انرژی جذب شده (کیلو نیوتن-میلی متر)	مقدار انرژی جذب شده / مقدار انرژی جذب شده نمونه- مینا
۱	B-CFDST-D-20-T1	۶۵۴۳۳	۱
۲	CFDST-D-20-T2	۷۴۴۹۹	۱/۱۴
۳	CFDST-D-20-T3	۸۱۹۷۳	۱/۲۵
۴	CFDST-D-30-T1	۷۱۲۵۹	۱/۰۹
۵	CFDST-D-30-T2	۸۱۴۳۴	۱/۲۴
۶	CFDST-D-30-T3	۸۸۹۹۱	۱/۳۶
۷	CFDST-D-40-T1	۷۵۸۰۳	۱/۱۶
۸	CFDST-D-40-T2	۸۷۵۲۲	۱/۳۴
۹	CFDST-D-40-T3	۹۵۵۰۹	۱/۴۶

به منظور مقایسه بهتر نتایج، مقدار انرژی جذب شده هر نمونه نسبت به نمونه‌ی مینا برای ضخامت‌های جداره و مقاومت‌های فشاری متفاوت مطابق نمودار ستونی برای هر دو مقطع ساده و تقویت شده به ترتیب در شکل‌های ۱۸ و ۱۹ ارائه شده است.



شکل ۱۸: مقایسه انرژی جذب شده هر نمونه نسبت به نمونه مینا برای ضخامت‌ها و مقاومت‌های متفاوت فشاری بتن در مقطع ساده



شکل ۱۹: مقایسه انرژی جذب شده هر نمونه نسبت به نمونه مبنا برای ضخامت‌ها و مقاومت‌های متفاوت فشاری بتن در مقطع تقویت شده

در هر دو نوع مقطع با توجه به نتایج بدست آمده با افزایش ضخامت جداره‌ها و نیز افزایش مقاومت فشاری بتن میزان جذب انرژی افزایش می‌یابد، میزان جذب انرژی در افزایش ضخامت جداره‌ی فولادی به نسبت مقاومت فشاری بتن بسیار بیشتر می‌باشد. از طرفی در نمونه‌های با مقطع تقویت شده میزان جذب انرژی در شرایط یکسان در مقایسه با مقطع ساده بیشتر می‌باشد (جدول ۷ و ۸).

۷-۲- اثر تغییر مقاومت فشاری بتن و ضخامت جداره‌ی مقطع فولادی بر سختی و شکل پذیری ستون‌ها

برای مقایسه اثر تغییرات مقاومت فشاری بتن و تغییر ضخامت جداره‌ی مقطع فولادی بر سختی و شکل پذیری ستون، با استفاده از منحنی پوش نمونه‌ها و مقایسه تاثیر هر کدام از مقاومت فشاری و ضخامت جداره در سختی و شکل پذیری در جداول شماره ۹ و ۱۰ ارائه گردیده است.

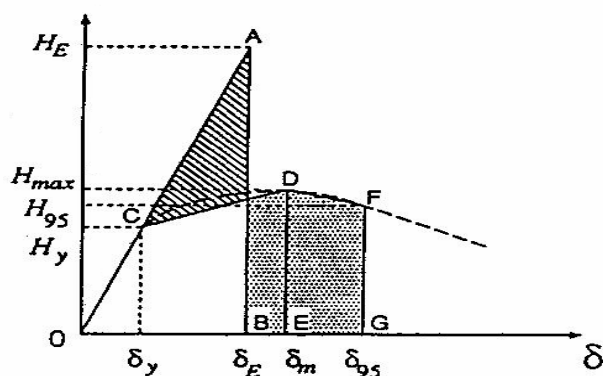
۷-۲-۱- شکل پذیری

یکی دیگر از پارامترهای مهم در بررسی رفتار ستون‌ها در بارگذاری چرخه‌ای، شکل پذیری می‌باشد. پارامتر شکل پذیری معمولاً برای ارزیابی ظرفیت تغییر شکل ستون استفاده می‌گردد. یک معیار برای پارامتر شکل پذیری که در شکل ۲۰ نشان داده شده است، به صورت رابطه ۲ تعریف می‌گردد [۳۰].

$$\mu = \frac{\delta_{95}}{\delta_y} \quad (2)$$

δ_{95} = جابه‌جایی جانبی در $H=H_{95}$ ، که H_{95} برابر با ۹۵ درصد مقاومت حداکثر است.

