

Numerical investigation of connection of continuous steel beam and CFT circular column

Sohail Majid Zamani^{1*}, Ahmad Sabzei²

1- Assistant Professor, Road, Housing and Urban Development Research Center, Tehran

2- PhD candidate, Road, Housing and Urban Development Research Center, Tehran

ABSTRACT

Steel columns composed of hollow structural section filled with concrete are one of the best solutions for providing the required strength and stiffness through the composite action of steel and concrete. The HSS column and steel beam connections proposed so far have included complex details and extensive welding in most cases, which complicates the construction of the connection and also its behaviour. Hence, in this research, an attempt is made to avoid these complexities and to employ a connection with high efficiency and easier implementation by passing a continuous steel beam through tubular CFT columns. The influence of the steel tube diameter, the thickness of the steel tube, the thickness of the beam flange and web and also the amount of axial load applied to the column are investigated by numerical modeling using finite element method. The results of the pushover analysis show that the ratio between the bending moment capacity of the column and that of the beam (M_{pc}/M_{pb}) plays a significant role in the effect of the other studied parameters. In the range of $M_{pc}/M_{pb} < 0.6$, variation of the steel tube wall thickness directly influences the ultimate moment of the connection and its ductility. On the other hand, in the range of $M_{pc}/M_{pb} > 0.6$, the ultimate moment and ductility of the connection are directly linked to the thicknesses of the flange and web of the steel beam.

ARTICLE INFO

Receive Date: 14 June 2021

Revise Date: 30 September 2021

Accept Date: 26 October 2021

Keywords: composite column
steel tube
bearing capacity
ductility
connection

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/JSCE.2021.290619.2471

*Corresponding author: Sohail Majid Zamani.

Email address: majidzamani@bhrc.ac.ir

بررسی عددی اتصال تیر فولادی پیوسته میان گذر و ستون CFT دایره‌ای

سهیل مجید زمانی^{۱*}، احمد سبزه‌ئی^۲

۱- استادیار، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی

۲- دانشجوی دکتری، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی

چکیده

ستون‌های فولادی متشکل از مقاطع توخالی سازه‌ای پر شده با بتن یکی از بهترین گزینه‌ها برای تامین مقاومت و سختی مورد نیاز از طریق عملکرد مرکب بتن و فولاد هستند. از طرف دیگر، اتصالات ستون لوله‌ای HSS و تیر فولادی که تاکنون پیشنهاد شده در اکثر موارد شامل جزئیات و جوشکاری پیچیده بوده است که رفتار و اجرای اتصال را پیچیده می‌کند. لذا در این تحقیق تلاش بر این است که از این اتصالات پیچیده پرهیز گردد و از اتصالی با کارایی بالا و نحوه اجرای راحت‌تر بهره گرفته شود. در مقاله حاضر، با مدل‌سازی عددی اتصال تیر فولادی پیوسته میان‌گذر در ستون‌های CFT لوله‌ای شکل توسط نرم‌افزار اجزاء محدود، تاثیر قطر لوله فولادی، ضخامت لوله فولادی، ضخامت بال و جان تیر و همچنین میزان بار محوری اعمالی به ستون مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج تحلیل‌های بار افزون نشان می‌دهد که نسبت ظرفیت لنگر خمشی ستون به ظرفیت لنگر خمشی تیر (M_{pc}/M_{pb}) نقش عمده‌ای در میزان تاثیر سایر پارامترهای مورد مطالعه دارد. در محدوده $M_{pc}/M_{pb} \leq 0.6$ لنگر نهایی و شکل پذیری اتصال رابطه مستقیم با تغییرات ضخامت جداره لوله فولادی دارد. در محدوده $M_{pc}/M_{pb} > 0.6$ لنگر نهایی و شکل پذیری اتصال رابطه مستقیم با تغییرات ضخامت بال و جان تیر فولادی دارد.

کلمات کلیدی: ستون مرکب، لوله فولادی، ظرفیت باربری، شکل پذیری، اتصال

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:			
doi:	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
https://doi.org/10.22065/JSCE.2021.290619.2471	۱۴۰۱/۳/۳۱	۱۴۰۰/۸/۰۴	۱۴۰۰/۸/۰۴	۱۴۰۰/۷/۰۸	۱۴۰۰/۳/۲۴
*نویسنده مسئول: سهیل مجید زمانی majidzamani@bhrc.ac.ir			پست الکترونیکی:		

۱- مقدمه

یکی از اهداف کلیدی و مهم که طراحان سازه با آن روبرو هستند، دست یافتن به سازه بهینه از نظر اقتصادی با عملکرد فنی مناسب است. استفاده از سیستم‌های ساختمانی جدید و انتخاب مصالح در عملیات ساخت یکی از راهبردهای مناسب در جهت نیل به سوی این هدف است. تصمیم‌گیری در این زمینه‌ها بر پایه مبانی سازه‌ای و اقتصادی است و براساس قضاوت‌های مهندسی و تجربه پشتیبانی می‌گردد. امروزه در صنعت ساختمان نوع جدیدی از ستون‌های مرکب به نام ستون لوله فولادی پر شده با بتن رواج یافته است. در این نوع ستون‌ها بتن و فولاد عملکرد مکمل و کارآمدی دارند، زیرا از یک سو لوله فولادی با ایجاد محصوریت مناسب برای بتن باعث افزایش مقاومت و شکل‌پذیری آن می‌شود و از سوی دیگر بتن مانع از کمانش کلی و موضعی لوله فولادی می‌شود. از مزیت‌های عمده این نوع ستون‌ها نسبت به ستون‌های بتن‌آرمه می‌توان به مواردی چون عدم نیاز به آرماتوربندی و قالب‌بندی، بهبود کیفیت و کاهش زمان ساخت، کاهش هزینه‌ها [۱] [۲]، کاهش ابعاد ستون و در نتیجه افزایش فضای مفید، کاهش یا عدم نیاز به پوشش ضد حریق برای ستون‌ها، افزایش در ظرفیت باربری، شکل‌پذیری و قابلیت جذب انرژی آن اشاره کرد [۳].

