



Journal of Structural and Construction Engineering

www.jsce.ir



The effect of transverse stiffeners in the form of helical springs on the behavior of concrete-filled double-skin steel tubular (CFDST) columns

Amir Atashi

Technical Instructor, Department of Civil Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran

ABSTRACT

Concrete-filled steel tubular (CFST) columns are widely used in modern structures due to their high load-carrying capacity, adequate ductility, and favorable performance under compressive loading. Among them, concrete-filled double-skin steel tubular (CFDST) columns, owing to the presence of two steel tubes and a concrete core, exhibit greater confinement capability and structural stability compared with conventional columns. However, under high loading levels, local buckling of the steel tubes may occur, leading to a reduction in the effectiveness of concrete confinement. Therefore, the use of external stiffening elements can play a significant role in enhancing the behavior of such columns. In this study, the effect of transverse stiffeners in the form of helical springs on the axial compressive behavior of CFDST columns is investigated using numerical modeling in ABAQUS. The influence of two main parameters, namely the pitch and diameter of the helical spring, on the structural response of the columns is examined through 11 numerical models. The results indicate that the use of helical springs leads to a significant increase in load-carrying capacity and an improvement in the axial performance of CFDST columns. Reducing the spring pitch enhances concrete confinement and improves stress distribution in the steel tubes, and in the best case, an increase of about 66% in load capacity compared with the unstrengthened model is observed. Moreover, increasing the spring diameter leads to higher lateral stiffness and reduced radial deformations, which in turn results in an increase in the load-carrying capacity of the column. The findings of this research demonstrate that employing helical springs as external stiffeners can be an effective strategy for improving the structural performance of composite steel-concrete columns.

ARTICLE INFO

Receive Date: **04 May 2026**

Revise Date: **24 May 2026**

Accept Date: **03 June 2026**

Keywords:

Concrete-filled double-skin steel tubular (CFDST) column
transverse stiffener
helical spring
finite element method
concrete confinement
load-carrying capacity

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2026.580119.3962>

*Corresponding author: amir atashi

Email address: aatashi@tvu.ac.ir

بررسی اثر سخت‌کننده عرضی از نوع فنر مارپیچ بر رفتار ستون‌های فولادی دو جداره پر شده با بتن (CFDST)

امیر آتشی

مربی فنی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه ملی مهارت، تهران، ایران

چکیده

ستون‌های فولادی پر شده با بتن به دلیل ظرفیت باربری بالا، شکل‌پذیری مناسب و عملکرد مطلوب در برابر بارهای فشاری، به طور گسترده در سازه‌های مدرن مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این میان، ستون‌های فولادی پر شده با بتن دولا به (CFDST) به دلیل وجود دو جدار فولادی و هسته بتنی، از قابلیت محصورشدگی و پایداری سازه‌ای بیشتری نسبت به ستون‌های معمولی برخوردار هستند. با این حال، در بارهای بالا امکان بروز کمانش موضعی در جدار فولادی و کاهش کارایی محصورشدگی بتن وجود دارد. از این رو، استفاده از تقویت‌کننده‌های خارجی می‌تواند نقش مؤثری در بهبود رفتار این نوع ستون‌ها ایفا کند. در این پژوهش، اثر سخت‌کننده عرضی از نوع فنر مارپیچ بر رفتار فشاری ستون‌های CFDST با استفاده از مدل‌سازی عددی در نرم‌افزار آباکوس مورد بررسی قرار گرفته است. در این مطالعه تأثیر دو پارامتر اصلی شامل گام فنر مارپیچ و قطر آن بر رفتار سازه‌ای ستون‌ها در ۱۱ مدل، بررسی گردید. نتایج نشان داد که استفاده از فنر مارپیچ موجب افزایش قابل توجه ظرفیت باربری و بهبود عملکرد فشاری ستون‌های CFDST می‌شود. کاهش گام مارپیچ باعث افزایش محصورشدگی بتن و بهبود توزیع تنش در جدارهای فولادی شده و در بهترین حالت افزایش ظرفیت باربری تا حدود ۶۶ درصد نسبت به مدل بدون تقویت‌کننده مشاهده شد. همچنین افزایش قطر فنر مارپیچ موجب افزایش سختی جانبی ستون و کاهش تغییرشکل‌های شعاعی گردید که در نتیجه آن ظرفیت باربری ستون افزایش یافت. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که استفاده از فنر مارپیچ به عنوان سخت‌کننده خارجی می‌تواند راهکار مؤثری برای بهبود عملکرد سازه‌ای ستون‌های مرکب فولادی-بتنی باشد.

کلمات کلیدی: ستون فولادی دو جداره پر شده با بتن (CFDST)، سخت‌کننده عرضی، فنر مارپیچ، روش اجزای محدود، محصورشدگی بتن، ظرفیت باربری

سابقه مقاله:					شناسه دیجیتال:
دریافت	بازنگری	پذیرش	انتشار آنلاین	چاپ	doi: https://doi.org/10.22065/jsce.2026.580119.3962
۱۴۰۵/۰۲/۱۴	۱۴۰۵/۰۳/۰۳	۱۴۰۵/۰۳/۱۳	۱۴۰۵/۰۳/۱۳	۱۴۰۵/۰۶/۳۱	
*نویسنده مسئول:					امیر آتشی
پست الکترونیکی:					aatashi@tvu.ac.ir

۱- مقدمه

ستون‌های فولادی پر شده با بتن^۱، در دهه‌های اخیر به طور گسترده در سازه‌های بلندمرتبه، پل‌ها و سازه‌های صنعتی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. ترکیب فولاد و بتن در این سیستم باعث ایجاد عملکرد مرکب مؤثر می‌شود؛ به گونه‌ای که لوله فولادی نقش قالب دائمی و المان محصورکننده بتن را ایفا کرده و از گسترش ترک‌ها و خردشدگی زودهنگام بتن جلوگیری می‌کند، در حالی که هسته بتنی نیز با جلوگیری از کمانش موضعی فولاد، پایداری مقطع را افزایش می‌دهد. این تعامل سازه‌ای منجر به افزایش ظرفیت باربری، سختی، شکل‌پذیری و عملکرد لرزه‌ای مطلوب در مقایسه با اعضای فولادی یا بتنی منفرد می‌شود [۱]. به منظور بهبود بیشتر عملکرد این سیستم‌ها، نوع پیشرفته‌تری از این ستون‌ها با عنوان ستون‌های فولادی پر شده با بتن دولایه^۲ معرفی شده است. در این نوع ستون‌ها، بتن در فضای بین دو لوله فولادی داخلی و خارجی قرار می‌گیرد و این آرایش باعث کاهش وزن سازه، افزایش نسبت مقاومت به وزن، و بهبود رفتار پایداری عضو می‌شود. علاوه بر این، وجود دو جداره فولادی موجب افزایش میزان محصورشدگی بتن و در نتیجه بهبود مقاومت فشاری و شکل‌پذیری ستون می‌گردد. با وجود این مزایا، مطالعات نشان داده‌اند که در شرایط بارگذاری فشاری بالا، احتمال وقوع کمانش موضعی در جداره فولادی خارجی و کاهش کارایی محصورشدگی بتن همچنان از چالش‌های اصلی این سیستم محسوب می‌شود [۲-۳]. برای رفع این محدودیت‌ها، روش‌های مختلفی برای تقویت ستون‌های مرکب پیشنهاد شده است که از جمله آن‌ها می‌توان به استفاده از الیاف FRP، ورق‌های فولادی تقویتی، سخت‌کننده‌های حلقوی و تقویت‌کننده‌های محیطی اشاره کرد. این روش‌ها می‌توانند با افزایش سختی محیطی مقطع، از تغییر شکل‌های شعاعی جلوگیری کرده و ظرفیت باربری ستون را افزایش دهند. با این حال، برخی از این روش‌ها با مشکلات اجرایی، افزایش وزن سازه یا تمرکز تنش در محل تقویت همراه هستند که ممکن است عملکرد کلی عضو را تحت تأثیر قرار دهد [۴].

چنگهوان لین و همکاران [۵] به بررسی رفتار فشاری محوری ستون‌های مرکب دایره‌ای با محصورسازی خارجی پرداختند. آن‌ها با تحلیل تنش در لوله‌های فولادی داخلی و خارجی، مفهوم تنش محصورشدگی معادل را برای ارزیابی اثرات محصورسازی یکنواخت و غیریکنواخت معرفی کردند. نتایج نشان داد مدل پیشنهادی می‌تواند مقاومت فشاری نهایی ستون‌های CFST و CFDST با محصورسازی خارجی را با دقت قابل قبولی پیش‌بینی کند. ژوچیان یانگ و همکاران [۶] به بررسی عددی رفتار ستون‌های کوتاه فولادی مربعی پر از بتن با مقاومت بالا که توسط تنگ‌های مارپیچی با مقاومت بالا محصور شده‌اند، پرداختند. نتایج نشان داد تنگ‌های مارپیچی قوی، اگرچه تأثیر زیادی بر ظرفیت باربری ندارند، اما تغییر مکان در بار اوج و شکل‌پذیری ستون را به‌طور چشمگیری افزایش می‌دهند. آن‌ها یک معادله دقیق‌تر برای پیش‌بینی ظرفیت فشاری این ستون‌ها ارائه کردند که نسبت به مدل‌های موجود عملکرد بهتری دارد. میزان احمد و همکاران [۷] به تحلیل غیرخطی ستون‌های کوتاه فولادی-بتنی مربعی محصورشده با میلگردهای مارپیچ پرداختند و یک مدل محصورشدگی جدید برای بتن این ستون‌ها ارائه کردند. آن‌ها یک مدل فیبر کارآمد توسعه دادند که هم محصورسازی مارپیچی و هم کمانش موضعی تدریجی جداره فولادی را شبیه‌سازی می‌کند و نشان دادند مدل پیشنهادی با داده‌های آزمایشگاهی تطابق بالایی دارد. نتایج مطالعه پارامتریک نشان داد مقاومت و شکل‌پذیری ستون‌ها به نسبت عرض به ضخامت، تنش تسلیم فولاد، مقاومت بتن و فاصله مارپیچ‌ها به‌طور قابل توجهی وابسته است. بی.اس. سریچاران و همکاران [۸] به بررسی آزمایشگاهی رفتار ستون‌های کوتاه دوطبسته فولادی پر شده با بتن (CFDST) تحت بار فشاری محوری پرداختند. نتایج نشان داد هرچه ضخامت لوله خارجی بیشتر باشد، محصورشدگی بتن تقویت شده و ظرفیت فشاری ستون تقریباً به‌صورت خطی افزایش می‌یابد. همچنین مشخص شد عملکرد CFDST به تعامل بین مقاومت بتن و میزان محصورشدگی تأمین‌شده توسط هر دو لوله فولادی وابسته است. جینلانگ گوئو و همکاران [۹] به شبیه‌سازی عددی ظرفیت فشاری محوری باقیمانده ستون‌های CFDST مربعی در مربعی پس از ضربه جانبی پرداختند و یک مدل اجزای محدود دقیق برای تحلیل پس‌ضربه توسعه و اعتبارسنجی کردند. نتایج نشان داد با افزایش انرژی ضربه، نسبت لاغری و مقاومت بتن، ضریب ظرفیت باقیمانده کاهش می‌یابد، در حالی که افزایش مقاومت فولاد موجب بهبود قابل توجه آن می‌شود. در نهایت، یک رابطه ساده‌شده برای برآورد ظرفیت فشاری محوری باقیمانده پس از ضربه پیشنهاد گردید. الشربینی و همکاران [۱۰] به بررسی شکاف‌های پژوهشی در زمینه رفتار ستون‌های CFST و CFDST تحت بارهای انفجاری پرداختند و مطالعات تحلیلی،

¹ Concrete-Filled Steel Tube- CFST² Concrete-Filled Double Skin Steel Tube – CFDST

عددی و آزمایشگاهی موجود را مرور کردند. نتایج نشان داد بارهای انفجار نزدیک و تماسی بیشترین آسیب را به ستون‌ها وارد می‌کنند و ترکیب روش‌های آزمایشگاهی و عددی برای درک دقیق پاسخ دینامیکی این ستون‌ها ضروری است. در نهایت، نویسندگان خلأهای تحقیقاتی موجود را شناسایی کرده و مسیرهایی برای تحقیقات آینده پیشنهاد دادند.