δ_y = جابه‌جایی افقی مربوط به اولین تسلیم یا کمانش موضعی (یعنی جابه‌جایی افقی در بالای ستون مربوط به H_y).



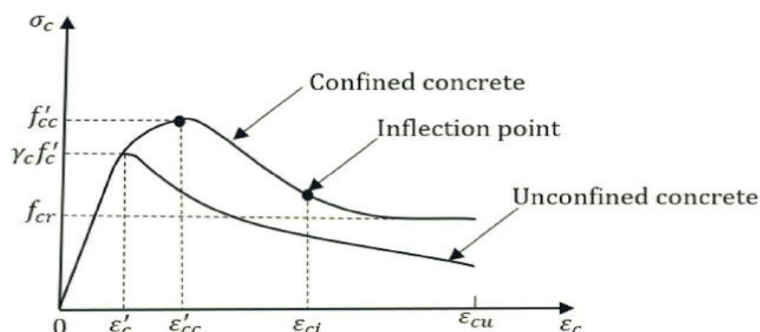
شکل ۲۰: نحوه تعیین پارامتر شکل‌پذیری

۷-۲-۲- ضریب محصوریت بتن

افزایش میزان پلاستیسیته هسته بتن در ستون‌های دوجداره فولادی پرشده با بتن در نتیجه پیش‌محصوریت ناشی از جداره لوله‌های فولادی می‌باشد که این محصوریت با ضریب α_n همانند رابطه ۳ تعریف می‌گردد [۳۱، ۳۲، ۳۳].

$$\alpha_n = \alpha_n \frac{f_{sy0}}{f_{ck}} \quad (3)$$

α_n نسبت اسمی فولاد در ستون‌های دوجداره فولادی پرشده با بتن، $\alpha_n = A_{s0}/A_{ce}$ که در آن A_{s0} مساحت سطح مقطع لوله فولادی خارجی است، و $A_{ce} = \frac{\pi}{4}(d - 2t_{s0})^2$ مساحت سطح مقطع اسمی بتن می‌باشد که برابر $A_{ce} = \frac{\pi}{4}(d - 2t_{s0})^2$ و نیز تنش تسلیم لوله فولادی خارجی است و f_{ck} مقاومت مشخصه فشاری بتن که تقریباً برابر با ۶۷ درصد مقاومت فشاری بلوک‌های مکعبی برای بتن با مقاومت معمولی است.



شکل ۲۱: نمودارهای معمول تنش-کرنش برای بتن محصور شده و غیرمحصور [۳۴]

جدول ۹: مقایسه شکل پذیری و سختی نمونه‌های مورد بررسی بر اساس ضخامت جداره لوله فولادی و مقاومت فشاری بتن در مقطع ساده

ردیف	نمونه	مقاومت فشاری بتن (MPa)	ضخامت جداره فولادی* (mm)	ضریب شکل پذیری	سختی اولیه ستون (KN/mm)
۱	CFDST-S-20-T1	۲۰	۲	۳/۹۷	۱/۰۷
۲	CFDST-S-20-T2	۲۰	۳	۳/۷۴	۱/۴۱
۳	CFDST-S-20-T3	۲۰	۴	۳/۸۱	۱/۶۸
۴	CFDST-S-30-T1	۳۰	۲	۳/۴۶	۱/۱۳
۵	CFDST-S-30-T2	۳۰	۳	۳/۶۴	۱/۵۰
۶	CFDST-S-30-T3	۳۰	۴	۳/۷۴	۱/۷۵
۷	CFDST-S-40-T1	۴۰	۲	۳/۰۸	۱/۱۹
۸	CFDST-S-40-T2	۴۰	۳	۳/۵۷	۱/۵۸
۹	CFDST-S-40-T3	۴۰	۴	۳/۷۸	۱/۸۶