با وجود مزایای فوق، نحوه اتصال تیر و ستون از موارد پیچیدگی این ستون‌ها محسوب می‌شود؛ اگرچه طیف گسترده‌ای از جزئیات مختلف برای اتصال خمشی- لرزه‌ای تیر به ستون‌های پر شده با بتن مطرح شده‌اند ولی تاکنون هیچ جزئیات متداولی از سوی آیین‌نامه اتصالات از پیش تأیید شده آمریکا، اعلام نشده است. پیچیدگی، سختی اجرا و عدم وجود اتصال متداول از یک سو و فقدان شیوه‌نامه‌ها و دستورالعمل‌های مدون طراحی از سوی دیگر، باعث شده محققان همچنان به دنبال اتصالات با کیفیت مطلوب‌تر و اقتصادی‌تر برای این نوع سیستم‌های ساختمانی باشند.

توسعه و کاربرد فناوری‌های نوین در کشور ما همواره با مشکلاتی از جمله عدم اقبال جامعه مهندسی همراه بوده است و تنها راه حل این مشکل بومی‌سازی دانش و توسعه فرهنگ استفاده از سیستم‌های جدید در بین مهندسين است. جهت تشویق طراحان و سازندگان به استفاده از ستون‌های CFT^۲ و بهره‌گیری از مزایای آنها و همچنین رفع اشکالات اتصالات پیشین و پاسخگویی به نیازهای مطرح شده، باید اتصالاتی مطمئن و اجرایی توسعه یابند.

۲- مروری بر مطالعات پیشین

در سال ۲۰۰۱ توسط عزیزی نمینی و الرمیلی، مطالعاتی به منظور درک رفتار اتصالات تیر میان‌گذر صورت گرفت. شش اتصال تیر به ستون CFT با بار محوری ثابت و تحت بارگذاری جانبی سیکلی مورد آزمایش قرار گرفتند. مدهای خرابی محتمل برای اتصال تیر میان‌گذر از طریق انجام هفت تست شناسایی شدند. متغیرهای تست‌های اصلی شامل: نسبت ظرفیت خمشی تیر به ستون، نوع جوش اتصال تیر به ستون، وجود یا عدم وجود بعضی از المان‌های چشمه اتصال بودند. نتایج آزمایشگاهی نشان داد در نمونه‌هایی که از خرابی ستون جلوگیری شده است، نسبت مقاومت خمشی تیر به ستون برای اتصال با جوش با نفوذ کامل تقریباً ۱/۵ و برای نمونه با جوش گوشه این نسبت تقریباً برابر ۲ بوده است. توصیه شده است فعلاً مقدار ۱/۵ به عنوان پایین‌ترین حد برای اتصال تیر میان‌گذر در نظر گرفته شود تا تست‌های تجربی بیشتری در آینده برای تعیین پایین‌ترین حد نسبت مقاومت ستون به تیر انجام گیرد [۴].

در سال ۲۰۰۴ عزیزی نمینی و اشنایدر، شش اتصال تیر فولادی به ستون لوله‌ای پر شده با بتن را مورد بحث و بررسی قرار دادند. نتایج آزمایشگاهی نشان داد که در مناطق با لرزه‌خیزی بالا از اتصال تیر به جداره ستون با جوش و بدون سخت‌کننده باید پرهیز شود؛ زیرا اعوجاج شدید جداره ستون می‌تواند مانع دسترسی به ظرفیت خمش پلاستیک تیر شود و همچنین تنش‌ها و کرنش‌های بسیار بزرگ بر روی جوش‌ها و بال ستون ایجاد نماید. بنابراین جزئیات مناسبی برای اتصال تیر فولادی به ستون CFT مورد نیاز است که اعوجاج و کرنش‌های بزرگ در بال ستون را به حداقل برساند. براساس مشاهدات آزمایشگاهی، اتصال تیر فولادی I شکل عبور داده شده از ستون لوله‌ای پر شده با بتن عملاً رفتار یک اتصال صلب ایده‌آل را داراست. این اتصال مقاومت لرزه‌ای و عملکرد چرخه‌ای غیرخطی مناسبی از خود نشان داده است [۵].

^۱ AISC 358-16^۲ Concrete filled tube

در سال ۲۰۰۹ ونگ و همکاران مطالعات آزمایشگاهی را بر روی اتصال تیر به ستون دایره‌ای و قوطی شکل با استفاده از پیچ پرمقاومت کور، مورد بررسی قرار دادند. مشکل دسترسی به داخل ستون‌های توخالی برای سفت نمودن مهره پیچ‌ها در ستون‌های دایره‌ای همواره وجود داشته است؛ راه حلی که پیشنهاد گردید، استفاده از پیچ کور برای اتصال تیر فولادی به ستون است که در آن محکم کردن پیچ کور فقط با دسترسی از یک طرف ممکن می‌شود. در این تحقیق چهار نمونه صلیبی شکل تحت آزمایش قرار گرفتند؛ نتایج نشان داد که این اتصال سختی و مقاومت نسبتاً خوبی از خود نشان می‌دهد به نحوی که بیش از ۷ درصد دریفت طبقه را می‌تواند تحمل کند [۶].

در سال ۲۰۱۳ مک‌ری و همکاران در مطالعاتی چهار اتصال داخلی با تیرهای فولادی و ستون‌های لوله‌ای پر شده با بتن تحت بارگذاری جانبی چرخه‌ای را مورد آزمایش قرار دادند. ستون‌های لوله‌ای فولادی دایره‌ای و مربعی با دو نوع اتصال متفاوت در نظر گرفته شدند: ۱- صفحات انتهایی جوش داده شده به ستون CFT با میله‌های فولادی که از ستون عبور می‌کنند ۲- از طریق اتصال تیر که در آن تیر از اتصال عبور می‌کند و با یک براکت اضافی، بدون استفاده از جوشکاری بین تیر و ستون، اتصال برقرار می‌شود. در آزمایش‌ها هیچ نشانه‌ای از کمناش موضعی در دیواره لوله‌ها مشاهده نشد. میله‌های فولادی که از ستون‌ها عبور می‌کردند در هر دو مقطع دایره‌ای و مربع مؤثر بودند. هر دو اتصال صفحه انتهایی دایره‌ای و مستطیلی عملکرد مشابهی را از خود نشان دادند [۷].

