



## بررسی رفتار ستون‌های فولادی پر شده با بتن مسلح (CFT) تحت بارگذاری حرارتی و محوری تناوبی

محمدحسین طالب‌پور<sup>۱</sup>، امیرمسعود صادقیان<sup>۲</sup>

۱- استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه دامغان

۲- کارشناس ارشد سازه، دانشکده فنی و مهندسی دارالفنون، دانشگاه آزاد اسلامی واحد دامغان

:

M.H.Talebpour@du.ac.ir

### خلاصه

ستون‌های فلزی پر شده با بتن مسلح (CFT) یکی از انواع ستون‌های کامپوزیتی است که امروزه در مهندسی عمران بویژه صنعت ساختمان مورد توجه بسیاری از مهندسين قرار گرفته است. در این مقاله سعی شده است تا رفتار ستون‌های CFT تحت بارگذاری حرارتی و محوری تناوبی مورد بررسی قرار گیرد. در این راستا تاثیر مقاومت فولاد لایه خارجی و مقاومت فولاد آرماتورهای داخلی بتن نیز ارزیابی شده است. بدین منظور سه مدل ستون CFT براساس دو نوع فولاد معمولی و فولاد پرمقاومت تعریف خواهد شد. در هر مدل نوع فولاد لایه خارجی ستون و آرماتورهای داخلی بتن تغییر می‌نماید. برای مدلسازی از نرم افزار ABAQUS استفاده و کانتورهای تنش و تغییرشکل به عنوان معیاری برای ارزیابی مدل‌ها در نظر گرفته شده است. در فرآیند تحلیل، ابتدا ستون تحت بار حرارتی قرار می‌گیرد. سپس با مشخص شدن دمای حداکثر براساس معیار گسیختگی در هر مدل، بارگذاری محوری تناوبی تحت شرایط بار حرارتی در دماهای حداقل و حداکثر انجام می‌شود. در نهایت کانتورهای تنش و تغییرشکل در دمای حداقل (معمولی) و دمای حداکثر برای هر مدل ارائه خواهد شد. نتایج دلالت بر عملکرد مناسب ستون‌های CFT در بارگذاری حرارتی دارد. همچنین براساس نتایج حاصل می‌توان بیان نمود که افزایش مقاومت فولاد سبب کاهش مقادیر تنش، تغییرشکل و نیز تاثیر بار حرارتی می‌شود.

**کلمات کلیدی:** بارگذاری حرارتی، بار محوری تناوبی، مقاومت فولاد، CFT.

### ۱. مقدمه

در دهه‌های اخیر گسترش سازه‌های اسکلتی در مهندسی عمران بویژه صنعت ساختمان رشد قابل توجهی داشته است. براین اساس همواره مهندسين در راستای اجرای طرحی بهینه از نظر هزینه، زمان و ... شرایط پروژه بررسی می‌نمایند. در این میان سازه‌های فلزی و بتنی با توجه به معایب و محاسن مختلف رقابت نزدیکی با یکدیگر دارند. رقابت نزدیک این دو نوع سازه اسکلتی سبب شده تا در سالیان اخیر المان‌های کامپوزیتی که بعضاً ترکیبی از مصالح مذکور بوده، مورد توجه قرار گیرد. استفاده همزمان مصالح بتنی و فولادی در المان‌های سازه‌ای می‌تواند نقش موثری در بهبود رفتار عضو داشته باشد. در این میان ستون‌های CFT از جمله ستون‌های کامپوزیتی می‌باشند که امروزه در سازه‌های مختلف بویژه ساختمان‌هایی با کاربری متفاوت دیده می‌شود. اثر متقابل فولاد و بتن، صرفه‌جویی در زمان و نیز هزینه به واسطه حذف قالب‌بندی و ... از جمله مزایای ستون‌های CFT است. این ستون‌ها عموماً از جداره فولادی که با مصالح بتنی پر شده، تشکیل می‌شوند. بتن داخلی بعضاً به صورت مسلح نیز می‌باشد. رفتار ستون‌های CFT به سبب کارایی و عملکرد مناسب مورد توجه قرار گرفته است. بر همین اساس این ستون‌ها تحت شرایط مختلف سازه‌ای و حالات متفاوت بارگذاری توسط محققین مختلف ارزیابی شده است. یکی از این شرایط، بارگذاری حرارتی است. با توجه به شرایط ستون، انتظار می‌رود که رفتار مناسبی تحت شرایط بار آتش وجود داشته باشد. از سوی دیگر نوع فولاد مصرفی و نیز مقاومت فولاد، می‌تواند عاملی مهم در رفتار ستون‌های فولادی پر شده با بتن مسلح باشد. این مسئله سبب شده تا تحقیقات متنوعی در زمینه رفتار ستون‌های CFT تحت بار آتش و نیز شرایط متفاوت سازه‌ای صورت پذیرد.