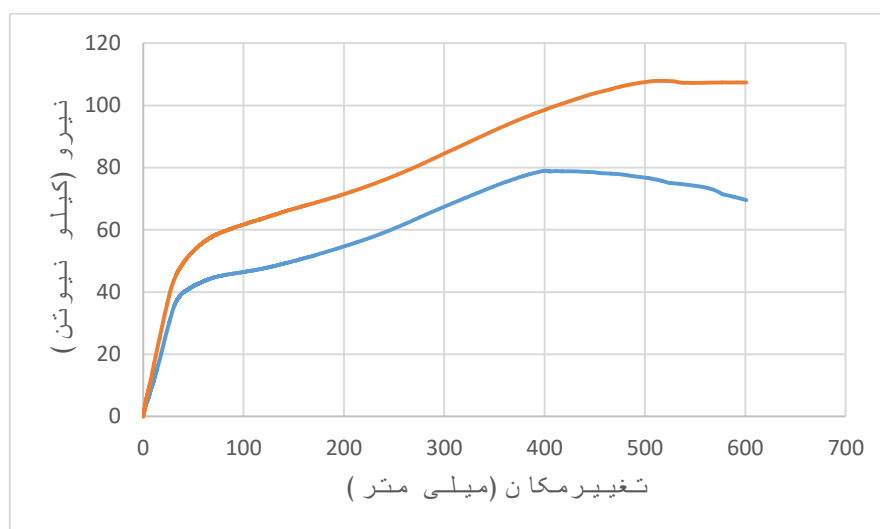
جدول ۱۰: مقایسه شکل پذیری و سختی نمونه‌های مورد بررسی بر اساس ضخامت جداره لوله فولادی و مقاومت فشاری بتن در مقطع تقویت شده

ردیف	نمونه	مقاومت فشاری بتن (MPa)	ضخامت جداره فولادی* (mm)	ضریب شکل پذیری	سختی اولیه ستون (KN/mm)
۱	CFDST-D-20-T1	۲۰	۲	۳/۸۹	۱/۲۹
۲	CFDST-D-20-T2	۲۰	۳	۳/۷۹	۱/۶۳
۳	CFDST-D-20-T3	۲۰	۴	۳/۷۲	۱/۹۷
۴	CFDST-D-30-T1	۳۰	۲	۳/۹۷	۱/۴۱
۵	CFDST-D-30-T2	۳۰	۳	۳/۹۲	۱/۷۶
۶	CFDST-D-30-T3	۳۰	۴	۳/۸۴	۲/۱۱
۷	CFDST-D-40-T1	۴۰	۲	۳/۵۶	۱/۴۴
۸	CFDST-D-40-T2	۴۰	۳	۴/۰۱	۱/۹۲
۹	CFDST-D-40-T3	۴۰	۴	۳/۸۹	۲/۱۹

*در تمامی نمونه‌ها ضخامت هر دو جداره لوله فولادی با هم برابر در نظر گرفته شده است.

بر اساس نتایج بدست آمده افزایش مقاومت فشاری بتن تاثیر ناچیزی در میزان جذب انرژی و سختی اولیه ستون‌ها در مقایسه با افزایش ضخامت جداره‌ها دارد. علیرغم اینکه سختی و میزان جذب انرژی در ستون‌ها با مقطع تقویت شده بیشتر از مقطع ساده است، شکل‌پذیری ستون‌ها با مقطع تقویت شده در مقایسه با مقطع ساده نیز بیشتر است، و این به علت افزایش محصوریت بتن ناشی از افزایش سطح تماس فولاد و بتن می‌باشد که منجر به شکل‌پذیر تر بودن این نوع مقاطع علیرغم سختی زیاد می‌باشد. (جدول ۹ و ۱۰)