در سال ۲۰۱۶ عرب نژاد و همکاران در مطالعاتی به بررسی عددی اتصال تیر به ستون لوله فولادی مدور پر شده با بتن با سه نوع خرابی اتصال (ستون، تیر و شکست برشی اتصال) تحت بارگذاری با بار محوری ثابت و بار جانبی چرخه‌ای پرداختند. اتصال متشکل از تیر فولادی I شکل است که به طور کامل از ستون لوله فولادی مدور عبور کرده و توسط جوش نفوذی کامل یا گوشه به آن جوش داده شده و سپس لوله فولادی با بتن پر می‌شود. پارامترهای اتصال مورد بررسی شامل موارد مختلفی از نسبت ظرفیت خمشی تیر به ستون، استفاده از میلگرد داخل ستون، اثر جان تیر و هسته بتنی بر رفتار چشمه اتصال می‌باشد. مطابقت مناسبی بین مدل و نتایج آزمایش موجود از نظر رابطه نیروی تکیه‌گاه تیر و جابجایی طبقه به دست آمد و در نتیجه، مدل‌ها توانستند به درستی رفتارهای خطی و غیرخطی را پیش‌بینی کنند [۸].

در سال ۲۰۱۶ میرقادری و همکاران در مطالعه‌ای اتصال خمشی برای تیرهای فولادی عبوری از دو طرف ستون بتن آرمه، را مورد بررسی قرار دادند. به دلیل عبور تیرهای فولادی از بیرون ستون، ستون در ناحیه اتصال بصورت پیوسته و ممتد است و امکان آرایش مناسب آرماتورها و دسترسی آزاد در داخل ستون برای بتن ریزی فراهم می‌شود. علاوه بر این، به دلیل ممتد بودن تیر در ناحیه اتصال، جان تیر نیز جزئی از چشمه اتصال بوده و مقاومت برشی چشمه اتصال به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد. رفتار اتصال پیشنهادی به صورت عددی مورد ارزیابی قرار گرفت، برای این منظور مدل نمونه در نرم افزار آباکوس ساخته شد و با نتایج حاصل از آزمایش از نظر رفتار چرخه‌ای اتصال، تراز کرنش در محل مفصل پلاستیک تیر، تراز کرنش در ورق‌های پوششی ناحیه اتصال و همچنین کرنش در میلگردهای ستون اعتبارسنجی شد. سپس پارامترهای مهم از جمله شروع و گسترش مفصل پلاستیک در تیرها، تراز کرنش در اجزای فولادی چشمه اتصال، تراز کرنش بتن در سطح تماس با اجزای فولادی و تشکیل دستک قطری در هسته بتنی مورد بررسی قرار گرفت. اتصال مورد بررسی دارای عملکرد لرزه‌ای مناسب با رفتار چرخه‌ای پایدار و بدون لاغرشدگی می‌باشد. در نمونه مورد بررسی، مفاصل پلاستیک در هر چهار تیر در فاصله کمی از بر ستون تشکیل شدند و هیچ آسیبی در ورق‌های پوششی ناحیه اتصال رخ نداد [۹].

در سال ۲۰۱۷ زینی زاده جدی و همکاران، مطالعات آزمایشگاهی را بر روی اتصال تیر فولادی به ستون دایره‌ای شکل با استفاده از سخت کننده طولی بال تیر که از لوله فولادی عبور می‌کند، مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق چهار نمونه صلیبی با تیرهای متعام تحت بارگذاری چرخه‌ای مورد آزمایش قرار گرفت. تاثیر پارامترهای مختلف از قبیل مقطع تیر فولادی، ضخامت، طول و ارتفاع سخت کننده طولی بال تیر مورد بررسی قرار گرفت. این اتصال شکل پذیری و عملکرد چرخه‌ای غیرخطی مناسبی از خود نشان داد. همچنین اتصال پیشنهادی، شرایط لازم برای بکارگیری در مناطق لرزه خیز را داشت [۱۰].

در سال ۲۰۱۹ مطالعاتی توسط میرقادری و احمدی صورت گرفت که به بررسی اتصالات جدید خمشی لرزه‌ای تیر فولادی به ستون‌های مربعی، دایره‌ای و لوزی شکل توخالی و پر شده با بتن با روش ورق میان‌گذر می‌پرداخت. اتصال به ستون‌های مربعی و دایره‌ای از نوع جوشی و اتصال به ستون لوزی از نوع پیچی بودند. برای تیرها در نمونه‌های جوشی از مقاطع ساخته شده از ورق و در نمونه پیچی از مقطع دابل ناودانی استفاده شد. برای ارزیابی هر نمونه، سه اتصال میانی تمام مقیاس در نظر گرفته شد که دو نمونه از آنها ستون‌های پر شده با بتن و یک نمونه ستون توخالی بودند. نمونه‌ها تحت بارگذاری چرخه‌ای قرار گرفتند. ستون‌ها در حین بارگذاری تحت بار محوری معادل ۱۰ درصد

ظرفیت محوری ستون قرار داشتند. در هر سه دسته اتصالات تست شده، مفاصل پلاستیک در تیرها و دور از ستون‌ها ایجاد شد و هیچ نوع آسیبی در ناحیه چشمه اتصال و اجزای اتصال رخ نداد. همچنین انرژی تلف شده، سختی و شکل پذیری برای اتصالات مورد بررسی تعیین شد. براساس نتایج آزمایشات، اتصال با ورق میان‌گذر از مقاومت و سختی مناسبی برخوردار بوده و در محدود اتصالات صلب قرار گرفت و با رفتار چرخه‌ای پایدار و تحمل حداقل دررفت طبقه‌ای، شرایط آیین نامه AISC را به عنوان یک اتصال خمشی ویژه فراهم کرد [۱۱].