ارت پاتل و پوروهیت [۱۱] در یک مطالعه آزمایشگاهی به بررسی تأثیر ناقصی‌های بتن در ستون‌های CFDST پرداختند و ۹ نمونه شامل ستون‌های بدون نقص و با انواع مختلف گپ بتن را آزمودند. نتایج نشان داد وجود گپ‌های محیطی یا مستطیلی در بتن می‌تواند تا حدود ۱۹٪ ظرفیت باربری ستون را کاهش داده و احتمال کماتش موضعی زودرس در لوله فولادی خارجی را افزایش دهد. همچنین شکل لوله داخلی و نوع نقص بتن بر میزان محصورشدگی و شکل‌پذیری ستون‌ها اثر قابل توجهی دارد. فام و همکاران [۱۲] به بررسی عددی رفتار ستون‌های کوتاه CFDST دایره‌ای با مقاومت‌های مختلف بتن تحت بار فشاری محوری پرداختند. آن‌ها با استفاده از مدل اجزای محدود در نرم‌افزار آباکوس ستون‌هایی با بتن معمولی، بتن پرمقاومت و بتن فوق‌پرمقاومت را شبیه‌سازی کردند. نتایج نشان داد مدل عددی توانایی پیش‌بینی مناسب منحنی بار-کرنش و ظرفیت نهایی ستون‌ها را داشته و با نتایج آزمایشگاهی تطابق خوبی دارد. سیتانتیا بودی کاسیتا و همکاران [۱۳] به بررسی تأثیر شکل مقطع بر عملکرد ستون‌های CFDST تحت بار فشاری محوری پرداختند و با مدل اجزای محدود صحت‌گذاری شده، رفتار ستون‌ها را ارزیابی کردند. نتایج نشان داد پیکربندی OSHS_ISHS بیشترین بار نهایی و بهترین نسبت مقاومت به وزن را دارد، اما تمرکز تنش و تغییرشکل پلاستیک بالا، شکل‌پذیری آن را محدود می‌کند. همچنین مشخص شد مقاطع OSHS_ICHS و OCHS_ICHS عملکرد شکل‌پذیری بهتری داشته و گزینه مناسب‌تری برای جذب انرژی هستند، در حالی که OCHS_ISHS ضعیف‌ترین رفتار کلی را نشان می‌دهد. احمد و همکاران [۱۴] به مرور و ارزیابی معادلات طراحی ظرفیت فشاری محوری ستون‌های دایره‌ای CFDST در آیین‌نامه‌های مختلف پرداختند. نتایج نشان داد آیین‌نامه CSA S16-14 محافظه‌کارانه‌ترین پیش‌بینی را ارائه می‌دهد، در حالی که سایر آیین‌نامه‌ها در برخی موارد ظرفیت را غیرمحافظه‌کارانه برآورد می‌کنند. همچنین یک معادله اصلاح‌شده مبتنی بر CSA با در نظر گرفتن اثر محصورشدگی لوله داخلی پیشنهاد شد که دقت پیش‌بینی ظرفیت محوری ستون‌های CFDST را بهبود می‌دهد.

هینهومادی و رواتی [۱۵] به بررسی رفتار ستون‌های CFDST تحت بار فشاری محوری پرداختند که شامل یک لوله بیرونی از چدن نرم، لوله داخلی از UPVC و بتن بین دو لایه بودند. آزمایش روی هشت نمونه با نسبت‌های ضخامت و لاغری متفاوت انجام شد و نتایج نشان داد که افزایش ضخامت لوله بیرونی و کاهش نسبت تهی منجر به افزایش مقاومت و شکل‌پذیری محوری می‌شود. همچنین مقایسه روابط طراحی نشان داد که آیین‌نامه‌های هند و اروپا با داده‌های آزمایشگاهی همخوانی خوبی دارند. الربه و همکاران [۱۶] به بررسی آزمایشگاهی رفتار محوری ستون‌های CFST پرداختند که در آن‌ها برای نخستین بار از پیچ‌های فولادی پرفشار به عنوان محصورکننده خارجی استفاده شد. آزمایش روی ۱۸ نمونه نشان داد کاهش فاصله پیچ‌ها و کاهش نسبت‌های L/D و D/t موجب افزایش چشمگیر مقاومت فشاری، سختی محوری، چقرمگی و شکل‌پذیری می‌شود. همچنین ظرفیت فشاری ستون‌های تقویت‌شده به ترتیب برای ستون‌های کوتاه، متوسط و بلند ۲۵/۳٪، ۹٪ و ۳/۵٪ افزایش یافت و مدل طراحی پیشنهادی همبستگی خوبی با نتایج آزمایشگاهی نشان داد.

ژانگ و همکاران [۱۷] در یک مطالعه آزمایشگاهی-تحلیلی به بررسی تقویت ستون‌های CFST با نوارهای FRP و نوارهای فولادی جوشی تحت فشار محوری پرداختند. نتایج نشان داد افزودن لایه‌های FRP (۱ تا ۴ لایه) ظرفیت نهایی ستون را ۲۸/۷۲ تا ۶۴/۱۶ درصد افزایش می‌دهد و استفاده از نوارهای فولادی با ضخامت‌های ۳ و ۶ میلی‌متر نیز ظرفیت را به ترتیب ۲۸/۴۶٪ و ۴۹/۸۲٪ افزایش می‌دهد. همچنین مشخص شد روش نوار فولادی با وجود عملکرد مشابه، حدود ۴۰ درصد کم‌هزینه‌تر از تقویت FRP است و مدل پیشنهادی مبتنی بر مندر^۳ قادر به پیش‌بینی دقیق ظرفیت نهایی ستون‌های تقویت‌شده است. کای و همکاران [۱۸] در پژوهشی آزمایشگاهی رفتار لرزه‌ای ستون‌های فولادی پرشده با بتن مربعی (CFT) را که با میلگردهای فولادی فوق‌مقاوم با چسبندگی پایین (LBUHSS) تقویت شده‌اند، بررسی کردند. آزمایش روی ۸ نمونه در مقیاس بزرگ با نسبت‌های مختلف بار محوری و دهانه برشی انجام شد. نتایج نشان داد استفاده از میلگردهای

³ Mander

LBUHSS⁴ باعث بهبود قابل توجه ظرفیت باربری، ظرفیت تغییرشکل، و کاهش تغییرمکان‌های باقی مانده پس از زلزله می‌شود، به‌ویژه در مراحل تغییرشکل بزرگ. همچنین مشخص شد نسبت دهانه برشی و بار محوری تأثیر چشمگیری بر رفتار لرزه‌ای ستون دارند. برای تحلیل پارامتریک، یک مدل اجزای محدود ساده‌شده پیشنهاد شد و دو رابطه پیش‌بینی‌کننده برای تغییرشکل اوج و نهایی ستون‌های تقویت‌شده توسعه یافت. سچدوا و همکاران [۱۹] به مقایسه ضوابط طراحی ستون‌های لوله فولادی پرشده با بتن (CFT) در آیین‌نامه‌های EC4 و AISC 360-10 پرداختند. در این پژوهش پایگاه داده‌ای شامل بیش از ۱۳۰ آزمایش از منابع مختلف جمع‌آوری شد تا دقت پیش‌بینی این آیین‌نامه‌ها برای ستون‌های تحت فشار محوری ارزیابی شود. نتایج نشان داد پیش‌بینی‌های EC4 با نتایج آزمایشگاهی تطابق خوبی دارد، در حالی که AISC 360-10 به دلیل در نظر نگرفتن کامل اثر محصورشدگی لوله فولادی بر بتن، نتایج محافظه‌کارانه‌تری ارائه می‌دهد. همچنین پیشنهاد شد دامنه کاربرد EC4 برای بتن‌های با مقاومت بالاتر و نسبت‌های بزرگ‌تر D/t گسترش یابد و اصلاحاتی برای هر دو آیین‌نامه جهت بهبود دقت طراحی ارائه گردید. هو و همکاران [۲۰] رفتار ستون‌های فولادی مربعی پرشده با بتن پرمقاومت (CFST) و ستون‌های CFST محصورشده با مارپیچ (SCCFST) را تحت بار محوری خارج از مرکز بررسی کردند. در این پژوهش ۹ نمونه ستون شامل ۶ ستون SCCFST و ۳ ستون CFST با مقاومت بتن حدود ۱۱۱ مگاپاسکال آزمایش شد. نتایج نشان داد خردشدگی بتن عامل اصلی کاهش ظرفیت باربری است. همچنین استفاده از آرماتور مارپیچی تأثیر قابل توجهی بر افزایش ظرفیت باربری ندارد، اما شکل‌پذیری ستون‌ها را به‌طور چشمگیری افزایش می‌دهد و این اثر با افزایش مقاومت تسلیم مارپیچ بیشتر می‌شود. در ادامه، یک مدل تنش-کرنش معادل برای بتن پرمقاومت در ستون‌های CFST و SCCFST ارائه شد و با استفاده از مدل فیبر تیر-ستون، پیش‌بینی مناسبی از منحنی‌های بار-تغییرمکان آزمایشگاهی به دست آمد.