نکته مهم در طرح مقطع تقویت شده این نوع از ستون‌ها توجه به ایجاد حاشیه اطمینان ایجاد شده بعد از زوال لوله فولادی خارجی می‌باشد که این حاشیه اطمینان توسط محصورشدگی ناشی از سخت‌کننده‌ها و میلگردهای حلقوی داخل بتن می‌باشد طوری که با زوال یا از بین رفتن جداره لوله خارجی مثلاً ناشی از ضربه، آتش سوزی یا سایر عوامل محیطی دیگر بتن همان سطح محصورشدگی قبلی را نداشته و ستون به شدت دچار افت می‌گردد که در شکل ۲۱ با مقایسه پوش دو نمونه CFDST-S-20-T1 و CFDST-D20-T1 می‌توان مشاهده نمود که در مقطع تقویت شده با مشخصات یکسان با مقطع ساده افت ناگهانی نیرو اتفاق نمی‌افتد. (در شکل ۱۷ تفاوت رفتاری بعد از تغییر مکان ۴۰۰ میلی‌متر)



شکل ۲۱: مقایسه پوش نمونه‌های CFDST-S-20-T1 و CFDST-D-20-T1

۸- نتیجه‌گیری

ذکر این نکته الزامی است که حوزه نتایج و توصیه‌ها محدود به حالات در نظر گرفته شده برای تحلیل‌های انجام شده هست، اما انتظار می‌رود این نتایج دارای حوزه عمل و کاربرد جامع‌تری از موارد در نظر گرفته شده در تحلیل‌های حاضر باشد. در این تحقیق با طرح مقطع تقویت شده از ستون‌های فولادی دوجداره پر شده با بتن و مقایسه آن‌ها با ستون‌های مقطع ساده به صورت آزمایشگاهی تحت بارگذاری همزمان چرخه‌ای و محوری انجام گرفت، سپس بعد از صحت‌سنجی برای بررسی تاثیر و رفتار این نوع از ستون‌ها با مقطع تقویت شده جمعاً ۱۸ نمونه تحلیلی در هر دو مقطع با ضخامت‌های متفاوت جداره‌ی فولادی و مقاومت‌های متفاوت فشاری بتن مدل‌سازی گردید، که نتایج حاصله در شرایط آزمایشگاهی و تحلیلی این پژوهش به شرح زیر می‌باشد:

۱- در ستون‌ها با مقطع تقویت شده تحت بارگذاری چرخه‌ای با بررسی منحنی‌های چرخه‌ای و پوش، مشاهده گردید که تقویت این ستون‌ها با طرح مقطع تقویت شده ارائه شده باعث جلوگیری از زوال مقاومت ستون در تغییر مکان‌های زیاد شده و باعث بهبود رفتار آن‌ها در بارگذاری چرخه‌ای می‌شود.

۲- سطح زیر نمودار نیرو-تغییر مکان نمایانگر مجموع انرژی جذب شده می‌باشد. میزان جذب انرژی و ظرفیت باربری جانبی در ستون‌های با مقطع تقویت شده در مقایسه با مقطع ساده به طور میانگین بیشتر از ۳۵ درصد می‌باشد (جدول ۷ و ۸). هرچقدر میزان جذب انرژی ستون بیشتر، میزان محصورشدگی نیز بیشتر است و این به علت افزایش سطح تماس بین بتن و فولاد می‌باشد.

۳- افزایش مقاومت فشاری بتن در ستون با مقطع تقویت شده و ساده موجب افزایش بسیار جزئی در میزان جذب انرژی می‌گردد اما این میزان افزایش جزئی نیز در ستون با مقطع ساده حدود ۲ درصد بیشتر از ستون با مقطع تقویت شده می‌باشد. (افزایش مقاومت فشاری بتن در میزان جذب انرژی بسیار ناچیز است).

۴- افزایش ضخامت جداره‌ی فولادی در ستون با مقطع تقویت شده و ساده باعث افزایش بیشتر میزان جذب انرژی ستون در مقایسه با افزایش مقاومت فشاری بتن می‌گردد، طوری که در هر دو نوع مقطع به صورت میانگین میزان افزایش جذب انرژی ستون با افزایش ضخامت جداره‌ی فولادی ۸ درصد بیشتر از افزایش مقاومت فشاری بتن می‌باشد.

۵- روند افزایش میزان جذب انرژی ستون با افزایش ضخامت جداره‌ی فولادی در ستون با مقطع ساده به طور میانگین ۶ درصد بیشتر از مقطع تقویت شده می‌باشد.