در سال ۲۰۲۰ ژو و همکاران، مطالعات آزمایشگاهی و عددی را بر روی پنج اتصال دیافراگمی ستون دایره‌ای بتن مسلح احاطه شده با لوله فولادی^۳ و تیر فولادی مورد بررسی قرار دادند. در محل اتصال به منظور بهبود مقاومت اتصال از دیافراگمی استفاده شد که تاثیر دو پارامتر: ۱- ضخامت دیافراگم در محل اتصال ۲- ارتفاع دیافراگم در محل اتصال، بحث شده است. در اتصال پیشنهادی شکست اتصال و شکست تیر مشاهده شد. مطالعات عددی اجزا محدود با نتایج آزمایشگاهی صحت‌سنجی گردید که حداکثر مقاومت قابل تحمل اتصال با دقت مناسبی بدست آمد. با این حال در نمونه‌هایی که شکست اتصال رخ داد، رفتار پس از حداکثر مقاومت قابل تحمل اتصال به درستی بدست نیامد که دلیل این امر عدم همگرایی تحلیل بود. در نمونه‌هایی که شکست تیر رخ داد، رفتار پس از حداکثر مقاومت قابل تحمل اتصال به درستی برآورد نشد که دلیل این امر ناشی از مشکلات در شبیه‌سازی شکست جوش بال تیر بود [۱۲].

۳- ضرورت انجام پژوهش جاری

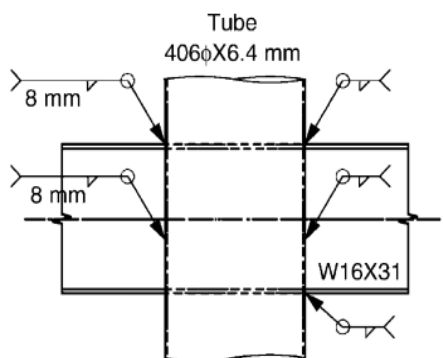
از بررسی پژوهش‌های پیشین چنین بر می‌آید که اتصال تیر فولادی میانگذر و ستون CFT دایره‌ای گزینه مناسبی برای تامین اتصال تیر و ستون در قاب‌های خمشی مرکب باشد. با این حال، برای طراحی اتصال در سازه واقعی و یا طراحی نمونه‌های آزمایشگاهی لازم است از میان ترکیبات بی‌شمار پارامترهای هندسی و ابعاد اتصال، انتخاب مناسبی با توجه به ویژگی‌های رفتاری اتصال ناشی از این پارامترها صورت گیرد. در پژوهش‌های قبلی به میزان تاثیر ابعاد هندسی اجزاء اتصال مانند قطر لوله فولادی، ضخامت لوله فولادی، ضخامت بال و جان تیر و همچنین میزان بار محوری وارد بر ستون به نحو اختصاصی پرداخته نشده است. بنا بر این هدف از انجام پژوهش حاضر، تلاش برای رفع مجهولات و تکمیل دانش موجود در زمینه اتصال تیر فولادی پیوسته میان گذر و ستون CFT دایره‌ای با تغییر در پارامترهای پیش گفته است. بدین منظور در پژوهش حاضر مدل‌سازی عددی برای ۲۹ نمونه اتصال از نوع فوق، به کمک نرم‌افزار اجزا محدود آباکوس انجام گردیده و به بررسی میزان تاثیر پارامترهای فوق در ویژگی‌های کلیدی اتصال پرداخته شده است.

۴- مطالعه عددی

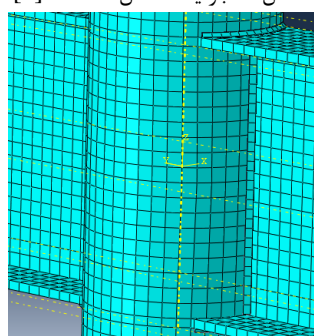
۴-۱- مدل‌های صحت‌سنجی

برای صحت‌سنجی مدل عددی اتصال، مطالعه‌ی آزمایشگاهی انجام شده توسط الرمیلی و عزیزمی در سال ۲۰۰۱، به عنوان مبنا انتخاب شده است [۴]. از میان نمونه‌های مورد بحث در این مرجع، نمونه‌های NSF1 و NSF8 انتخاب شده اند که دارای تیر میانگذر و ستون CFT دایره‌ای هستند و مشخصات آن‌ها در شکل‌های ۱ و ۲ نشان داده شده است. به منظور اعتبارسنجی مدل عددی مورد استفاده، نمونه‌های NSF1 و NSF8 شامل اتصال میانی از قاب فولادی پر شده با بتن و نیز نصف ارتفاع ستون در طبقات بالا و پایین و وسط دهانه‌ی تیر، که متناظر با نقطه‌ی تغییر علامت دیاگرام لنگر خمشی تحت بار جانبی است، انتخاب شده است که شامل ستون فولادی دایروی توخالی، تیر فولادی و بتن داخل جداره‌ی فولادی است. تکیه‌گاه‌های دو سر ستون، مفصلی هستند [۱۳]. همچنین برای جلوگیری از حرکت خارج از صفحه‌ی اتصال، تیر در دو ناحیه مهار جانبی شده است. لازم به ذکر است به منظور مدل‌سازی از مطالعه‌ی عددی انجام شده توسط عرب نژاد و همکاران در سال ۲۰۱۶ بهره گرفته شده است [۸]. تصویر مدل مورد تحلیل در شکل ۳ و ۴ نشان داده شده است.

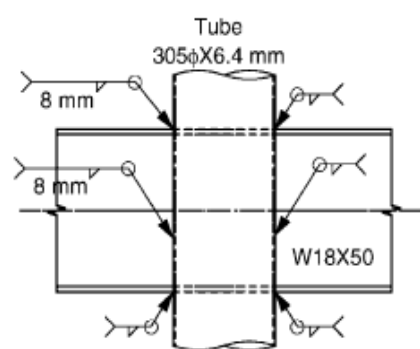
³ Tubed Reinforced Concrete (TRC)



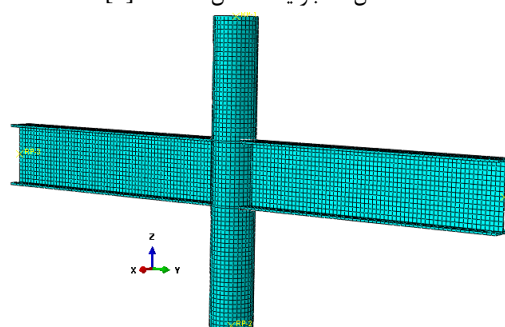
شکل ۲: جزئیات اتصال NSF8 [۴]