در سال‌های اخیر تحقیقات گسترده‌ای در زمینه ستون‌های فولادی پرشده با بتن (CFT/CFST) و همچنین ستون‌های دولایه فولادی پرشده با بتن (CFDST) انجام شده است و رفتار آن‌ها تحت بارگذاری‌های مختلف به خوبی مورد مطالعه قرار گرفته است. بخش عمده‌ای از این پژوهش‌ها بر بهبود رفتار فشاری، افزایش شکل‌پذیری، کنترل کمانش موضعی و توسعه مدل‌های تنش-کرنش متمرکز بوده‌اند. در این میان، اگرچه محصورسازی داخلی از طریق لوله درونی در CFDST نقش مهمی در بهبود رفتار بتن دارد، اما تقویت خارجی این ستون‌ها همچنان یک حوزه کمتر بررسی‌شده است. مرور منابع نشان می‌دهد که بخش زیادی از مطالعات موجود، تأثیر تنگ‌های مارپیچی داخلی در ستون‌های CFST یا SCCFST را بررسی کرده‌اند؛ اما هیچ پژوهشی به‌طور مشخص کاربرد «فنر مارپیچ» یا «سخت‌کننده مارپیچی خارجی» در ستون‌های CFDST را مطالعه نکرده است. این خلأ پژوهشی نشان می‌دهد که استفاده از این سیستم تقویتی نوین می‌تواند مسیر جدیدی برای بهبود رفتار این ستون‌ها فراهم کند.

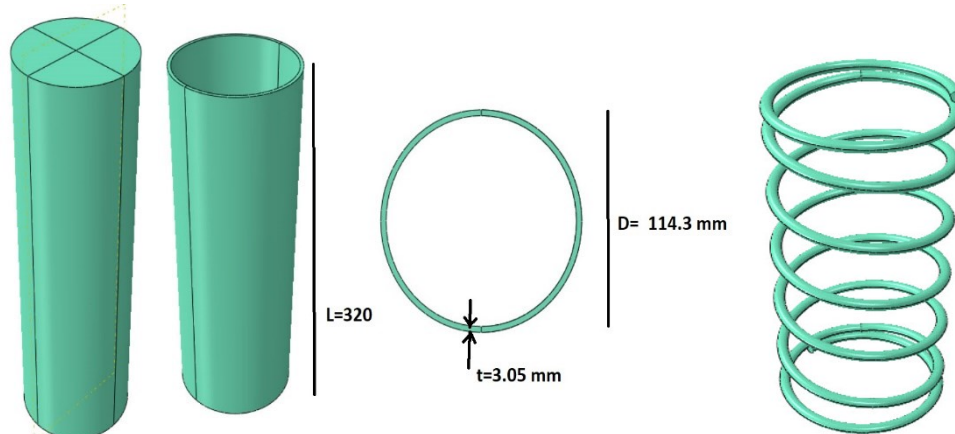
در این میان، استفاده از فنرهای مارپیچی خارجی به‌عنوان یک فناوری نوظهور، قابلیت‌های ویژه‌ای برای ارتقای عملکرد ستون‌های مرکب دارد. این تقویت‌کننده‌ها با آرایش پیوسته، مارپیچی و سه‌بعدی خود قادرند فشار محصورکننده یکنواخت و مؤثری در پیرامون ستون ایجاد کنند؛ فشاری که نه تنها موجب افزایش سختی جانبی و کنترل تغییرشکل‌ها می‌شود، بلکه می‌تواند کمانش موضعی پوسته فولادی را نیز به‌طور چشمگیری به تأخیر اندازد. همچنین ویژگی‌های هندسی فنر، از جمله قطر، گام، قطر سیم، و تعداد دورها می‌توانند اثر بسیار قابل توجهی بر میزان محصورشدگی مؤثر، توزیع تنش در بتن، و انتقال تنش بین دو لایه فولادی داشته باشند. این پارامترها به‌طور بالقوه قادرند ظرفیت باربری، شکل‌پذیری و رفتار پس‌کمانشی ستون را دگرگون کنند. بر همین اساس، نوآوری اصلی تحقیق حاضر بررسی کاربرد خارجی فنر مارپیچ در ستون‌های CFDST به‌عنوان روشی نوین برای افزایش مقاومت فشاری محوری و شکل‌پذیری است؛ موضوعی که تاکنون در هیچ‌یک از مطالعات پیشین مورد بررسی قرار نگرفته است. در این پژوهش، تلاش می‌شود تأثیر پارامترهای هندسی فنر - شامل قطر فنر، گام مارپیچ، سختی سیم و تعداد دورها - بر رفتار تنش-کرنش بتن، ظرفیت نهایی ستون، کمانش موضعی و منحنی بار-تغییرمکان ارزیابی شود. برای تحقق این اهداف، یک مدل دقیق اجزای محدود توسعه داده می‌شود تا بتواند برهم‌کنش سه‌گانه بتن، لوله‌های فولادی داخلی و خارجی و سیستم فنر مارپیچی را شبیه‌سازی کند. سپس نتایج تحلیل‌ها با داده‌های موجود در ادبیات تطبیق داده شده و تأثیر واقعی تقویت مارپیچی خارجی بر ستون‌های CFDST استخراج خواهد شد. در مجموع، این پژوهش با پرکردن یک شکاف پژوهشی کاملاً مشخص، می‌تواند

⁴ Low-Bond Ultra-High-Strength Steel

دید جدیدی نسبت به تقویت خارجی ستون‌های مرکب با استفاده از فنرهای مارپیچی ارائه دهد و راهکارهایی کاربردی برای افزایش ایمنی و کارایی این اعضا در سازه‌های مدرن، به‌ویژه در شرایط بارگذاری شدید، پیشنهاد کند.

۲- صحت‌سنجی ستون CFT تقویت شده با فنر مارپیچ

در این بخش به بررسی و صحت‌سنجی کاربرد فنر مارپیچ در بخش بیرونی یک ستون CFT پرداخته شده است. برای این منظور از مقاله مرجع [۲۱] به‌منظور صحت‌سنجی نتایج استفاده شده است. در این پژوهش ۱۶ نمونه ستون CFT که با استفاده از قطعه مارپیچ تقویت شده بودند پرداخته شد. تقویت قطعه مارپیچ در بخش بیرونی و داخلی لوله فولادی به‌کاررفته بود. نوع اتصال قطعه مارپیچ به‌صورت جوش در بخش بیرونی و درونی و بدون حالت جوش در این نمونه‌ها بود. تعداد حلقه‌های قطعه مارپیچ (۳، ۵ و ۷) دور، قطر نمونه‌ها ۵/۶ و ۸ میلی‌متر و روش نصب به دو صورت جوش خورده و جوش نخورده بود. در این پژوهش نمونه C-ES-8-5 به‌منظور صحت‌سنجی نتایج از بین نمونه‌های آزمایشگاهی انتخاب شد. طول ستون ۳۲۰ میلی‌متر، قطر خارجی ستون ۱۱۴/۳ میلی‌متر و ضخامت لوله فولادی برابر با ۳/۰۵ میلی‌متر بود. از طرفی در این نمونه قطعه مارپیچ از بیرون به لوله فولادی به‌صورت جوش متصل شده بود و تعداد حلقه‌های آن ۵ و قطر حلقه‌ها برابر با ۸ میلی‌متر بود. هندسه قطعه بتنی، لوله فولادی و قطعه مارپیچ به‌کاررفته در پژوهش در شکل ۱، ارائه شده است.



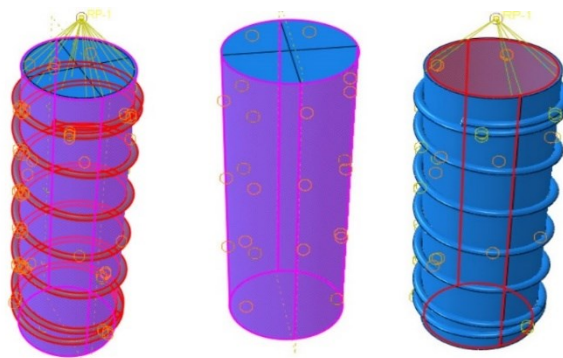
شکل ۱: هندسه بخش بتنی، لوله فولادی و قطعه مارپیچ به‌کاررفته در مدل صحت‌سنجی.

مواد به‌کاررفته در بخش لوله فولادی دارای تنش تسلیم ۳۸۰ مگاپاسکال بود. فولاد به‌کاررفته در بخش قطعه مارپیچ با قطر ۸ میلی‌متر دارای تنش تسلیم ۵۳۰ مگاپاسکال و نوع بتن به‌کاررفته در بخش بتنی، بتن با بیشترین تنش فشاری برابر با ۴۱ مگاپاسکال بود. نحوه تعریف و تخصیص مواد برای فولاد و بتن از مرجع [۲۲]، انتخاب و وارد نرم افزار آباکوس گردید. هندسه مونتاژی از نمونه تحلیل شده در شکل ۲، ارائه شده است.



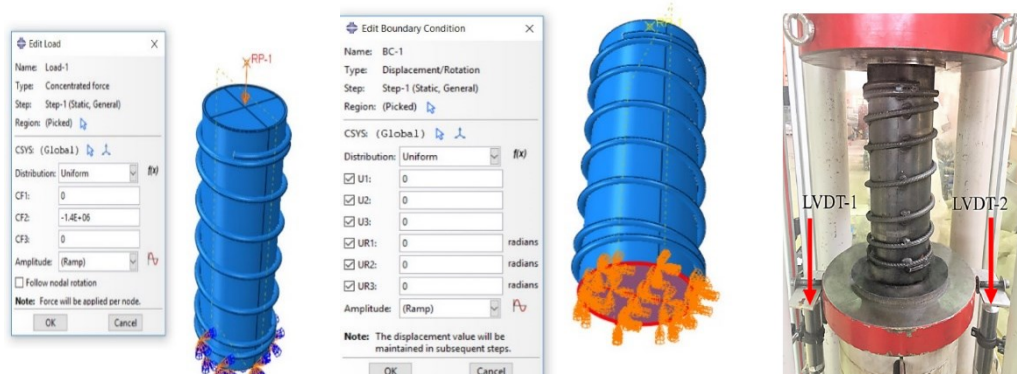
شکل ۲: هندسه نمونه تحلیل شده با قطعه مارپیچ در بخش بیرونی در بخش صحت‌سنجی.

نوع تحلیل به کاررفته به صورت استاتیکی می باشد و از فومول بندی تغییرشکل های بزرگ در طول تحلیل ها استفاده شده است. قیود به کاررفته در مدل شامل دو قید تای و کوپلینگ (اتصال میله ای) می باشد. قید تای برای اتصال بین بخش بتنی و لوله فولادی و همچنین اتصال بین قطعه مارپیچ و بخش بیرونی لوله فولادی از قید تای مطابق با شکل ۳، استفاده شده است. برای اعمال بار به بخش بالایی نمونه نیز یک قید کوپلینگ بین یک نقطه مرجع و بخش بالایی قطعه، اعمال می گردد.



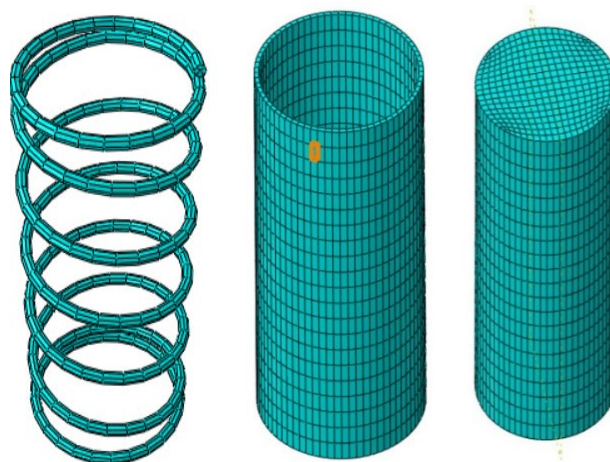
شکل ۳: قید تای به کاررفته در اتصال بخش بتنی و لوله فولادی و اتصال بین قطعه مارپیچ و بخش بیرونی لوله فولادی.