۶- با مقایسه مقادیر سختی اولیه و شکل‌پذیری در ستون‌ها با مقطع تقویت شده مشاهده می‌گردد به علت محصوریت بالای ایجاد شده در مقطع تقویت شده مقادیر سختی و شکل‌پذیری بیشتر از ستون‌ها با مقطع ساده می‌باشد.

۷- نکته حائز اهمیت در طرح پیشنهادی برای مقطع تقویت شده ایجاد یک حاشیه اطمینان برای این نوع از ستون‌ها بعد از زوال یا از بین رفتن جداره‌ی خارجی ستون می‌باشد، زیرا ضعف ستون‌های دوجداره فولادی، افت ناگهانی مقاومت آن‌ها بعد از زوال جداره خارجی ستون می‌باشد، البته در مقطع تقویت شده بعد از زوال جداره خارجی ستون، میلگردهای حلقوی به همراه سخت‌کننده‌های قائم وارد عمل شده و مانع از شکست ناگهانی بتن ناشی از دست دادن محصوریت بین جداره لوله‌ها می‌گردد.

در انتها پیشنهاد می‌گردد با توجه به اهمیت استفاده از این نوع ستون‌ها در سازه‌های بلند و پل‌ها، نسبت به بررسی اتصالات این نوع از ستون‌ها به تیرها و فونداسیون و نیز رفتار آنها تحت بارگذاری‌های ضربه، آتش سوزی و انفجار مورد بررسی و مطالعه قرارگیرد.

مراجع

- [1] M. Elchalakani, X.L. Zhao, R. Grzebieta. (2002). Tests on concrete filled double-skin (CHS outer and SHS inner) composite short columns under axial compression, *Thin-Walled Structure*. 40:415-441.
- [2] Han, L.H, H. Huang, X.L. Zhao. (2009). Analytical behaviour of concrete-filled double skin steel tubular (CFDST) beam-columns under cyclic loading, *Thin-Walled Structure*. 47:668-680.
- [3] Z. Tao, L.H. Han, X.L. Zhao. (2004). Behaviour of concrete-filled double skin (CHS inner and CHS outer) steel tubular stub columns and beam-columns, *Journal of Construction Steel Research*, 60:1129-1158.
- [4] Han, L.H, Li W, Bjorhovde R. (2014). Developments and advanced applications of concrete filled steel tubular (CFST) structures: members. *Journal of Construction Steel Research*, 100:211-28.
- [5] Liang QQ. (2017). Nonlinear analysis of circular double-skin concrete-filled steel tubular columns under axial compression. *Engineering Structure*, 131:639-50.
- [6] X.-L. Zhao and R. Grzebieta, (2002). Strength and ductility of concrete filled double skin (SHS inner and SHS outer) tubes, *Thin-Walled Structures*, volume 40, no. 2, pp. 199-213.
- [7] K. Nakanishi, T. Kitada, and H. Nakai, (1999). Experimental study on ultimate strength and ductility of concrete filled steel Advances in Civil Engineering 17 columns under strong earthquake, *Journal of Constructional Steel Research*, volume 51, no. 3, pp. 297-319.
- [8] H. Lu, L.H. Han, and X.-L. Zhao, (2010). Fire performance of self consolidating concrete filled double skin steel tubular columns: experiments, *Fire Safety Journal*, vol. 45, no. 2, pp. 106-115.
- [9] Wei. Li, Tao. Wang, Lin-Hai. Han, (2019). Seismic performance of concrete-filled double-skin steel tubes after exposure to fire: Experiments, *Journal of Constructional Steel Research*, 154: 209-223.
- [10] S. Mohammadbagheri, B. Shekastehband, (2020). Fire resistance of stiffened CFDST columns after earthquake-induced damages, *Thin-Walled Structures*, 154: 106865.
- [11] B. Shekastehband, A. Taromi, K. Abedi, (2017), Fire performance of stiffened concrete filled double skin steel tubular columns, *Fire Safety. J.* 88: 13-25.
- [12] Han, L.H, Huang, H., Tao, Z., Xiao, L.Z. (2006). Concrete-Filled Double Skin Steel Tubular (CFDST) Beam-Column Subjected to Cyclic Bending. *Engineering Structures*, Volume 28, pp1698-1714.
- [13] Abedi K, Ferdousi A, Afshin H. (2008). A novel steel section for concrete-filled tubular columns. *Thin-Walled Structures*, Volume 46, 310-19.
- [14] Fa-xing Ding, Jiang Zhu, ShanShan Cheng, Xuemei Liu. (2018). Comparative study of stirrup-confined circular concrete- filled steel tubular stub columns under axial loading. *Thin-Walled Structures*, Volume 123, 294-304.