شکل ۴: بزرگنمایی ناحیه اتصال بال و جان



شکل ۱: جزئیات اتصال NSF1 [۴]



شکل ۳: مدل سازی اتصال NSF1

مشخصات کلی نمونه‌های NSF8 و NSF1 در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱: مشخصات کلی نمونه‌های صحت سنجی [۴]

نمونه	قطر خارجی ستون (میلیمتر)	ضخامت جداره (میلیمتر)	عمق تیر (میلیمتر)	ضخامت جان تیر (میلیمتر)	عرض بال (میلیمتر)	ضخامت بال تیر (میلیمتر)
NSF1	۳۰۵	۶/۴	۴۵۷	۹	۱۹۰	۱۴/۵
NSF8	۴۰۵	۶/۴	۴۰۳	۷	۱۴۰	۱۱/۲

در این مطالعه برای فولاد، مدول الاستیسیته ۲۰۰ گیگاپاسکال و ضریب پواسون ۰/۳ فرض شد. نمودار رفتار مصالح فولادی بصورت مدل الاستو-پلاستیک دو خطی در نظر گرفته شد. مقاومت تسلیم و مقاومت نهایی این مصالح براساس نتایج تست کشش فولاد نمونه‌های NSF1 و NSF8 اعمال شد. مقاومت حد تسلیم و حد نهایی مصالح مورد استفاده در جدول شماره ۲ ارائه شده است.

جدول ۲: مشخصات مصالح مصرفی نمونه‌های صحت سنجی [۴]

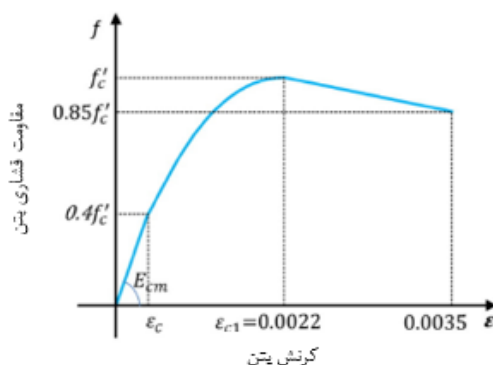
نمونه	مقاومت تسلیم (مگاپاسکال)			مقاومت نهایی (مگاپاسکال)		
	لوله فولادی	بال تیر	جان تیر	لوله فولادی	بال تیر	جان تیر
NSF1	۳۷۴	۳۰۲	۳۴۱	۴۹۹	۴۴۲	۴۶۷
NSF8	۴۴۳	۳۳۴	۲۹۴	۵۵۴	۴۷۲	۴۷۳

در این مدل‌سازی، مصالح جوش الکتروود E60 در نظر گرفته شده است که دارای تنش کششی ۴۲۰ مگاپاسکال و تنش نهایی ۴۹۰ مگاپاسکال می باشد. مطابق شکل ۴، جوش در محل اتصال بال‌ها به جداره فولادی و محل اتصال جان به جداره فولادی از هر دو طرف مدل‌سازی شده است.

برای محاسبه‌ی مدول الاستیسیته‌ی بتن براساس رابطه‌ی پیشنهادی ACI318 عمل شده است:

$$E_c = 4700\sqrt{f_c} \quad (1)$$

در این رابطه E_c مدول الاستیسیته‌ی بتن برحسب مگاپاسکال و f_c مقاومت فشاری بتن برحسب مگاپاسکال می‌باشد [۱۴]. برای مدل‌سازی رفتار بتن، مدل آسیب دیده‌ی پلاستیک بتن که در نرم افزار آباکوس در دسترس می‌باشد، مورد استفاده قرار گرفته است. منحنی تنش- کرنش بتن در شکل ۵ و پارامترهای خسارت بتن در جدول ۳ ارائه شده‌اند. این مدل قابلیت نشان دادن رفتار غیرخطی و خصوصیات خرابی مواد شبه ترد همانند بتن را دارد. در این مدل با استفاده از مفاهیم الاستیک آسیب دیده ایزوتروپیک و پلاستیک کششی و فشاری، رفتار غیرخطی بتن بیان می‌شود و قابلیت استفاده در محاسبات استاتیکی و دینامیکی را دارد. در این مدل دو مکانیزم اصلی شکست عبارتند از: ۱- ترک‌های کششی ۲- خرد شدن فشاری بتن.



شکل ۵: منحنی رفتار تنش - کرنش بتن مسلح [۱۵]

جدول ۳: پارامترهای مدل خسارت پلاستیک بتن [۱۶] [۱۷]

پارامتر ویسکوزیته	K	نسبت تنش فشاری حداکثر دو محوره به یک محوره	خروج از مرکزیت جریان	زاویه اتساع
۰/۰۰۱	۰/۶۶۶	۱/۱۶	۰/۱	۴۰

براساس شرایط بارگذاری در تست، بارگذاری نمونه‌ها در دو مرحله انجام گرفت؛ ابتدا بار محوری به بالای ستون وارد شد و سپس به نمونه‌های NSF1 و NSF8 به ترتیب دوران معادل ۳ درصد و ۹/۵ درصد به دو سر تیر بصورت کوپل مشابه بارگذاری تجربی اعمال گردید. فاصله نقطه جابجایی اعمالی از مرکز اتصال، ۲۰۵۷/۵ میلی‌متر بوده است. برای انجام مطالعه تحلیلی بر روی اتصال پیشنهادی، نمونه مورد آزمایش [۴] با نرم‌افزار آباکوس مدل‌سازی شده است. برای تحلیل از روش غیرخطی Static General با الگوریتم همگرایی نیوتن - رافسون استفاده شده است.