نخستین تحقیق رسمی در زمینه مقاطع CFT در سال ۱۹۶۱ در کشور ژاپن انجام شد. در این تحقیق مقاطع دایره‌ای فولادی که با بتن پر شده بود، به عنوان یک عضو فشاری از دکل برق مدل و مورد بررسی قرار گرفت [۱]. پس از آن با توجه به رفتار مناسب مقاطع فولادی پر شده با بتن، تحقیقات در این زمینه گسترش یافت. در دهه‌های اخیر نیز تحقیقات متنوعی به خصوص در زمینه تاثیر بار حرارتی بر رفتار ستون‌های CFT انجام شده است. در این راستا اشنایدر در سال ۱۹۹۸ در یک تحقیق آزمایشگاهی و نیز تحلیلی، رفتار ستون‌های CFT را که تا مرحله شکست بارگذاری شده‌اند،

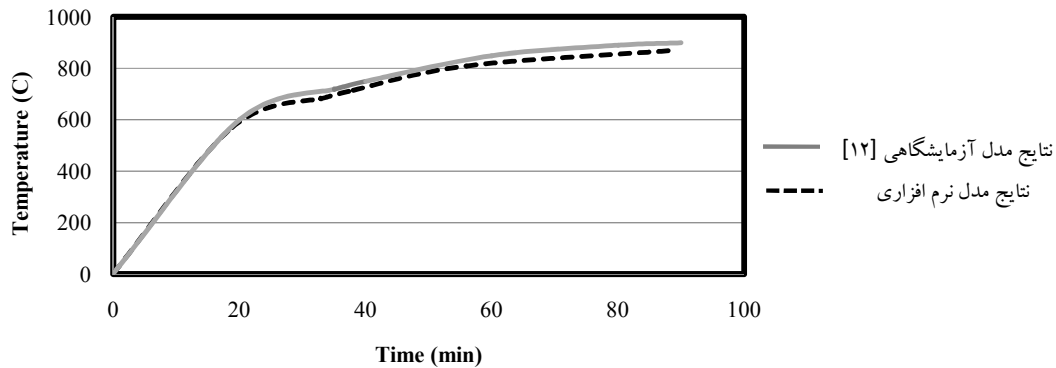


مورد بررسی قرار داد. در این تحقیق چهارده نمونه برای بررسی متغیرهایی همچون شکل لوله و نیز ضخامت جداره فولادی بر مقاومت ستون تحت بار متمرکز فشاری، مورد آزمایش قرار گرفت. سپس مدل المان محدود غیرخطی نیز براساس نتایج آزمایشگاهی توسعه داده شد. نتایج نشان داد که رفتار مقاطع دایره‌ای از سایر حالات بهتر بوده و مقاومت و نیز سختی قابل توجهی نسبت به مقاطع مربعی و مستطیلی ارائه می‌دهند [۲]. جوهانسون و گیلنت در سال ۲۰۰۱ یازده نمونه آزمایشگاهی ستون‌های مرکب فولادی پر شده با بتن را تحت سه روش اعمال بار مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق نتایج مدل‌های اجزای محدود غیرخطی سه بعدی نیز با مدل‌های آزمایشگاهی مقایسه و مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج حاصل از مدل تحلیلی و نیز مدل‌های آزمایشگاهی، دلالت بر تاثیر فراوان شیوه بارگذاری دارد [۳]. جیاکومیس و لام در سال ۲۰۰۴ رفتار ستون‌های CFT را با استفاده از آیین‌نامه‌های مختلف تحت بار محوری مورد ارزیابی قرار دادند. در این تحقیق مقاومت بتن، اثرات ضخامت لوله فولادی و نیز استحکام اتصال بتن و لایه فولادی بررسی گردید. نتایج نشان می‌دهد که آیین‌نامه اروپا بهترین تخمین را برای رفتار ستون‌های CFT با بتن معمولی و بتن پرمقاومت ارائه می‌دهد [۴]. الوبادی و یانگ نیز در تحقیق دیگر در سال ۲۰۰۶ با استفاده از مدل المان غیرخطی به بررسی رفتار و طراحی ستون‌های فولادی ضدزنگ پر شده با بتن تحت بار محوری پرداختند. این محققین پس از تایید مدل المان محدود با استفاده از نتایج آزمایشگاهی، مطالعه پارامتری اثرات هندسه سطح مقطع و مقاومت بتن بر رفتار ستون انجام دادند [۵]. پورتولس و همکاران در سال ۲۰۱۱ رفتار ستون‌های CFT را با در نظر گیری پارامترهایی همچون مقاومت بتن، نسبت قطر ستون به ضخامت جداره فولادی، نسبت خروج از مرکزیت بار و نیز نسبت ضریب لاغری مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق ۳۷ مدل آزمایشگاهی تهیه و تحت بار محوری قرار گرفت. نتایج دلالت بر رفتار مناسب ستون در حالت بتن مقاومت بالا دارد. همچنین در خصوص سایر متغیرها نیز پیشنهاداتی ارائه گردید [۶]. در سال ۲۰۱۳ توندینی و همکاران در یک تحقیق آزمایشگاهی و عددی به بررسی رفتار ستون‌های فولادی با مقاومت بالا تحت بار حرارتی در دو حالت CFT و مقاطع توخالی دایره‌ای (CHS) پرداختند. در این تحقیق نمونه‌های آزمایشگاهی تحت بار آتش استاندارد به همراه نیروی محوری فشاری قرار گرفتند. مقادیر دما و نیز الگوهای تغییر شکل در مدل‌های آزمایشگاهی اندازه‌گیری و با مدل‌های عددی مورد مقایسه قرار گرفت. در نهایت نتایج مدل‌های عددی بر مبنای آیین‌نامه ارزیابی گردید [۷]. هو و همکاران در سال ۲۰۱۶ دیدگاه نوینی را برای مدلسازی حرارتی ستون‌های فولادی پر شده با بتن ارائه دادند. در این تحقیق بتن از نوع پرمقاومت در نظر گرفته شده و شرایط بار حرارتی منطبق بر بار آتش استاندارد فرض شده است. مدل ارائه شده بر مبنای متغیرهای همچون نحوه انتشار حرارت، شرایط فصل مشترک بتن و فولاد و نیز مقاومت بتن مورد بررسی قرار گرفته است. در نهایت مدل‌هایی برای پیش‌بینی رفتار ستون تحت بار آتش ارائه شده است [۸]. موسوی داوودی و نقی‌پور در سال ۲۰۱۹ به بررسی پارامترهای مختلفی همچون هندسه ستون بر رفتار کماتشی و ظرفیت لرزه‌ای ستون‌های فولادی پر شده با بتن پرداختند. در این تحقیق بارگذاری به صورت تناوبی در نظر گرفته شده و نتایج تحقیق نشان می‌دهد که رفتار ستون‌های دایره‌ای نسبت به ستون‌های مربعی مناسب‌تر می‌باشد [۹].