نمونه مطابق با شکل ۴، که در مقاله مرجع [۲۱]، ارائه شده است، تحت بارگذاری قرار می گیرد. به عبارتی بخش پایینی نمونه به طور کامل مقید شده و بار در بخش بالایی به نمونه اعمال مطابق با شکل ۴، اعمال می شود.



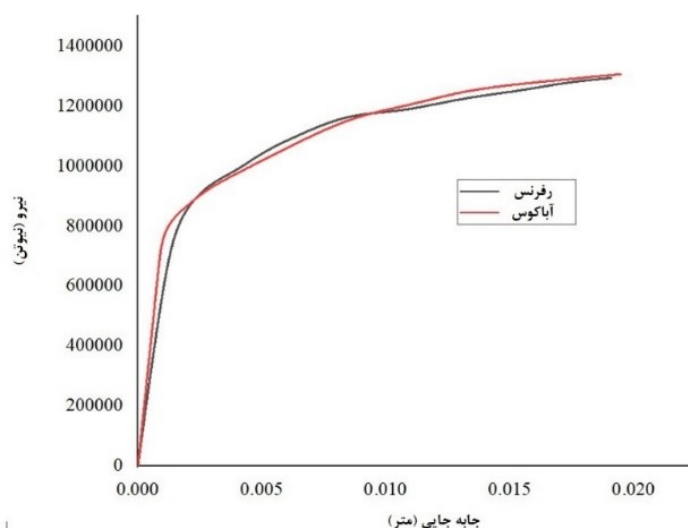
شکل ۴: شکل های از سمت راست به چپ. نحوه بارگذاری و شرایط مرزی ارائه شده در مقاله مرجع [۲۱]، مقید کردن کامل بخش پایینی نمونه، اعمال بار نیرویی به بخش بالایی نمونه.

نوع المان به کاررفته برای نمونه، C3D8R بود که یک المان سه بعدی ۸ گرهی است. اندازه دانه بندی شبکه در کل نمونه ها برابر ۱۵ میلی متر و در برخی نواحی برابر با ۵ میلی متر بود. هندسه شبکه بندی تک تک قطعات و نمونه سوار شده در شکل ۵، ارائه شده است.



شکل ۵: هندسه شبکه بندی شده بخش بتنی، لوله فولادی و قطعه مارپیچ.

مقایسه نمودار نمودار بار-جابجایی در نمونه تحلیل شده، از نرم افزار آباکوس و مقاله مرجع [۲۱]، نیز در شکل ۶، ارائه شده است.



شکل ۶: مقایسه بین نمودار بار-جابجایی به دست آمده از تحلیل آباکوس و مرجع [۲۱].

همان طور که در شکل ۶، مشاهده می شود، نتایج به دست آمده تطابق خوبی با نتایج مرجع [۲۱] دارد و اندک اختلاف موجود را می توان ناشی از خطای شبکه بندی دانست و با توجه به اختلاف اندک بین نتایج نتایج به دست آمده با دقت بالایی قابل قبول می باشد.

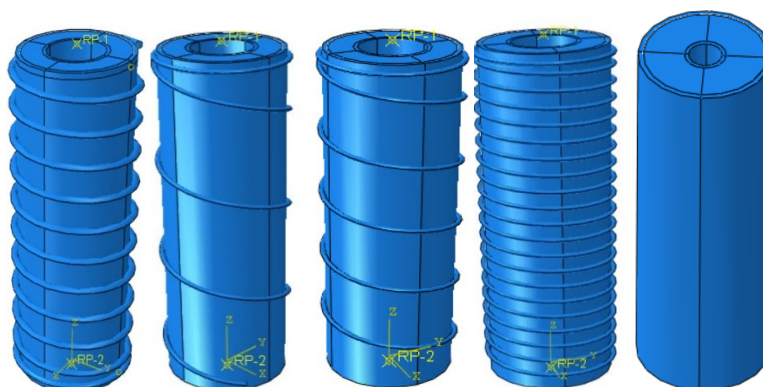
۳- مدل های اصلی تحلیل شده در این پژوهش

مدل های تحلیل شده در این پژوهش در دودسته اصلی تقسیم بندی می شوند. در دسته اول یک ستون CFDST دایروی بدون تقویت کننده خارجی و با مقطع دایروی می باشد که به عنوان مدل مبنا در نظر گرفته می شود و نتایج بقیه مدل ها با این مدل مقایسه خواهد شد. مدل های دسته دوم (۱۰ مدل)، دارای مشخصاتی مشابه با مدل دسته اول (مدل شماره ۱ و بدون تقویت کننده) با آرایش های مختلفی از فنر مارپیچ بودند که در آنها دو متغیر گام فنر مارپیچ و قطر فنر مارپیچ تغییر کرد. گام فنر مارپیچ تقویت کننده در مدل های ۲ تا ۷، بین اعداد (0.05h, 0.1h, 0.15h, 0.2h, 0.25h و 0.3h) تغییر کرد که h ارتفاع ستون بوده و برابر با ۵۷۰ میلی متر می باشد. قطر فنر مارپیچ تقویت کننده در مدل های ۸ تا ۱۱، بین اعداد (۶، ۸، ۱۰ و ۱۲ میلی متر) تغییر کرد.

جدول ۱: مشخصات مدل های تحلیل شده در این پژوهش.

نام مدل	قطر خارجی (میلی متر)	ضخامت جدار بیرونی (میلی متر)	قطر داخلی (میلی متر)	ضخامت جدار داخلی (میلی متر)	قطر فنر مارپیچ (میلی متر)	گام فنر مارپیچ
مدل شماره ۱	۲۰۰	۸	۵۰	۶	بدون تقویت کننده	
مدل شماره ۲	۲۰۰	۸	۵۰	۶	۸	۰.۰۵h
مدل شماره ۳	۲۰۰	۸	۵۰	۶	۸	۰.۱h
مدل شماره ۴	۲۰۰	۸	۵۰	۶	۸	۰.۱۵h
مدل شماره ۵	۲۰۰	۸	۵۰	۶	۸	۰.۲h
مدل شماره ۶	۲۰۰	۸	۵۰	۶	۸	۰.۲۵h
مدل شماره ۷	۲۰۰	۸	۵۰	۶	۸	۰.۳h
مدل شماره ۸	۲۰۰	۸	۵۰	۶	۶	۰.۱h
مدل شماره ۹	۲۰۰	۸	۵۰	۶	۸	۰.۱h
مدل شماره ۱۰	۲۰۰	۸	۵۰	۶	۱۰	۰.۱h
مدل شماره ۱۱	۲۰۰	۸	۵۰	۶	۱۲	۰.۱h

شماتیکی از برخی مدل های تحلیل شده در این پژوهش در شکل ۷ ارائه شده است.



شکل ۷: شماتیکی از مدل های تحلیل شده در این پژوهش (از راست به چپ به ترتیب، مدل شماره ۱ (بدون تقویت کننده)، مدل شماره ۲ (دارای فنر مارپیچ با گام مارپیچ ۰.۰۵h و قطر فنر مارپیچ ۸ میلی متر)، مدل شماره ۵ (دارای فنر مارپیچ با گام مارپیچ ۰.۲h و قطر فنر مارپیچ ۸ میلی متر)، مدل شماره ۷ (دارای فنر مارپیچ با گام مارپیچ ۰.۳h و قطر فنر مارپیچ ۸ میلی متر)، مدل شماره ۱۱ (دارای فنر مارپیچ با گام مارپیچ ۰.۱h و قطر فنر مارپیچ ۱۲ میلی متر)).

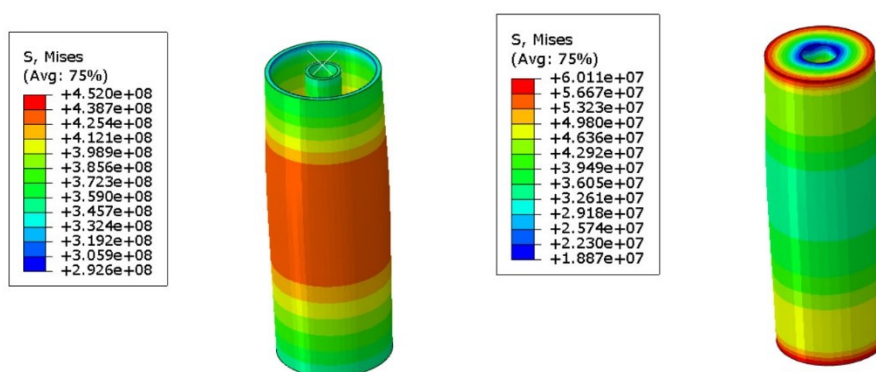
تمام تنظیمات به کاررفته در مدل ها، مشابه مدل صحت سنجی بوده است و تنها تفاوت در آنها فنر مارپیچ می باشد که به جدار خارجی ستون CFDST تای شده است. نتایج به دست آمده از تحلیل مدل ها در ادامه ارائه شده است. همچنین لازم به ذکر است که جنس فنر مارپیچ با جنس بخش های فولادی ستون CFDST یکسان در نظر گرفته شده است. محدوده پارامترهای انتخاب شده برای فنر مارپیچ با در نظر گرفتن ملاحظات اجرایی، امکان بررسی اثر محصورشدگی بتن و همخوانی با آیین نامه های طراحی انتخاب شده است. در این پژوهش گام مارپیچ به صورت تابعی از ارتفاع ستون تعریف شده و در بازه $h/0.5$ تا $h/3$ در نظر گرفته شد تا شرایطی از محصورشدگی متراکم تا محصورشدگی با فاصله بیشتر بین حلقه ها شبیه سازی گردد و اثر این پارامتر بر رفتار فشاری ستون به طور سیستماتیک مورد بررسی قرار گیرد. همچنین قطر فنر مارپیچ در محدوده ۶ تا ۱۲ میلی متر انتخاب شد که با قطرهای متداول عناصر فولادی در کاربردهای سازه ای مطابقت داشته و از نظر ساخت و اجرا نیز قابل تحقق در پروژه های واقعی می باشد. این محدوده امکان بررسی تأثیر سختی فنر مارپیچ بر میزان محصورشدگی بتن و ظرفیت باربری ستون را فراهم می کند.

۴- ارائه نتایج

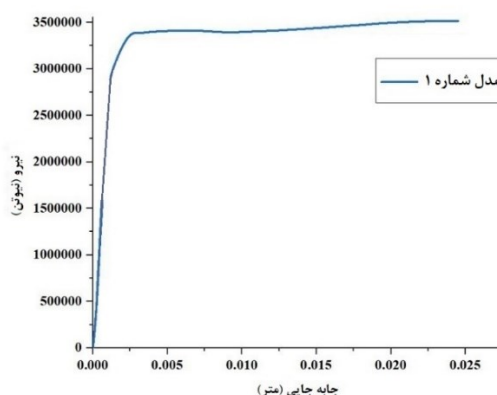
در این بخش نتایج به دست آمده از تحلیل های صورت گرفته بر روی ۱۱ مدل تحلیل شده در این پژوهش ارائه شده است.