۴-۲- نحوه مدل‌سازی و مش بندی

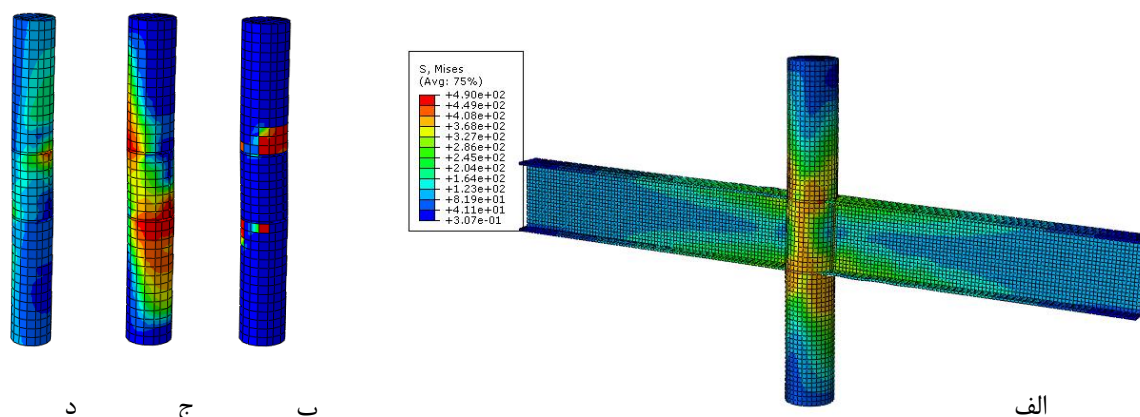
در مدل‌سازی تماس و قیود المان‌ها، در محل‌هایی که هنگام تحلیل غیرخطی بین دو المان جدا از هم برخوردی صورت می‌گیرد، باید خصوصیات مربوط به برخورد در روی دو سطح تعریف شود. در غیر این صورت برخورد در حل در نظر گرفته نشده و در اصطلاح دو المان در هم فرو می‌روند. برای تعریف خصوصیت مربوط به برخورد، باید با توجه به ماهیت برخورد المان‌ها، خصوصیت برخورد در نرم افزار تعریف شود. در برخوردهای معمول سطح برخورد دارای رفتاری مماسی و اصطکاکی است. در این مطالعه، با استفاده از ماژول Interaction، برای سطح تماس تیر فولادی و بتن در ستون‌های کامپوزیت از رفتار مماسی در حالت پنالتی با ضریب اصطکاک بین دو سطح استفاده شده است. ضریب اصطکاک بین دو سطح برای تماس فولاد با بتن برابر ۰/۲۵ در نظر گرفته شده است. سطح تماس در راستای عمود از نوع سطح تماس سخت، با امکان جدا شدن دو سطح و عدم امکان نفوذ سطوح در یکدیگر تعریف شد. بنابراین مدل می‌تواند انتقال نیروهای فشاری و برشی را در سطح تماس بتن و فولاد شبیه‌سازی کند [۱۸]. برای تعریف سطح تماس داخلی جداره فولادی با بتن و سطح تماس جوش با فولاد، اتصال

بصورت کامل فرض شده و از گزینه Tie استفاده شده است، که جابجایی واقع در دو سطح مختلف را در محل تماس دو سطح به یکدیگر وابسته می‌کند [۱۹].

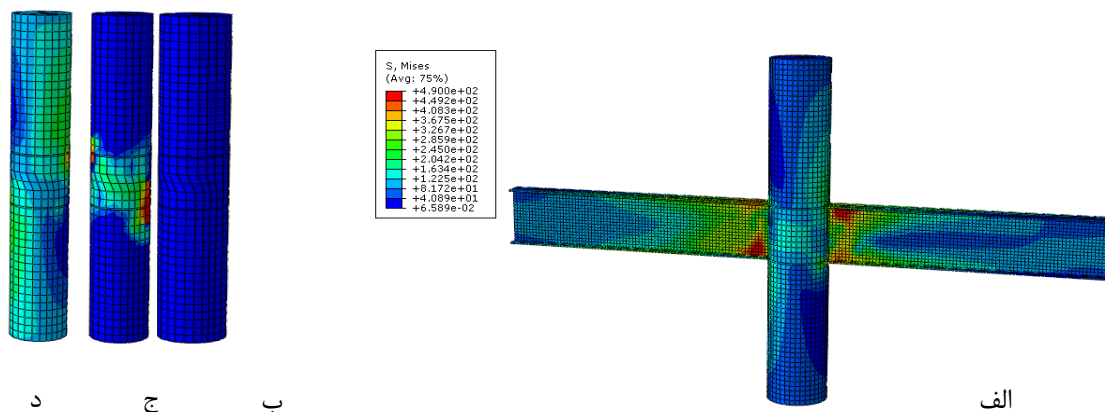
برای مش بندی هسته بتنی از المان توپر شش وجهی هشت گره‌ای سه بعدی C3D8R استفاده شده است. در المان C3D8R حرف اول یعنی C بیانگر این است که المان از نوع المان توپر پیوسته می‌باشد، دومین حرف یعنی 3D نشانگر سه بعدی بودن المان است، همچنین عدد ۸ بیانگر تعداد گره‌های المان و حرف R بیانگر استفاده از انتگرال کاهش یافته می‌باشد [۱۳]. معمولاً برای بدست آوردن ابعاد مناسب المان بندی در اعضا از تحلیل حساسیت استفاده می‌شود که تاثیر تغییر ابعاد را بررسی کرده و تا جایی که تاثیر دقت، نسبت به افزایش مدت زمان و هزینه تحلیل قابل توجه باشد، ابعاد کاهش داده می‌شود. در این مدل‌سازی از المان‌های با ابعاد ۲۵ میلیمتر برای لوله و تیر فولادی و ابعاد ۳۰ میلیمتر برای هسته بتنی و ابعاد ۱۵ میلیمتر برای جوش استفاده شده است.