همان‌طور که مشاهده گردید، قابلیت‌های ستون CFT سبب شده است تا تحقیقات متنوعی در زمینه‌های مختلف سازه‌ای صورت پذیرد. از سوی دیگر کاربری مناسب این ستون‌ها در صنعت، توجه بسیاری از مهندسان را جلب کرده است. بدین منظور در مقاله حاضر با توجه به تحقیقات گذشته، رفتار ستون‌های CFT تحت بار محوری و بار آتش مورد بررسی قرار گرفته است. برای نیل به این هدف، سه مدل ستون CFT که دارای بتن مسلح می‌باشند، تعریف شده است. در هر مدل نوع فولاد مصرفی در لایه خارجی و نیز آرماتورهای داخلی بتن متفاوت می‌باشد. بر این اساس دو نوع فولاد مصرفی از نوع معمولی و پرمقاومت با مشخصات مکانیکی مفروض انتخاب شده است. تمامی مدل‌ها دارای شرایط یکسانی بوده و تنها نوع فولاد مصرفی تغییر می‌نماید. این مدل‌ها در نرم‌افزار ABAQUS مدلسازی شده و تحت بار حرارتی و بار محوری تناوبی قرار گرفته است. برای این منظور ابتدا ستون تحت بار حرارتی قرار گرفته و دمای حداکثر براساس معیار گسیختگی تعیین شده است. سپس براساس مقادیر دمای حداکثر و حداقل (معمولی)، بارگذاری محوری به صورت تناوبی اعمال شده است. در نهایت رفتار ستون براساس کانتورهای تنش و تغییر شکل بررسی و ارزیابی می‌شود. نتایج دلالت بر تاثیر اندک دما در ستون‌های CFT داشته و تاثیر فولاد پرمقاومت در رفتار ستون را نشان می‌دهد. بر این اساس با افزایش مقاومت فولاد مقادیر تنش، تغییر شکل و نیز تاثیر حرارت کاهش می‌یابد. تاثیر نوع فولاد در لایه خارجی ستون CFT از اهمیت بیشتری برخوردار است.

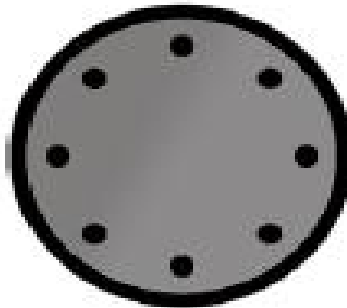
## ۲. مدلسازی، صحت سنجی و تحلیل ستون‌های CFT

تحلیل سه بعدی سازه‌ها براساس اجزای محدود غیرخطی در نرم‌افزار ABAQUS توسط محققین مختلف توسعه و مورد بررسی قرار گرفته است. بر این اساس در مقاله حاضر نیز با توجه به انطباق نتایج با واقعیت از تحلیل توسعه یافته اجزای محدود غیرخطی در حالت سه بعدی استفاده شده است. این فرآیند عموماً برای شبیه‌سازی رفتار بار حرارتی در ستون‌های CFT نیز استفاده می‌شود [۱۱-۱۰]. در این راستا فرآیند صحت‌سنجی براساس نتایج آزمایشگاهی مرجع [۱۲] انجام شده است. نتایج صحت‌سنجی مدل نرم‌افزاری بشرح شکل ۱ می‌باشد.



شکل ۱ - مقایسه نتایج مدل نرم افزاری و مدل آزمایشگاهی مرجع [۱۲] (صحت سنجی مدل نرم افزاری)

پس از تایید مدل نرم افزاری و انطباق مناسب نتایج عددی با مدل آزمایشگاهی، حالات مختلف مبتنی بر نوع فولاد مصرفی (فولاد معمولی و پرمقاومت) برای ستونی به فرم کلی شکل ۲ دسته بندی می شوند.