۴-۱- ارائه نتایج مربوط به مدل شماره ۱ (ستون CFDST بدون تقویت کننده)

در این بخش نتایج مربوط به مدل شماره ۱ ارائه شده است. در این مدل قطر خارجی برابر با ۲۰۰ میلی متر، قطر داخلی برابر با ۵۰ میلی متر، قطر جدار خارجی فولادی ۸ میلی متر و قطر جدار داخلی برابر با ۶ میلی متر بود. نتایج توزیع تنش و نمودار بار-جابجایی در شکل ۸ و ۹ ارائه شده است.



شکل ۸: ارائه نتایج مربوط به مدل شماره ۱ (بدون تقویت کننده).



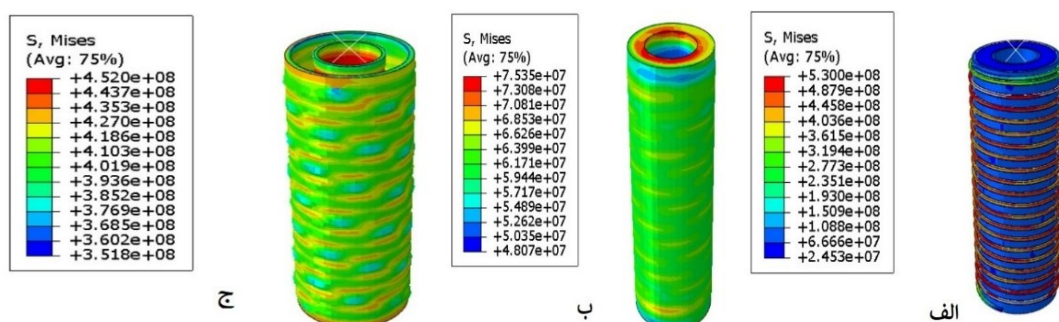
شکل ۹: نمودار بار - جابجایی در مدل شماره ۱ (نمونه بدون تقویت کننده)

با توجه به شکل های ۸ و ۹، توزیع تنش و رفتار بار-جابجایی مربوط به مدل شماره ۱ که به عنوان ستون CFDST بدون تقویت کننده در نظر گرفته شده است، قابل بررسی و تحلیل می باشد. مطابق توزیع تنش فون مایز در شکل ۸، بیشترین مقادیر تنش در نواحی نزدیک به محل اعمال بار در بخش فوقانی ستون و همچنین در نزدیکی تکیه گاه پایینی مشاهده می شود. این تمرکز تنش ناشی از انتقال مستقیم نیروی فشاری محوری از صفحات بارگذاری به مقطع ستون است. علاوه بر این، در ناحیه میانی لوله فولادی نیز نواحی با تنش نسبتاً بالا مشاهده می شود که نشان دهنده آغاز تغییر شکل های موضعی در جدار فولادی تحت اثر بار فشاری می باشد. در واقع، در ستون های لوله فولادی پر شده با بتن، لوله فولادی نقش اصلی را در محصورسازی بتن و تحمل تنش های کششی محیطی ایفا می کند، در حالی که هسته بتنی عمدتاً تحت تنش فشاری قرار دارد و موجب افزایش سختی و ظرفیت باربری مقطع می شود. توزیع نسبتاً یکنواخت تنش در طول ارتفاع ستون نشان دهنده انتقال مناسب نیرو بین اجزای فولادی و بتنی و عملکرد مناسب رفتار مرکب در مقطع CFDST است.

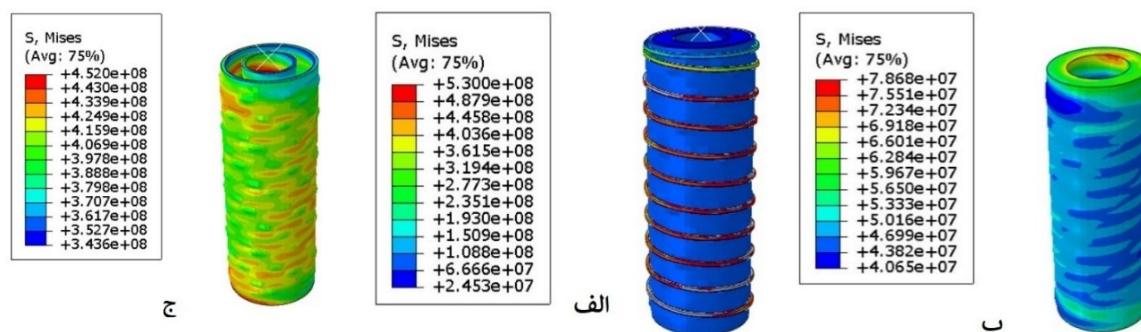
نمودار بار-جاب‌جایی ارائه شده در شکل ۹ نیز رفتار سازه‌ای این مدل را به خوبی نشان می‌دهد. در مراحل ابتدایی بارگذاری، نمودار دارای شیب نسبتاً تند و تقریباً خطی است که بیانگر رفتار الاستیک سیستم و سختی اولیه بالای ستون می‌باشد. در این مرحله، لوله فولادی داخلی و خارجی به همراه هسته بتنی به صورت همزمان در تحمل بار مشارکت کرده و تغییر شکل‌ها محدود است. با افزایش بار محوری، منحنی به تدریج از حالت خطی خارج شده و وارد ناحیه غیرخطی می‌شود که نشان‌دهنده آغاز رفتار پلاستیک در اجزای فولادی و همچنین افزایش کرنش فشاری در بتن مرکزی است. مطابق نتایج تحلیل، بیشترین ظرفیت باربری ستون در این مدل حدود ۳۴۵۰ کیلونیوتن به دست آمده است. پس از رسیدن به این مقدار، شیب نمودار کاهش یافته و منحنی به حالت تقریباً پایدار یا با سختی کمتری ادامه می‌یابد که بیانگر کاهش تدریجی سختی سازه و شروع پدیده‌هایی نظیر تسلیم موضعی فولاد و گسترش ترک‌های فشاری در بتن می‌باشد. عدم وجود تقویت‌کننده خارجی در این مدل موجب می‌شود که مقاومت جدار فولادی در برابر تغییر شکل‌های شعاعی محدودتر بوده و در نتیجه احتمال بروز کمانش موضعی در بخش‌هایی از لوله فولادی افزایش یابد. به طور کلی، نتایج مدل شماره ۱ نشان می‌دهد که اگرچه اثر محصورشدگی ایجاد شده توسط لوله فولادی باعث بهبود عملکرد فشاری بتن و افزایش ظرفیت باربری ستون می‌شود، اما در نبود سخت‌کننده‌های خارجی، پایداری جدار فولادی در برابر تغییر شکل‌های جانبی محدود بوده و این موضوع می‌تواند بر رفتار پس از اوج بار تأثیرگذار باشد. از این رو، این مدل به عنوان نمونه مبنا در نظر گرفته شده و در ادامه پژوهش، عملکرد آن با مدل‌های تقویت شده توسط فنر مارپیچ از نظر ظرفیت باربری، سختی و توزیع تنش مقایسه خواهد شد.

۲-۴- ارائه نتایج مربوط به ستون‌های تقویت شده با فنر مارپیچ در گام‌های مختلف

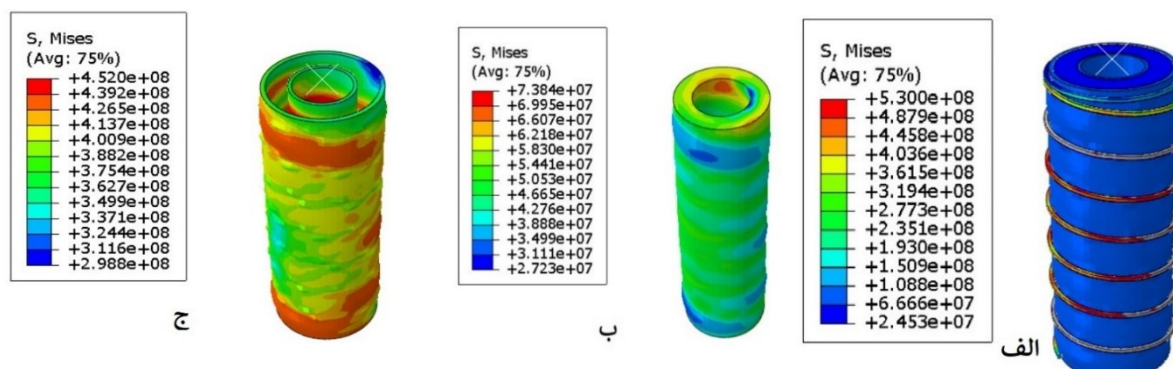
در این بخش نتایج مربوط به مدل‌های ۲ تا ۷، ارائه شده است. در این دسته قطر فنر مارپیچ برابر با ۸ میلی‌متر می‌باشد و گام قطر مارپیچ بین اعداد ۰.۰۵h، ۰.۱h، ۰.۱۵h، ۰.۲h، ۰.۲۵h و ۰.۳h، تغییر کرده است. در ابتدا نتایج مربوط به تحلیل تنش در شکل‌های ۴-۳۳ تا ۴-۳۸، ارائه شده است.



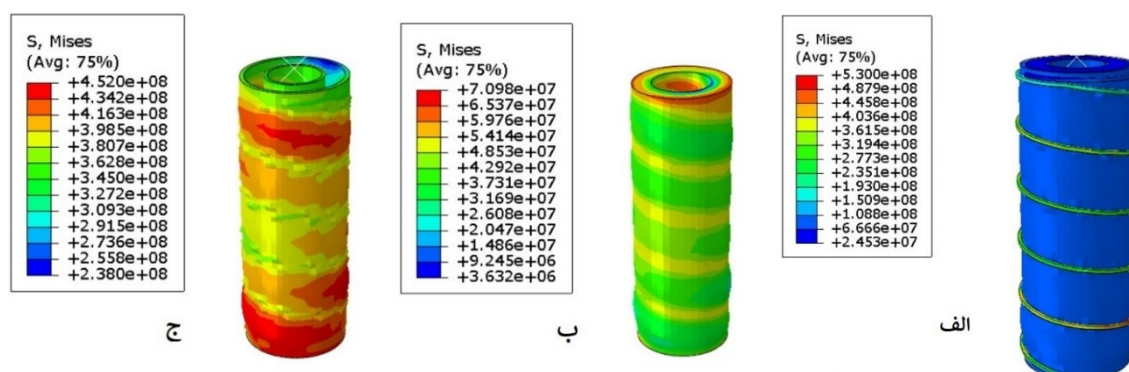
شکل ۱۰: ارائه نتایج مربوط به مدل شماره ۲، دارای فنر مارپیچ با قطر ۸ میلی‌متر و گام ۰.۰۵h.