۳-۴- نتایج صحت سنجی

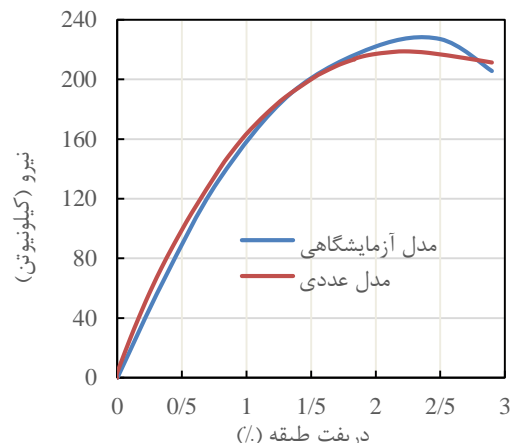
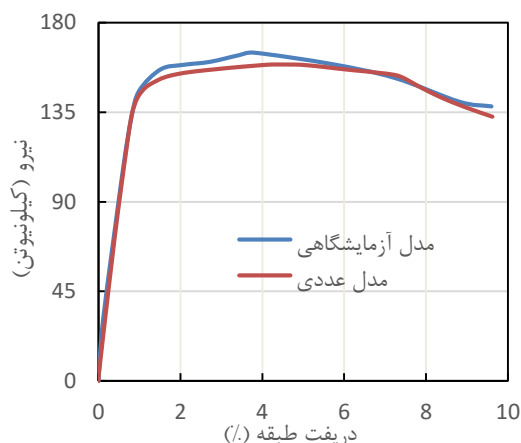
در شکل‌های ۶ و ۷ تصاویری از وضعیت تنش و میزان خرابی اجزای اتصال در مدل عددی نمونه‌های مورد صحت سنجی نشان داده شده است. نمودار نیرو-دریافت حاصل از تحلیل اجزا محدود در شکل‌های ۸ و ۹ نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، دقت مدل‌سازی مناسب و خطای تحلیل قابل قبول است.



شکل ۶: نمونه NSF1 در پایان تحلیل؛ الف) توزیع تنش فون میسز؛ ب) تنش فون میسز هسته بتنی ج) میزان خرابی کششی هسته بتنی د) میزان خرابی فشاری هسته بتنی



شکل ۷: نمونه NSF8 در پایان تحلیل؛ الف) توزیع تنش فون میسز؛ ب) تنش فون میسز هسته بتنی ج) میزان خرابی کششی هسته بتنی د) میزان خرابی فشاری هسته بتنی



شکل ۸: نمودار نیرو - دریفت نمونه‌ی NSF1 به منظور صحت سنجی شکل ۹: نمودار نیرو - دریفت نمونه‌ی NSF8 به منظور صحت سنجی

۵- مشخصات مدل‌های عددی اصلی مورد تحقیق

در این بخش با استفاده از مدل پیش گفته یک مطالعه عددی بر روی پارامترهای مختلف اتصال تیر فولادی پیوسته میان گذر و ستون‌های CFT لوله‌ای شکل انجام می‌گردد. مشخصات نمونه‌ها در جدول ۴ ارائه شده است. کلاً ۲۹ نمونه در این رشته مطالعات مورد بررسی قرار گرفته‌اند. هدف از طراحی ۲۹ نمونه و تحلیل آنها، این بوده است که میزان تاثیر مهم‌ترین پارامترهای مطرح شده در سوابق پژوهش یعنی قطر لوله فولادی، ضخامت لوله فولادی، ضخامت بال و جان تیر و میزان بار محوری وارد بر ستون بر روی نمونه‌های دارای مشخصات فنی یکسان بررسی شود. همچنین بررسی میزان صحت روابط طراحی آئین‌نامه در مقایسه با تحلیل دقیق، مورد نظر بوده است. نمونه‌های CFT1 تا CFT11 دارای قطر لوله ستون ۳۰۵ میلیمتر، نمونه‌های CFT12 تا CFT18 دارای قطر لوله ستون ۴۰۵ میلیمتر و نمونه‌های CFT19 تا CFT29 دارای قطر لوله ستون ۵۰۵ میلیمتر هستند. نسبت ظرفیت خمشی ستون به ظرفیت خمشی تیر M_{pc}/M_{pb} ، در این نمونه‌ها مابین ۰/۳۹ تا ۱/۹۵ متغیر است که از حالت "تیر قوی - ستون ضعیف" تا حالت "ستون قوی - تیر ضعیف" را در بر می‌گیرد.

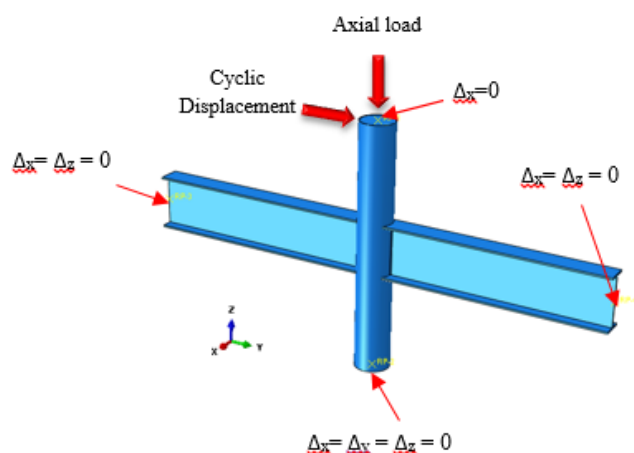
جدول ۴: ابعاد و جزئیات اتصالات تیر پیوسته میان‌گذر و ستون‌های CFT لوله‌ای شکل در مطالعه حاضر