- [15] Wei Li, Yu-Xiao Cai, (2019). Performance of CFDST stub columns using high-strength steel subjected to axial compression. *Thin-Walled Structures*, 141:411–422.
- [16] Ran Deng, Xu-Hong Zhou, Xiao-Wei Deng, Ke Ke, Jiu-Lin Bai, Yu-Hang Wang. (2021). Compressive behaviour of tapered concrete-filled double skin steel tubular stub columns. *Journal of Constructional Steel Research* 184: 106771.
- [17] Junchang Ci, Mizan Ahmed, Hong Jia, Shicai Chen, Daxing Zhou, Liqun Hou, (2021). Testing and strength prediction of eccentrically-loaded circular concrete-filled double steel tubular stub-columns. *Journal of Constructional Steel Research*, 186: 106881.
- [18] S. Mohammadbagheri, B. Shekastehband, (2020). Fire resistance of stiffened CFDST columns after earthquake-induced damages. *Thin-Walled Structures*, 154:106865.
- [19] J.C.M. Ho, C.X.Dong, (2014). Improving strength, stiffness and ductility of CFDST columns by external confinement. *Thin-Walled Structures*, volume75, 18–29.
- [20] Mojtaba Farahi, Amin Heidarpour, Xiao-Ling Zhao, Riadh Al-Mahaidi. (2016). Parametric study on the static compressive behaviour of concrete-filled double-skin sections consisting of corrugated plates. *Thin-Walled Structures*, volume107, 526–542.
- [21] Uenaka, K. (2016). CFDST stub columns having outer circular and inner square sections under compression. *Journal of Constructional Steel Research*, 120, 1-7.
- [22] ACI-318. Building code requirements for reinforced concrete. (2002). Detroit (MI), USA: ACI.
- [23] ANSI/AISC360-16, Specification for Structural Steel Buildings. (2016). American Institute of Steel Construction, U.S, Chicago.
- [24] ATC-24, Guidelines for cyclic seismic testing of components of steel structures. (1992). Redwood City, CA, USA: Applied Technology Council.
- [25] ASTM, E8/E8M-15a, Standard Test Method for Tension Testing of Metallic Materials. (2015). West Conshohocken, USA: ASTM International.
- [26] ASTM C39/C39M, Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens. (2010). West Conshohocken, PA, USA: American Society for Testing and Materials.
- [27] Pagoulatou, M. and Sheehan, T. and 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*, No.72,102-112.
- [28] ABAQUS Version 6.14.4 (2014). ABAQUS Standard User`s Manual, Dassault Systemes Corp, Providence, RI (USA).
- [29] Ferdousi A. (2002). Investigation into the behaviour of a novel steel section used for concrete filled tubular columns. Ms. Thesis. Sahand University of Technology.
- [30] Ge, H. and Usami, T. (1996). Cyclic test of concrete filled steel box columns. *Journal of Structural Engineering* , 122(10), 1169-1177.
- [31] Han LH. (2007). Concrete-filled steel tubular structures-theory and practice. Beijing (China): Science Press[in Chinese].
- [32] Han LH, Yao GH, Zhao XL. (2005). Tests and calculations of hollow structural steel (HSS) stub columns filled with self-consolidating concrete (SCC). *Journal of Constructional Steel Research*. 61(9):1241_69.
- [33] Han LH, Yao GH, Tao Z. (2007). Performance of concrete-filled thin-walled steel tubes under pure torsion. *Thin-Walled Structures*. 45(1):24_36.
- [34] Mander JB, Priestley MJN, Park R. (1988). Theoretical stress-strain model for confined concrete. *Journal of Structural Engineering*, 114(8):1804–26.