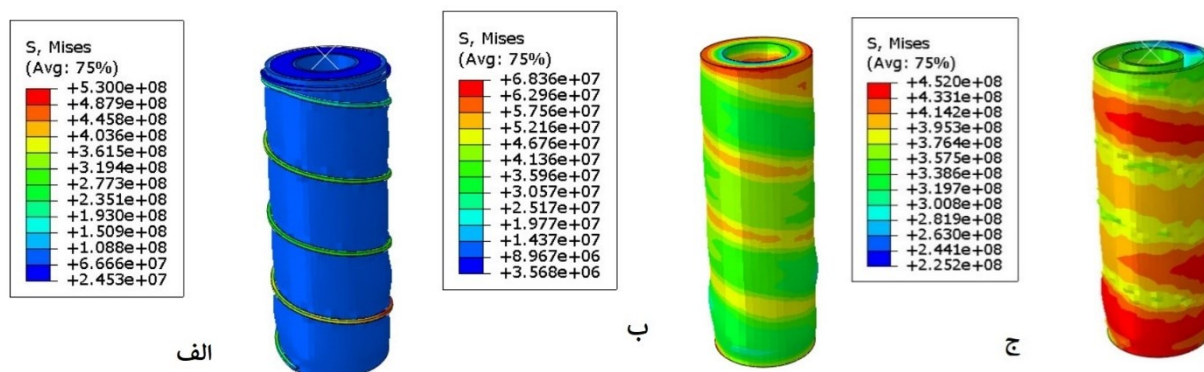
شکل ۱۱: ارائه نتایج مربوط به مدل شماره ۳، دارای فنر مارپیچ با قطر ۸ میلی‌متر و گام ۰.۱h.



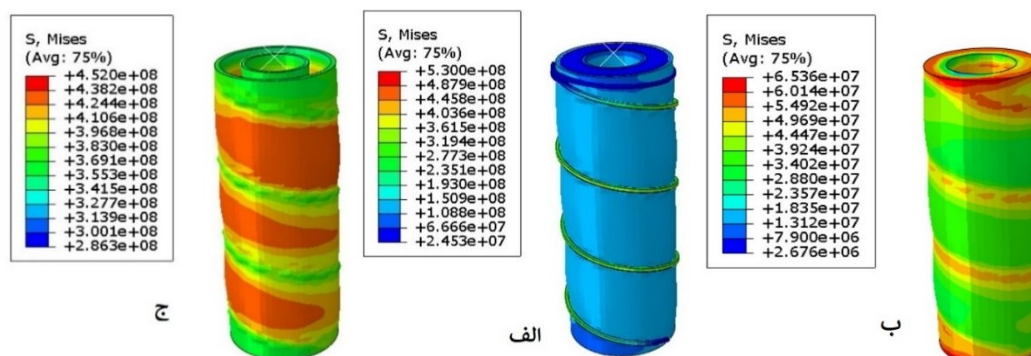
شکل ۱۲: ارائه نتایج مربوط به مدل شماره ۴، دارای فنر مارپیج با قطر ۸ میلی‌متر و گام ۰.۱۵h.



شکل ۱۳: ارائه نتایج مربوط به مدل شماره ۵، دارای فنر مارپیج با قطر ۸ میلی‌متر و گام ۰.۲h.

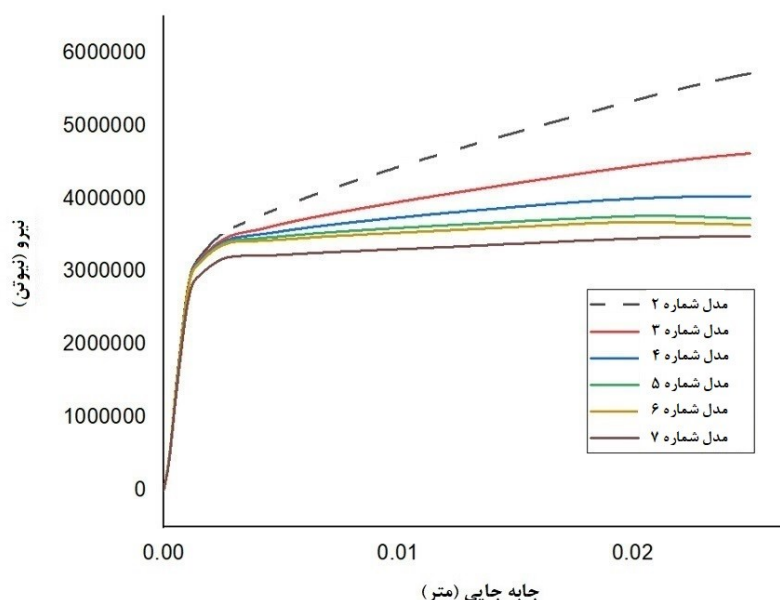


شکل ۱۴: ارائه نتایج مربوط به مدل شماره ۶، دارای فنر مارپیج با قطر ۸ میلی‌متر و گام ۰.۲۵h.



شکل ۱۵: ارائه نتایج مربوط به مدل شماره ۷، دارای فنر مارپیج با قطر ۸ میلی‌متر و گام ۰.۳h.

همان‌طور که در شکل‌های ۱۰ تا ۱۵ مشاهده می‌شود، با افزایش گام مارپیچ و کاهش تعداد حلقه‌های فنر، مقدار بیشینه تنش در هسته بتنی کاهش یافته، اما در مقابل گستره نواحی با تنش بالا در حجم بتن افزایش پیدا کرده است. این رفتار ناشی از کاهش میزان محصورشدگی جانبی بتن می‌باشد؛ به‌طوری‌که در گام‌های کوچک‌تر، به دلیل تراکم بیشتر حلقه‌های مارپیچ، بتن در طول ارتفاع ستون به‌صورت یکنواخت‌تری محصور شده و تنش‌ها در ناحیه محدودتری متمرکز می‌شوند. در مقابل، با افزایش گام فنر و کاهش تعداد حلقه‌ها، اثر محصورشدگی کاهش یافته و توزیع تنش در بخش وسیع‌تری از هسته بتنی گسترش پیدا می‌کند. از سوی دیگر، بررسی نتایج توزیع تنش در جدارهای فولادی نشان می‌دهد که با افزایش گام مارپیچ، نواحی پرتنش در لوله‌های فولادی داخلی و خارجی افزایش می‌یابد. این موضوع نشان‌دهنده آن است که در گام‌های بزرگ‌تر، سهم تحمل بار توسط اجزای فولادی بیشتر شده و در نتیجه تمرکز تنش در جدارهای فولادی افزایش پیدا می‌کند. در مقابل، در گام‌های کوچک‌تر به دلیل عملکرد مناسب فنر مارپیچ در ایجاد محصورشدگی جانبی، بخشی از بار فشاری توسط هسته بتنی محصور شده تحمل شده و توزیع تنش در اجزای فولادی یکنواخت‌تر خواهد بود. همچنین نتایج تحلیل نشان می‌دهد که در تمامی مدل‌های تقویت‌شده، فنرهای مارپیچ وارد محدوده رفتار مومسان شده‌اند که این موضوع بیانگر مشارکت مؤثر آن‌ها در تحمل نیروهای محیطی و محدودسازی تغییرشکل‌های شعاعی ستون می‌باشد. حضور این تقویت‌کننده‌ها موجب افزایش سختی جانبی مقطع شده و از بروز کمانش موضعی در جدار فولادی ستون CFDST جلوگیری می‌کند.



شکل ۱۶: مقایسه نتایج نمودار - نیرو - جابه‌جایی ستون‌های CFDST تقویت‌شده با فنر مارپیچ با گام‌های مختلف.

همان‌طور که در شکل‌های ۱۶، مشاهده می‌شود، همان‌طور که مشاهده می‌شود، استفاده از فنر مارپیچ موجب افزایش قابل توجه ظرفیت باربری ستون در مقایسه با نمونه بدون تقویت‌کننده شده است. دلیل اصلی این افزایش ظرفیت، ایجاد محصورشدگی مؤثر در هسته بتنی و در نتیجه افزایش مقاومت فشاری بتن می‌باشد. با این حال، در برخی نواحی به‌ویژه در محل تماس فنر مارپیچ با جدار خارجی ستون، افزایش موضعی تنش مشاهده می‌شود که ناشی از انتقال نیروهای محیطی توسط فنر مارپیچ است. بررسی نمودارهای بار-جابه‌جایی نشان می‌دهد که با افزایش گام مارپیچ و کاهش تعداد حلقه‌های فنر، ظرفیت باربری ستون به تدریج کاهش می‌یابد. در واقع، کاهش تراکم حلقه‌های مارپیچ باعث کاهش میزان محصورشدگی جانبی بتن شده و در نتیجه عملکرد مرکب مقطع تا حدی تضعیف می‌شود. بیشترین ظرفیت باربری در این نمونه‌ها در جدول ۲، ارائه شده است.

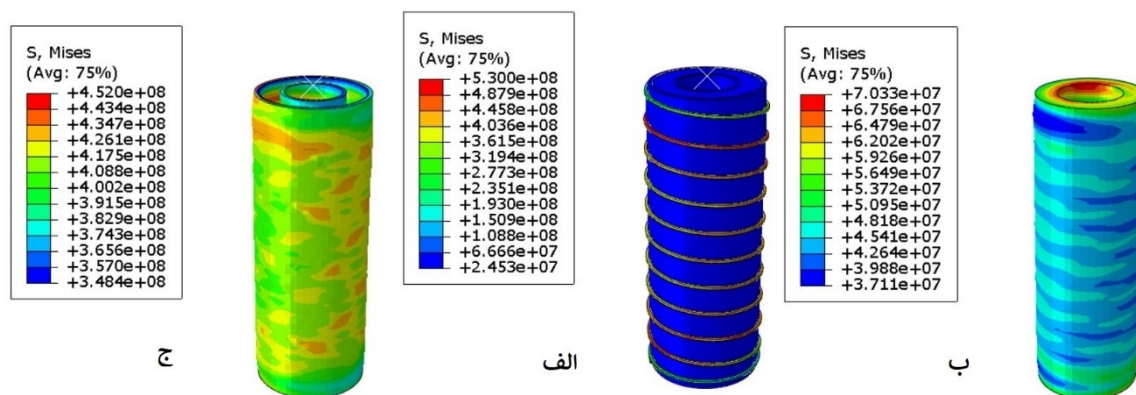
جدول ۲: ارائه نتایج بیشترین ظرفیت باربری در مدل های ۲ تا ۷ (گام فنر مارپیچ متغیر و در قطر ثابت ۸ میلی متر).