شکل ۲ - مقطع ستون CFT در حالت تک لایه با بتن تقویت شده با آما تور

لازم به ذکر است که تقسیم بندی مدل های مختلف، در زیرگروه این حالت براساس نوع فولاد مصرفی بشرح جدول ۱ انجام شده است.

جدول ۱- مدل های قرارگیری فولاد مصرفی در حالات کلی

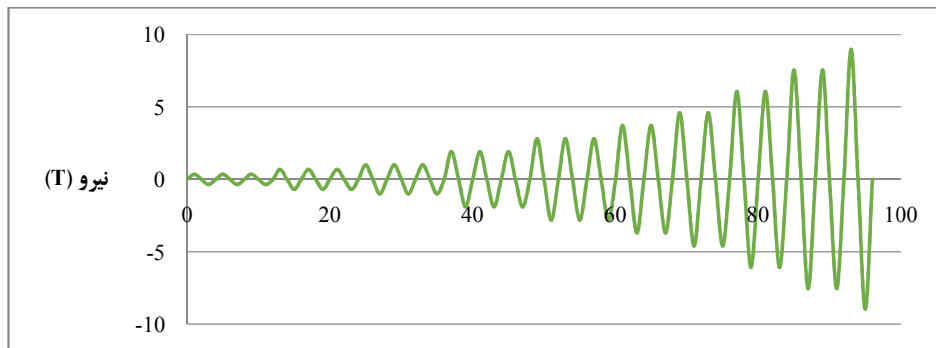
مدل	فولاد مصرفی آرماتورهای داخلی	فولاد مصرفی خارجی
متوسط	معمولی	پرمقاومت
معمولی	معمولی	معمولی
پرمقاومت	پرمقاومت	پرمقاومت

در فرآیند مدل سازی در نرم افزار برای تمامی سه مدل مذکور، ارتفاع ستون برابر ۳۱۵۰ میلی متر و قطر غلاف خارجی برابر ۳۵۵/۶ میلی متر با ضخامت ده میلی متر در نظر گرفته شده است. همچنین قطر میلگردهای داخلی برابر ۸ میلی متر لحاظ شده است. بتن مصرفی نیز با چگالی  $2400 \text{ kg/m}^3$  و ضریب پواسون  $0.2$  تعریف و مقادیر E و  $\nu$  برای بتن بترتیب برابر  $2 \times 10^{11}$  پاسکال و  $0.05$  در نظر گرفته می شود. از سوی دیگر مشخصات فولاد مصرفی نیز با توجه به ساده سازی منحنی تنش- کرنش فولاد، به صورت دوخطی (محدوده الاستیک و پلاستیک) مدل شده است. مقدار مدول الاستیسته برای فولاد در محدوده الاستیک برابر  $2 \times 10^{11}$  پاسکال فرض می شود. مقادیر تنش تسلیم و تنش نهایی برای فولاد معمولی (ST37) بترتیب برابر ۵۴۶ مگاپاسکال و ۶۴۲ مگاپاسکال و برای فولاد پرمقاومت (ST52) بترتیب برابر ۸۲۲ مگاپاسکال و ۸۸۱ مگاپاسکال در نظر گرفته شده است. مقدار ضریب پواسون نیز برای فولاد برابر  $0.3$  فرض می شود. از سوی دیگر بازه تنش تسلیم در محدوده غیرالاستیک برای فولاد معمولی برابر ۲۴۰۰ الی ۳۷۰۰ مگاپاسکال و برای

فولاد پرمقاومت برابر ۳۶۰۰ الی ۵۲۰۰ مگاپاسکال لحاظ شده است. همچنین بازه کرنش پلاستیک نیز برای فولاد معمولی برابر صفر تا ۰/۱۹۸۸ و برای فولاد پرمقاومت برابر صفر تا ۰/۰۹ در نظر گرفته می‌شود. لازم به ذکر است که در بارگذاری حرارتی، مدول الاستیسیته و تنش‌های تسلیم و نهایی فولاد متناسب با درجه حرارت تغییر می‌نماید. بطوریکه با افزایش حرارت، مقادیر مذکور کاهش می‌یابند. بر این اساس خصوصیات فولاد مصرفی در نرم‌افزار وابسته به درجه حرارت تعریف شده است. بدین ترتیب در بارگذاری حرارتی برای دمای معمولی (۳۲ دجه سانتیگراد) تنش برابر صفر و برای دمای ذوب فولاد، مقدار تنش برابر تنش تسلیم فولاد لحاظ شده است [۱۳].

### ۳. تحلیل مدل‌ها و نتایج آن

با شبیه‌سازی مدل‌های مذکور همراه با مشخصات ذکر شده، تحلیل ستون‌ها تحت بار حرارتی و محوری قابل انجام می‌باشد. بر این اساس همان‌طور که پیشتر بیان شد، ابتدا تحلیل حرارتی انجام و مقدار دمای حداکثر تحت بارگذاری مفروض تعیین می‌شود، سپس با حفظ شرایط ناشی از بارگذاری حرارتی در دمای حداقل و حداکثر تحلیل ستون تحت نیروی محوری صورت خواهد پذیرفت. برای این منظور در تحلیل تحت بارگذاری حرارتی از حالت Heat Transfer و برای تحلیل ستون تحت نیروی محوری از حالت Direct Cyclic استفاده شده است. برای بار محوری نیروی ۱۰ تنی با تاریخچه بارگذاری بشرح شکل ۳ در بازه زمانی ۱۰۰ ثانیه اعمال می‌شود. لازم به ذکر است که در فرآیند تحلیل و مدل‌سازی، شرایط مرزی پای تمامی مدل‌ها در چهار وجه به صورت گیردار (Amplitudes) در نظر گرفته شده است. نتایج حاصل از تحلیل مدل‌های حاضر بشرح زیر می‌باشد.