نام نمونه	مشخصات نمونه	ظرفیت باربری (کیلونیوتن)
مدل شماره ۲	گام فنر مارپیچ ۰.۰۵h و قطر فنر مارپیچ ۸ میلی متر	۵۷۲۰
مدل شماره ۳	گام فنر مارپیچ ۰.۱h و قطر فنر مارپیچ ۸ میلی متر	۴۶۲۰
مدل شماره ۴	گام فنر مارپیچ ۰.۱۵h و قطر فنر مارپیچ ۸ میلی متر	۴۰۳۰
مدل شماره ۵	گام فنر مارپیچ ۰.۲h و قطر فنر مارپیچ ۸ میلی متر	۳۷۳۰
مدل شماره ۶	گام فنر مارپیچ ۰.۲۵h و قطر فنر مارپیچ ۸ میلی متر	۳۶۴۰
مدل شماره ۷	گام فنر مارپیچ ۰.۳h و قطر فنر مارپیچ ۸ میلی متر	۳۴۹۰

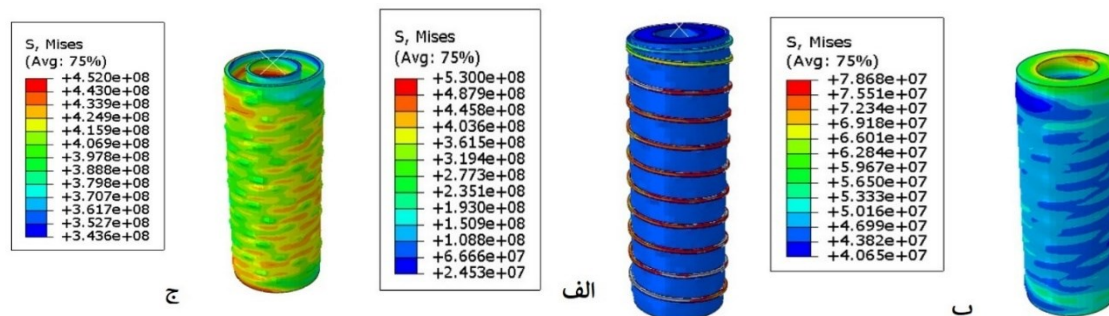
بر اساس نتایج به دست آمده، بیشترین ظرفیت باربری مربوط به مدل شماره ۲ با گام مارپیچ ۰.۰۵h می باشد که مقدار آن برابر با ۵۷۲۰ کیلونیوتن است. با افزایش گام مارپیچ، ظرفیت باربری به صورت تدریجی کاهش یافته و در مدل شماره ۷ با گام ۰.۳h مقدار آن به ۳۴۹۰ کیلونیوتن رسیده است. در مقایسه با نمونه بدون تقویت کننده، استفاده از فنر مارپیچ موجب افزایش ظرفیت باربری ستون ها در بازه ای بین حدود ۲ تا ۶۶ درصد شده است که نشان دهنده تأثیر قابل توجه این نوع تقویت کننده در بهبود عملکرد سازه ای ستون های CFDST می باشد.

۳-۴- ارائه نتایج مربوط به ستون های تقویت شده با فنر مارپیچ در گام ثابت و قطرهای متفاوت

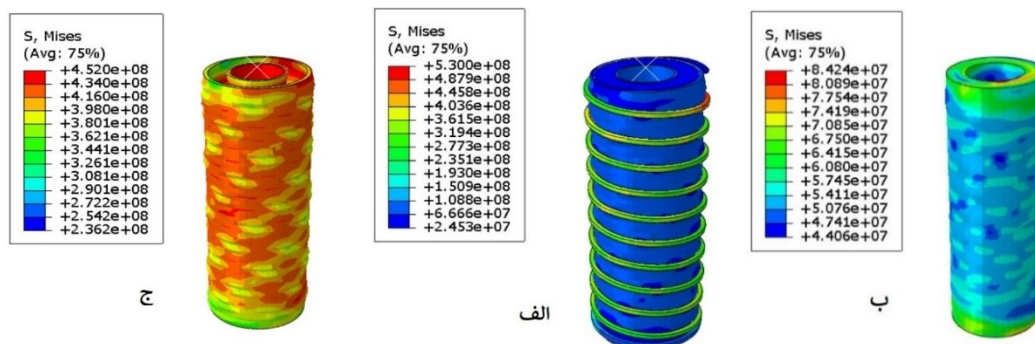
در این بخش نتایج مربوط به ستون های CFDST تقویت شده با فنر مارپیچ در گام ۰.۱h و در قطرهای مختلف ۸، ۱۰ و ۱۲ میلی متر مارپیچ ارائه شده است. علت در نظر گرفتن گام ۰.۱h این می باشد که تعداد حلقه ها نه آنقدر زیاد باشد که زمان حل بالا بروند و نه آنقدر کم باشد که اثرات آن کم بشود. در ادامه و در شکل های ۱۷ تا ۲۰، نتایج مربوط به توزیع تنش و در شکل ۲۱، نمودار بار- جابه جایی، در این نمونه ها ارائه شده است.



شکل ۱۷: ارائه نتایج مربوط به مدل شماره ۸، دارای فنر مارپیچ با قطر ۶ میلی متر و گام ۰.۱h.

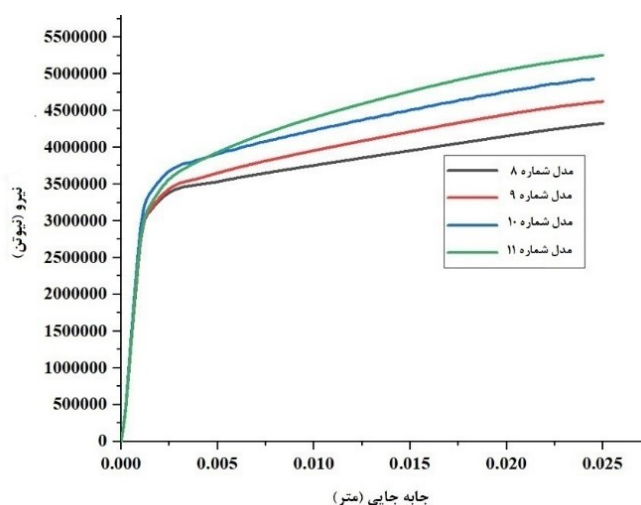


شکل ۱۸: ارائه نتایج مربوط به مدل شماره ۹، دارای فنر مارپیچ با قطر ۸ میلی متر و گام ۰.۱h.



شکل ۱۹: ارائه نتایج مربوط به به مدل شماره ۱۱، دارای فنر مارپیچ با قطر ۱۲ میلی‌متر و گام ۰.۱h.

نتایج مربوط به توزیع تنش فون‌مایز در مدل‌های مختلف در شکل‌های ۱۷ تا ۱۹ ارائه شده است. همان‌طور که در این شکل‌ها مشاهده می‌شود، با افزایش قطر فنر مارپیچ، مقدار تنش و گستره نواحی پرتنش در هسته بتنی و جدارهای فولادی داخلی و خارجی افزایش می‌یابد. این رفتار نشان‌دهنده افزایش میزان محصورشدگی جانبی بتن در اثر استفاده از فنرهای مارپیچ با قطر بزرگ‌تر است. در واقع، افزایش قطر فنر موجب افزایش سختی حلقه‌های مارپیچ و در نتیجه افزایش مقاومت آن‌ها در برابر تغییرشکل‌های شعاعی ستون می‌شود که این امر باعث انتقال بهتر نیروهای محیطی و افزایش تنش در بتن محصور شده می‌گردد. از سوی دیگر، نتایج نشان می‌دهد که با افزایش قطر فنر مارپیچ، مقدار تنش ایجاد شده در خود فنر کاهش می‌یابد. دلیل این موضوع افزایش سطح مقطع فنر و در نتیجه افزایش ظرفیت تحمل نیرو در آن است، به‌گونه‌ای که نیروهای محیطی در سطح مقطع بزرگ‌تری توزیع شده و مقدار تنش مؤثر کاهش می‌یابد. این امر بیانگر عملکرد مناسب فنرهای مارپیچ با قطر بزرگ‌تر در محدودسازی تغییرشکل‌های جانبی ستون می‌باشد.



شکل ۲۰: مقایسه نتایج نیرو-جابجایی ستون‌های CFDST تقویت‌شده با فنر مارپیچ با قطرهای مختلف.

همان‌طور که در شکل‌های ۲۰، مشاهده می‌شود، با افزایش قطر فنر مارپیچ، ظرفیت باربری ستون به‌صورت قابل توجهی افزایش می‌یابد. علت اصلی این افزایش ظرفیت، بهبود محصورشدگی بتن و افزایش مشارکت اجزای فولادی در تحمل بار فشاری می‌باشد. در واقع، افزایش قطر فنر موجب افزایش سختی جانبی سیستم شده و از گسترش تغییرشکل‌های شعاعی و کمانش موضعی جدار فولادی جلوگیری می‌کند. مقادیر بیشینه ظرفیت باربری برای نمونه‌های مختلف این دسته در جدول ۳، ارائه شده است.

جدول ۳: ارائه نتایج بیشترین ظرفیت باربری در ۴ نمونه گروه چهارم (گام فنر مارپیچ ثابت و در قطر متغیر).

نام نمونه	مشخصات نمونه	ظرفیت باربری (کیلو نیوتن)
مدل شماره ۸	گام فنر مارپیچ 0.1h و قطر فنر مارپیچ ۶ میلی متر	۴۳۳۰
مدل شماره ۹	گام فنر مارپیچ 0.1h و قطر فنر مارپیچ ۸ میلی متر	۴۶۲۰
مدل شماره ۱۰	گام فنر مارپیچ 0.1h و قطر فنر مارپیچ ۱۰ میلی متر	۴۹۵۰
مدل شماره ۱۱	گام فنر مارپیچ 0.1h و قطر فنر مارپیچ ۱۲ میلی متر	۵۲۵۰

بر اساس نتایج به دست آمده، با افزایش قطر فنر مارپیچ از ۶ میلی متر به ۱۲ میلی متر، ظرفیت باربری ستون از ۴۳۳۰ کیلو نیوتن به ۵۲۵۰ کیلو نیوتن افزایش یافته است. این روند افزایشی نشان دهنده تأثیر قابل توجه قطر فنر مارپیچ در بهبود عملکرد سازه‌ای ستون‌های CFDST تقویت شده می باشد. به عبارت دیگر، افزایش سطح مقطع فنر مارپیچ موجب افزایش میزان محصورشدگی بتن، بهبود توزیع تنش در اجزای فولادی و در نهایت افزایش ظرفیت باربری ستون خواهد شد.

۵- نتیجه گیری

در این پژوهش رفتار فشاری ستون‌های فولادی-پرسیده با بتن دولایه (CFDST) تقویت شده با سخت کننده‌های عرضی از نوع فنر مارپیچ مورد بررسی عددی قرار گرفت. ابتدا مدل اجزای محدود با استفاده از یک نمونه آزمایشگاهی معتبر از مرجع [۲۱] صحت سنجی شد و نتایج تطابق بسیار مناسبی را میان منحنی‌های بار-جابجایی و الگوهای کمانش نشان داد. این موضوع بیانگر توانایی مدل عددی در پیش‌بینی رفتار واقعی ستون‌های تقویت شده و مناسب بودن آن برای انجام مطالعات پارامتریک بود.