شکل ۳ - تاریخچه بارگذاری اعمال شده در مدل‌سازی بر حسب زمان - نیرو

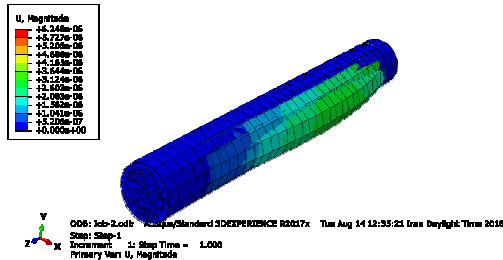
### ۱.۳. مدل متوسط

همان‌طور که پیشتر بیان شد، بتن درونی در مدل‌های حاضر به صورت مسلح می‌باشد. براین اساس بررسی‌های بارگذاری حرارتی برای مدل متوسط نشان می‌دهد که درجه حرارت از بیشترین مقدار در ابتدای ستون (قسمت آزاد ستون) به کمترین مقدار در انتهای ستون (قسمت گیردار ستون) تغییر می‌نماید. همچنین نتیجه حاصل از تحلیل حرارتی مقطع نیز بیانگر آن است که بیشترین دما براساس معیار حد گسیختگی مقطع، برابر ۶۰۴ درجه سانتیگراد است. از سوی دیگر اعمال بار محوری براساس نتایج تحلیل حرارتی نیز مقادیر تنش را بشرح اشکال ۴ نتیجه می‌دهد.

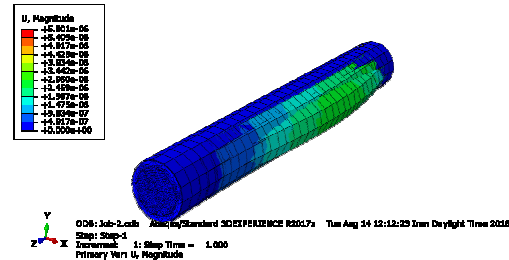


همان‌طور که در اشکال مشاهده می‌شود، تغییر درجه حرارت تاثیر چشمگیری بر رفتار ستون نداشته و مقادیر تنش در حالت دمای معمولی و دمای حداکثر دارای اختلاف اندکی می‌باشند. همچنین در هر دو شکل، بیشترین مقدار در ابتدای ستون و نیز پوشش بتن (کاور بتن) رخ داده و کمترین مقدار در انتهای ستون است.

مقادیر تغییر شکل نیز در مدل متوسط بشرح اشکال ۵ نتیجه شده است. همان‌طور که در این اشکال مشاهده می‌شود، بیشترین جابجایی در میانه ستون اتفاق افتاده و با اعمال شرایط بارگذاری حرارتی مقادیر جابجایی افزایش می‌یابد. البته این افزایش زیاد نبوده و می‌توان بیان نمود که تغییرات درجه حرارت در مقادیر تغییر شکل نیز تاثیر چندانی ندارد.

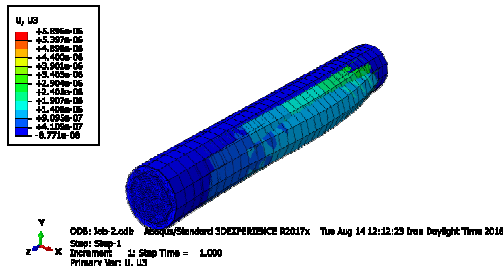


شکل ۵-۲- کانتور تغییر شکل برای مدل متوسط در دمای حداکثر

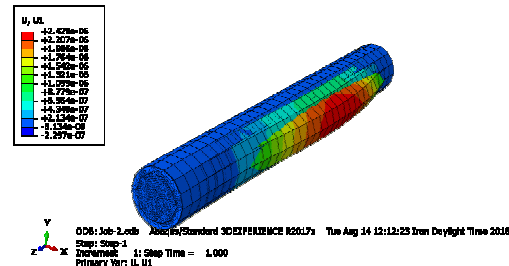


شکل ۵-۱- کانتور تغییر شکل برای مدل متوسط در دمای معمولی

بررسی جابجایی درون صفحه و خارج صفحه مدل متوسط نیز منجر به نتایج بشرح اشکال ۶ خواهد شد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، تقریباً وسط ستون بیشترین مقدار جابجایی را دارد. این در حالی است که مطابق شکل ۶-۲ مقادیر حداکثر جابجایی خارج از صفحه به سمت محل اعمال بار متمایل شده است. بایستی توجه داشت که مقادیر جابجایی درون صفحه بسیار بیشتر از جابجایی خارج از صفحه است. این امر سبب می‌شود که در نهایت جابجایی حداکثر در نزدیکی وسط ستون رخ دهد. دلیل اختلاف محل جابجایی درون صفحه و خارج صفحه را می‌توان در وجود بتن مسلح داخلی دانست که از جابجایی های درون صفحه جلوگیری می‌نماید.