۱- نتایج مربوط به مدل مبنا (بدون تقویت کننده خارجی) نشان داد که اگرچه لوله فولادی نقش مؤثری در محصورسازی هسته بتنی و افزایش سختی اولیه ستون دارد، اما در بارهای بالا به دلیل کاهش محصورشدگی مؤثر و بروز کمانش موضعی جدار فولادی، ظرفیت باربری ستون محدود می شود. اضافه نمودن فنر مارپیچ به عنوان سخت کننده بیرونی، با ایجاد محصورشدگی جانبی یکنواخت تر، توانست این محدودیت را برطرف کند. مطالعات پارامتریک نشان داد که گام مارپیچ و قطر فنر دو پارامتر کلیدی در تعیین میزان محصورشدگی و بهبود رفتار سازه‌ای ستون هستند. کاهش گام مارپیچ (تراکم بیشتر حلقه‌ها) موجب افزایش قابل توجه ظرفیت باربری و کاهش نواحی پرتنش در جدار فولادی شد؛ به طوری که در گام‌های کوچک، افزایش ظرفیت باربری نسبت به مدل مبنا تا حدود ۶۶ درصد گزارش شد. از سوی دیگر، افزایش قطر فنر مارپیچ نیز با افزایش سختی حلقه‌ها و کاهش تغییرشکل‌های شعاعی ستون، موجب ارتقای عملکرد فشاری شد. در این حالت ظرفیت باربری در قطر ۱۲ میلی متر در مقایسه با قطر ۶ میلی متر بیش از ۲۰ درصد افزایش یافت.

۲- تحلیل توزیع تنش نشان داد که فنرهای مارپیچ حتی در بارهای متوسط وارد ناحیه مومسان می شوند و نقش فعالی در مهار جدار فولادی و جلوگیری از کمانش موضعی دارند. این موضوع نشان می دهد که سازوکار اصلی بهبود رفتار ستون، افزایش محصورشدگی سه بعدی بتن و مهار تنش‌های شعاعی است که به صورت مستقیم باعث افزایش مقاومت فشاری هسته بتنی و کاهش ناپایداری لایه‌های فولادی می شود. به طور کلی نتایج نشان داد که استفاده از سخت کننده مارپیچ می تواند عملکرد ستون‌های CFDST را به طور قابل توجهی بهبود بخشد. با انتخاب مناسب گام و قطر فنر، می توان ستون‌هایی با ظرفیت باربری بیشتر، تأخیر در کمانش موضعی، جذب انرژی بالاتر و عملکرد پایدارتر تحت بارگذاری فشاری تولید کرد. این نتایج می تواند برای طراحی بهینه ستون‌های مرکب فولادی-بتنی، به ویژه در سازه‌های تحت بارگذاری‌های سنگین یا محیط‌های لرزه‌ای، مورد استفاده مهندسان طراح قرار گیرد.

۳- افزایش ظرفیت باربری ستون‌های تقویت شده با فنر مارپیچ را می توان با توجه به مکانیسم محصورشدگی بتن و کنترل تغییرشکل‌های جانبی لوله فولادی توضیح داد. وجود فنر مارپیچ باعث اعمال فشار جانبی اضافی بر بتن هسته شده و در نتیجه میزان محصورشدگی بتن افزایش می یابد. این محصورشدگی موجب بهبود رفتار تنش-کرنش بتن، افزایش کرنش نهایی و تأخیر در خردشدگی بتن می شود که در نهایت به افزایش مقاومت فشاری مؤثر ستون منجر می گردد.

۴- از سوی دیگر، فنر مارپیچ با محدود کردن تغییر شکل شعاعی جداره فولادی، از بروز زود هنگام کمناش موضعی در لوله فولادی جلوگیری می‌کند. کاهش و تأخیر در کمناش موضعی باعث می‌شود که لوله فولادی بتواند سهم بیشتری در تحمل بار محوری داشته باشد و عملکرد مرکب سیستم فولاد-بتن بهبود یابد. به همین دلیل در مدل‌هایی که گام فنر مارپیچ کمتر است، به دلیل افزایش تراکم حلقه‌ها و محصورشدگی بیشتر بتن، ظرفیت باربری ستون نیز افزایش قابل توجهی نشان می‌دهد.

۵- با وجود بهبود قابل توجه ظرفیت باربری ستون‌های تقویت‌شده با فنر مارپیچ خارجی، استفاده از این سیستم در کاربردهای عملی نیازمند توجه به برخی ملاحظات اجرایی و عملکردی است. از نظر اجرایی، نصب فنر مارپیچ بر روی سطح خارجی ستون می‌تواند به عنوان یک روش نسبتاً ساده برای تقویت یا بهسازی ستون‌های فولادی پر شده با بتن مورد استفاده قرار گیرد؛ با این حال نحوه اتصال مناسب فنر به جداره فولادی و کنترل دقیق فاصله حلقه‌ها از جمله موارد مهم در فرآیند اجرا محسوب می‌شود. همچنین قرارگیری تقویت‌کننده در محیط خارجی ممکن است آن را در معرض عوامل محیطی و خوردگی قرار دهد، بنابراین استفاده از پوشش‌های محافظ یا تمهیدات مناسب برای افزایش دوام سیستم ضروری خواهد بود. علاوه بر این، اگرچه افزایش محصورشدگی بتن می‌تواند به بهبود شکل‌پذیری عضو کمک کند، بررسی دقیق عملکرد این سیستم تحت بارگذاری‌های چرخه‌ای و لرزه‌ای نیازمند مطالعات آزمایشگاهی و عددی بیشتر در تحقیقات آینده می‌باشد.

مراجع

- [1] Pratik, P., Arth, P. and Sharadkumar. Purohit. (2025). Confinement Studies on Concrete Filled Steel Tube Composite Columns: Numerical and Experimental Investigations. In: *Recent Developments in Structural Engineering*, 3, 245–254.
- [2] Li, H., Fang, Y., Yang, H. and Wang, Y. (2026). Behaviour of concrete-filled double-skin steel tubular columns with outer galvanized corrugated steel tubes under monotonic and cyclic axial compression. *Structures*, 84, 111083.
- [3] Jin, K.-Y., Zhou, X.-H., Ren, W., Wang, Y.-H. and Li, R.-F. (2024). Axial compressive behavior of concrete-filled double skin steel tubular columns with different stiffening constructions for wind turbine towers. *Structures*, 63, 106390.
- [4] Wei, Y., Zhang, X., Wu, G. and Zhou, Y. (2018). Behaviour of concrete confined by both steel spirals and fiber-reinforced polymer under axial load. *Composite Structures*, 192, 577–591.
- [5] Lin, C. and Zhou, J. (2023). Axial compressive behavior of circular composite columns with external confinement. *Journal of Building Engineering*, 77, 107516.
- [6] Yang, Z., Sun, L. and Liu, M. (2025). Numerical study of high-strength spiral stirrup confined high-strength concrete filled high-strength square steel tubular short columns under axial compression. *Structures*, 72, 108246.
- [7] Ahmed, M., Sheikh, M.N., Hadi, M.N.S. and Liang, Q.Q. (2023). Nonlinear analysis of square spiral-confined reinforced concrete-filled steel tubular short columns incorporating novel confinement model and interaction local buckling. *Engineering Structures*, 274, 115168.
- [8] Sricharan, B.S., R.P.S. and Gangadhara, S. and Kumar, P.K. (2025). Experimental investigation on behaviour of circular concrete filled double skin tubular short columns (CFDST) under axial compressive loads. *Architecture, Structures and Construction*, 5(59).
- [9] Guo, J., Li, P., Pan, S. and Chen, M. (2025). Numerical simulation on residual axial compression bearing capacity of square in square CFDST columns after lateral impact. *Scientific Reports*, 15, 24042.
- [10] El Sherbiny, M.G., Serror, M.H., Ramadan, O.M.O. and Khalil, A.M. (2025). Gap study on concrete filled steel tube (CFST) and concrete filled double steel tube (CFDST) columns subjected to blast loads. *Scientific Reports*, 15, 43195.
- [11] Patel, A.J. and Purohit, S.P. (2025). Experimental Investigation on Concrete Filled Double Skinned Steel Tubular (CFDST) Column with Concrete Imperfections. In: *Proceedings of the 3rd International Conference on Advances in Concrete, Structural, and Geotechnical Engineering (ACSGE 2024)*. 205–218.

- [12] Pham, D.-D., Vu, H.-P., Nguyen, H.-V., Trinh, V.-T. and Tu, D.-X. (2024). Behavior of CFDST Stub Columns Considering Various Concrete Strengths. In: *Proceedings of the 3rd Annual International Conference on Material, Machines and Methods for Sustainable Development (MMMS 2022)*. 141–147.
- [13] Casita, C.B., Suswanto, B. and Iranata, D. (2025). An Advancement in Structural Design: The Impact of Cross-Sectional Geometry on the Performance of CFDST Columns. In: *Selected Articles from the 8th International Conference on Architecture and Civil Engineering (ICACE 2024)*, 635, 164–173.
- [14] Ahmad, M.F., Abu Husain, M.K., Mukhlas, N.A., Ahmad, S. and Zaki, N.I.M. (2026). A review of the design equations for the axial capacities of circular concrete-filled double-skinned tubular columns. *Innovative Infrastructure Solutions*, 11, 166.
- [15] Hindhumadhi, R. and Revathi, P. (2025). Capacity of concrete filled double skin tubular column under axial compression. *Innovative Infrastructure Solutions*, 10, 292.
- [16] Alrebeh, S.K., Ahmed, A.D., Al-Asad, A.K. and Ekmekyapar, T. (2023). Experimental Performance Evaluation of Concrete-Filled Steel Tube Columns Confined by High-Strength Steel Bolts. *International Journal of Steel Structures*, 23, 1135–1147.
- [17] Zhang, S., Miao, K., Wei, Y., Xu, X., Luo, B. and Shi, W. (2023). Experimental and Theoretical Study of Concrete-Filled Steel Tube Columns Strengthened by FRP/Steel Strips Under Axial Compression. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 17, 1.
- [18] Cai, G., Wen, Y., Malla, P.B., Fujinaga, T. and Si Larbi, A. (2024). Effect of axial load and shear span on seismic performance of CFT columns reinforced with end-fixed ultra-high strength rebars. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 22, 4515–4543.
- [19] Sachdeva, A., Vyavahare, A. and Sachdeva, G. (2023). Concrete-Filled Tubular Column: A Comparative Study of EC4 and AISC 360-10. In: *Proceedings of the Indian Structural Steel Conference (ISSC 2020)*, 319, 167–179.
- [20] Hu, H.-S., Xu, L., Guo, Z.-X. and Shahrooz, B.M. (2020). Behavior of eccentrically loaded square spiral-confined high-strength concrete-filled steel tube columns. *Engineering Structures*, 216, 110743.
- [21] Alrebeh, S.K. and Ekmekyapar, T. (2019). Structural behavior of concrete-filled steel tube short columns stiffened by external and internal continuous spirals. *Structures*, 22, 98–108.
- [22] Ipek, S., Erdogan, A. and Guneyisi, E.M. (2021). Compressive behavior of concrete-filled double skin steel tubular short columns with the elliptical hollow section. *Journal of Building Engineering*, 38, 102204.