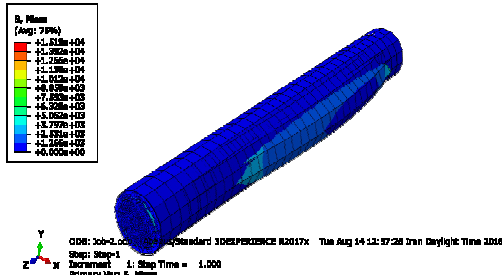
شکل ۶-۲- مقادیر جابجایی خارج صفحه در مدل متوسط



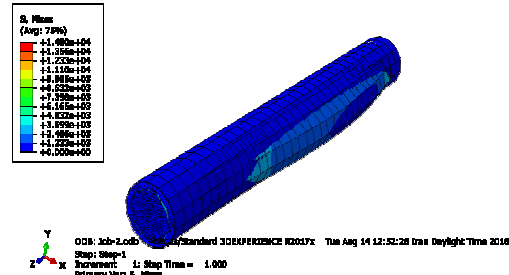
شکل ۶-۱- مقادیر جابجایی درون صفحه در مدل متوسط

## ۲.۳. مدل معمولی

بررسی مدل معمولی تحت بارگذاری حرارتی بیانگر آن است که تاثیر دما با کاهش مقاومت فولاد مصرفی در لایه خارجی، افزایش یافته است. این مسئله سبب شده است که دمای حداکثر در مدل معمولی بیشتر از مدل متوسط و برابر ۶۷۴ درجه سانتیگراد حاصل شود. از سوی دیگر نتایج مقادیر تنش حاصل از تحلیل ستون تحت بارگذاری محوری به ازای دمای حداقل و حداکثر بشرح اشکال ۷ است. براین اساس همان‌طور که مشاهده می‌شود، اختلاف مقادیر تنش در دمای حداقل و حداکثر اندک می‌باشد. همچنین با دقت در مقادیر تنش می‌توان تاثیر نوع فولاد مصرفی برای لایه خارجی را مشاهده نمود. به بیان دیگر کاهش مقاومت لایه خارجی سبب افزایش مقادیر تنش در دمای حداقل و حداکثر شده است.

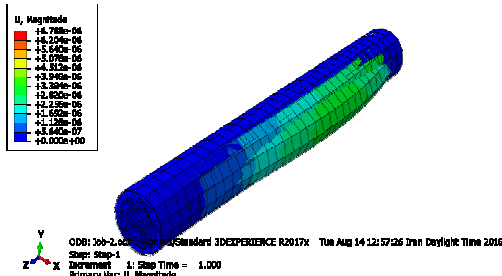


شکل ۷-۲- کانتور تنش برای مدل معمولی در دمای حداکثر

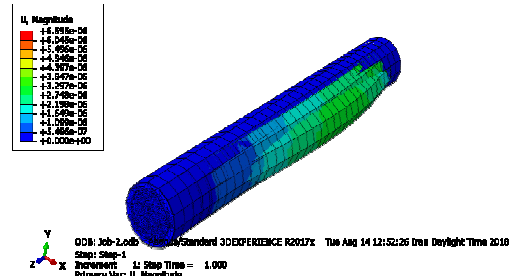


شکل ۷-۱- کانتور تنش برای مدل معمولی در دمای حداقل

بررسی مقادیر جابجایی نیز نتایج مشابه تنش را ارائه می‌دهد. بر این اساس همان‌طور که در اشکال ۸ مشاهده می‌شود، با کاهش مقاومت فولاد لایه خارجی، مقادیر جابجایی افزایش یافته است. در این حالت نیز بیشترین تغییر شکل در نزدیکی میانه ستون اتفاق افتاده و در دمای حداکثر این تغییر شکل افزایش می‌یابد. البته تاثیر حرارت نیز در این مدل خیلی زیاد نمی‌باشد. اما می‌بایست به همین مقدار اندک نیز توجه شود. همچنین بایستی توجه داشت که در مدل معمولی تغییر درجه حرارت تاثیر بیشتری نسبت به مدل متوسط برای مقادیر جابجایی دارد.

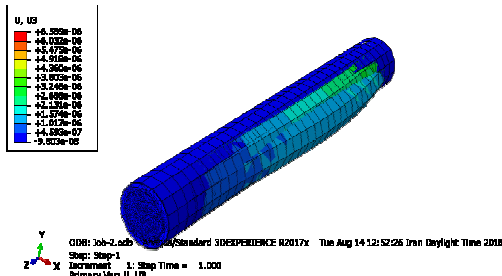


شکل ۸-۲- کانتور جابجایی برای مدل معمولی در دمای حداکثر

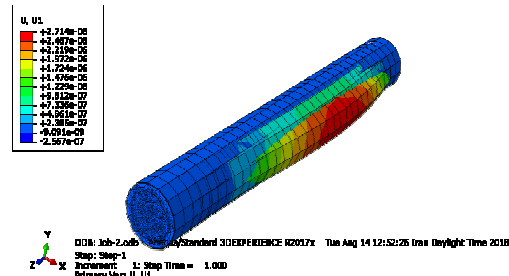


شکل ۸-۱- کانتور جابجایی برای مدل معمولی در دمای حداقل

بررسی جابجایی‌های درون صفحه و خارج صفحه مطابق اشکال ۹ نیز نشان می‌دهد که برای حالت معمولی، تمایل محل بیشترین جابجایی در میانه ستون به سمت ابتدای ستون می‌باشد. در این حالت نیز رفتار کلی تقریباً مشابه مدل متوسط است، اما مقادیر جابجایی‌های درون صفحه و خارج صفحه در این مدل نسبت به مدل متوسط بیشتر می‌باشد.



شکل ۹-۲- کانتور تغییر شکل در مدل شماره ۲ ناشی از بار محوری (۲۷)

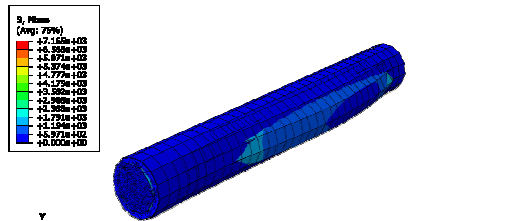


شکل ۹-۱- کانتور تغییر شکل در مدل شماره ۲ ناشی از بار محوری (۳۲)

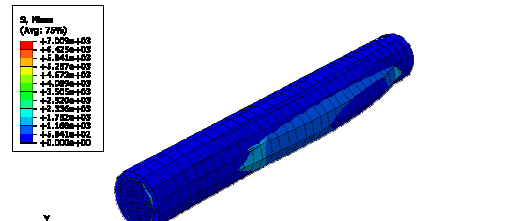
بنابراین در حالت کلی می‌توان بیان نمود که کاهش مقاومت فولاد مصرفی برای لایه خارجی در ستون CFT سبب افزایش مقادیر تنش و تغییر شکل می‌شود. همچنین تاثیر تغییر درجه حرارت نیز با افزایش مقاومت فولاد مصرفی برای لایه خارجی، کاهش می‌یابد.

## ۳.۳. مدل پرمقاومت

بررسی نتایج بارگذاری حرارتی مدل پرمقاومت نشان می‌دهد که تغییر نوع فولاد مصرفی برای تقویت بتن در ستون CFT سبب کاهش دمای حداکثر نسبت به مدل معمولی و نیز افزایش دمای حداکثر نسبت به مدل متوسط شده است. براین اساس در مدل پرمقاومت، مقدار دمای حداکثر برابر ۶۶۶ درجه سانتیگراد حاصل گردید. با اعمال نتایج حاصل از بارگذاری حرارتی و انجام تحلیل ناشی از بار محوری، نتایج تنش برای مدل پرمقاومت بشرح اشکال ۱۰ حاصل خواهد شد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، افزایش مقاومت فولاد آرماتور سبب کاهش مقادیر تنش شده است. از سوی دیگر افزایش دما سبب افزایش تنش نیز می‌شود، اما در این مدل نیز همچون سایر مدل‌ها اثر تغییرات درجه حرارت اندک است. البته بایستی توجه داشت که این مقدار اندک نیز قابل چشم پوشی نمی‌باشد.

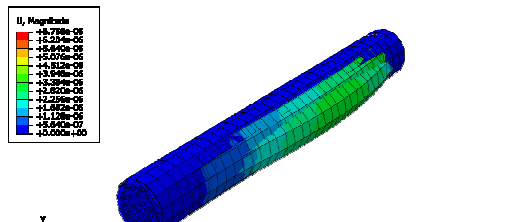


شکل ۱۰-۲- کانتور تنش در مدل پرمقاومت در دمای حداکثر

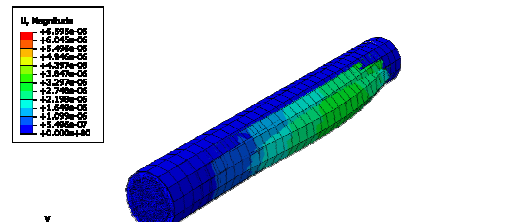


شکل ۱۰-۱- کانتور تنش در مدل پرمقاومت در دمای حداقل

بررسی نتایج جابجایی طبق اشکال ۱۱ نیز بیانگر آن است که مقادیر جابجایی در مدل پرمقاومت نسبت به سایر مدل‌های به سبب افزایش مقاومت آرماتور کمتر است. همچنین اثر تغییرات دما برای مقادیر جابجایی در این مدل نیز مشابه سایر مدل‌های کمتر می‌باشد.

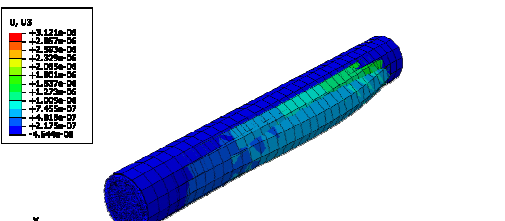


شکل ۱۱-۲- کانتور تغییر شکل برای مدل پرمقاومت در دمای حداکثر

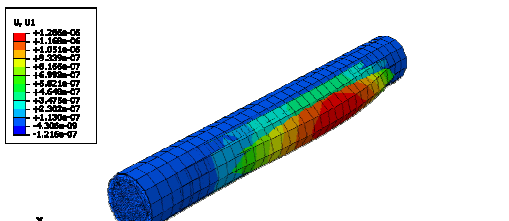


شکل ۱۱-۱- کانتور تغییر شکل برای مدل پرمقاومت در دمای معمولی

از سوی دیگر مقادیر جابجایی‌های درون صفحه و خارج صفحه مدل پرمقاومت مطابق اشکال ۱۲ نیز نتایج کلی مبنی بر تاثیر کمتر حرارت برای ستون‌های CFT را نتیجه می‌دهد. موقعیت بیشترین جابجایی نیز براساس اشکال ۱۲ بیانگر تمایل رخداد بیشترین جابجایی در نزدیکی ابتدای ستون را دارد. مقادیر حداکثر جابجایی‌های درون صفحه و خارج صفحه مدل پرمقاومت نسبت به سایر مدل‌ها کمتر است. بنابراین در حالت کلی می‌توان بیان نمود که افزایش مقاومت آرماتورهای داخلی سبب بهبود رفتار ستون در مقادیر تنش و جابجایی می‌شود.



شکل ۱۲-۲- مقادیر جابجایی خارج صفحه برای مدل پرمقاومت



شکل ۱۲-۱- مقادیر جابجایی درون صفحه برای مدل پرمقاومت





#### ۴. نتیجه گیری

- کاهش مقاومت فولاد مصرفی بویژه در لایه خارجی ستون‌های CFT سبب افزایش تاثیر حرارت در رفتار ستون (مقادیر تنش و تغییرشکل) خواهد شد.
- تغییر درجه حرارت و بارگذاری حرارتی در رفتار (مقادیر تنش و تغییرشکل) ستون‌های CFT اندک می‌باشد اما در نظرگیری الزامات بارگذاری حرارتی در طراحی این ستون‌ها، منجر به طرحی با ایمنی بیشتر خواهد شد.
- وجود بتن مسلح در ستون‌های CFT جابجایی‌های درون صفحه را کاسته و در نهایت سبب کاهش تغییرشکل کلی ستون می‌شود.
- وجود آرماتورهای داخلی در بتن درونی ستون CFT و نیز افزایش مقاومت فولاد آن در رفتار ستون (مقادیر تنش و تغییرشکل) موثر است.

#### ۵. مراجع

۱. اصغری، الف. و رضوی، س.ع. (۱۳۹۶)، "راهنمای طراحی مقاطع فولادی پر شده با بتن (CFT)"، انتشارات سیمای دانش، چاپ اول، تهران، ایران.
2. Schneider, S.P. (1998), "Axially Load Concrete-Filled Steel Tubes," Journal of Structural Engineering, **124** (10), pp 1125-1138.
3. Johansson, M. and Gylltoft, K. (2001), "Structural Behavior of Slender Circular Steel Concrete Composite Columns," Application Steel and Composite Structures, **1** (4), pp 393-410.
4. Giakoumelis, G. and Lam, D. (2004), "Axial Capacity of Circular Concrete-filled tube Columns," Journal of Constructional Steel Research, **60** (7), pp 1049-1068.
5. Ellobody, E. and Young, B. (2006), "Design and Behavior of Concrete-Filled Cold-Formed Stainless Steel Tube Columns," Engineering Structures, **28** (5), pp 716-728.
6. Portolés, J.M., Romero, M.L., Bonet, J.L. and Filippou, F.C. (2011), "Experimental Study of High Strength Concrete-Filled Circular Tubular Columns Under Eccentric Loading," Journal of Constructional Steel Research, **67** (4), pp 623-633.
7. Tondini, N., Hoang, V.L., Demonceau, J.F. and Franssen J.M. (2013), "Experimental and Numerical Investigation of High-Strength Steel Circular Columns Subjected to Fire," Journal of Constructional Steel Research, **80**, pp 57-81.
8. Hu, Y., Zhao, P., Yang, B. and Dai, G. (2016), "Numerical study on temperature distribution of high-strength concrete-filled steel tubes subjected to a fire," International Journal of Steel Structures, **16** (4), pp 1057-1069.
9. Mousavi Davoudi, S.A. and Naghipour, M. (2019), "Studying the Buckling Behavior of Composite Columns (CFST) by Cyclic Loading," Journal of Civil Engineering and Materials Application, **3** (4), pp 203-213.
10. Espinos, A., Romero, M.L. and Hospitaler, A. (2010), "Advanced model for predicting the fire response of concrete filled tubular columns," Journal of constructional steel research, **66** (8-9), pp 1030-1046.
11. Hibbitt, D., Karlsson, B. and Sorensen, P. (2005), "ABAQUS User's Manual. Version 6.5," ABAQUS. Inc., Providence, RI.
12. Espinos, A., Romero, M.L. and Lam, D. (2016), "Fire performance of innovative steel-concrete composite columns using high strength steels," Thin-Walled Structures, **106**, pp 113-128.
13. Qiang, X. (2013), "Behaviour of High Strength Steel Endplate Connections in Fire and after Fire," Master of Science in Structural Engineering, Tongji University, China, geboren te Qiqihar, China.