نمونه	D (mm)	t (mm)	b (mm)	t_f (mm)	h (mm)	t_w (mm)	P (%)	M_{pb} (kN.m)	M_{pc} (kN.m)	M_{pc}/M_{pb}
CFT1	۳۰۵	۴/۵	۱۹۰	۱۴/۵	۴۲۸	۹	٪۲۰	۵۰۹	۲۰۱	۰/۳۹
CFT2	۳۰۵	۶/۵	۱۹۰	۱۴/۵	۴۲۸	۹	٪۲۰	۵۰۹	۲۵۶	۰/۵۰
CFT3	۳۰۵	۸/۵	۱۹۰	۱۴/۵	۴۲۸	۹	٪۲۰	۵۰۹	۳۰۷	۰/۶۰
CFT4	۳۰۵	۶/۵	۱۹۰	۱۲/۵	۴۲۸	۹	٪۲۰	۴۵۶	۲۵۶	۰/۵۶
CFT5	۳۰۵	۶/۵	۱۹۰	۱۶/۵	۴۲۸	۹	٪۲۰	۵۶۱	۲۵۶	۰/۴۶
CFT6	۳۰۵	۶/۵	۱۹۰	۱۴/۵	۴۲۸	۷	٪۲۰	۴۷۷	۲۵۶	۰/۵۴
CFT7	۳۰۵	۶/۵	۱۹۰	۱۴/۵	۴۲۸	۱۱	٪۲۰	۵۴۰	۲۵۶	۰/۴۷
CFT8	۳۰۵	۶/۵	۱۹۰	۱۴/۵	۴۲۸	۹	۱۰٪	۵۰۹	۲۸۴	۰/۵۶
CFT9	۳۰۵	۶/۵	۱۹۰	۱۴/۵	۴۲۸	۹	۳۰٪	۵۰۹	۲۲۷	۰/۴۵
CFT10	۳۰۵	۶/۵	۱۹۰	۱۴/۵	۴۲۸	۹	۴۰٪	۵۰۹	۱۹۸	۰/۳۹
CFT11	۳۰۵	۶/۵	۱۹۰	۱۴/۵	۴۲۸	۹	۵۰٪	۵۰۹	۱۷۰	۰/۳۳
CFT12	۴۰۵	۴/۵	۱۹۰	۱۴/۵	۴۲۸	۹	٪۲۰	۵۰۹	۳۹۹	۰/۷۸
CFT13	۴۰۵	۶/۵	۱۹۰	۱۴/۵	۴۲۸	۹	٪۲۰	۵۰۹	۴۹۷	۰/۹۸
CFT14	۴۰۵	۸/۵	۱۹۰	۱۴/۵	۴۲۸	۹	٪۲۰	۵۰۹	۵۹۲	۱/۱۶

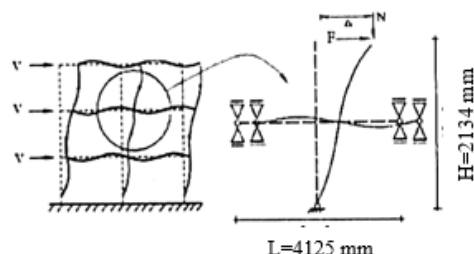
۱/۰۹	۴۹۷	۴۵۶	٪۲۰	۹	۴۲۸	۱۲/۵	۱۹۰	۶/۵	۴۰.۵	CFT15
۰/۸۹	۴۹۷	۵۶۱	٪۲۰	۹	۴۲۸	۱۶/۵	۱۹۰	۶/۵	۴۰.۵	CFT16
۱/۰۴	۴۹۷	۴۷۷	٪۲۰	۷	۴۲۸	۱۴/۵	۱۹۰	۶/۵	۴۰.۵	CFT17
۰/۹۳	۵۰۲	۵۴۰	٪۲۰	۱۱	۴۲۸	۱۴/۵	۱۹۰	۶/۵	۴۰.۵	CFT18
۱/۳۵	۶۸۶	۵۰۹	٪۲۰	۹	۴۲۸	۱۴/۵	۱۹۰	۴/۵	۵۰.۵	CFT19
۱/۶۵	۸۴۱	۵۰۹	٪۲۰	۹	۴۲۸	۱۴/۵	۱۹۰	۶/۵	۵۰.۵	CFT20
۱/۹۵	۹۹۳	۵۰۹	٪۲۰	۹	۴۲۸	۱۴/۵	۱۹۰	۸/۵	۵۰.۵	CFT21
۱/۸۴	۸۴۱	۴۵۶	٪۲۰	۹	۴۲۸	۱۲/۵	۱۹۰	۶/۵	۵۰.۵	CFT22
۱/۵۰	۸۴۱	۵۶۱	٪۲۰	۹	۴۲۸	۱۶/۵	۱۹۰	۶/۵	۵۰.۵	CFT23
۱/۷۶	۸۴۱	۴۷۷	٪۲۰	۷	۴۲۸	۱۴/۵	۱۹۰	۶/۵	۵۰.۵	CFT24
۱/۵۶	۸۴۱	۵۴۰	٪۲۰	۱۱	۴۲۸	۱۴/۵	۱۹۰	۶/۵	۵۰.۵	CFT25
۱/۸۳	۹۳۱	۵۰۹	۱۰٪	۹	۴۲۸	۱۴/۵	۱۹۰	۶/۵	۵۰.۵	CFT26
۱/۴۸	۷۵۲	۵۰۹	۳۰٪	۹	۴۲۸	۱۴/۵	۱۹۰	۶/۵	۵۰.۵	CFT27
۱/۳۰	۶۶۳	۵۰۹	۴۰٪	۹	۴۲۸	۱۴/۵	۱۹۰	۶/۵	۵۰.۵	CFT28
۱/۱۳	۵۷۴	۵۰۹	۵۰٪	۹	۴۲۸	۱۴/۵	۱۹۰	۶/۵	۵۰.۵	CFT29

در جدول ۴، D نشان دهنده قطر لوله فولادی برحسب میلی متر، t نشان دهنده ضخامت لوله فولادی برحسب میلی متر، b نشان دهنده عرض بال تیر فولادی برحسب میلی متر، t_f نشان دهنده ضخامت بال تیر فولادی برحسب میلی متر، h نشان دهنده ارتفاع جان تیر فولادی برحسب میلی متر، t_w نشان دهنده ضخامت جان تیر فولادی برحسب میلی متر، P نشان دهنده میزان نیروی محوری اعمالی براساس ظرفیت محوری ستون بدون لنگر (برحسب درصد)، M_{pb} لنگر پلاستیک تیر برحسب کیلونیوتن متر (M_{pb})، از رابطه $F_y Z_b$ محاسبه می شود، M_{pc} لنگر پلاستیک ستون برحسب کیلونیوتن متر (M_{pc})، از رابطه $\sum Z_c (F_{yc} - \frac{P_{nc}}{A_g})$ محاسبه می شود، M_{pc} / M_{pb} نسبت ظرفیت خمشی ستون به ظرفیت خمشی تیر می باشد [۱۸].

مشخصات مصالح مصرفی در این مطالعه، مطابق نمونه صحت سنجی NSF1 می باشد. براساس شرایط بارگذاری در این مطالعه، بارگذاری نمونه ها در دو مرحله انجام می شود. ابتدا بار محوری به بالای ستون وارد شده یعنی بارگذاری محوری با توزیع یکنواخت بر مقطع ستون (لوله فولادی و هسته بتنی) اعمال شده است. سپس جابجایی جانبی به صورت بارگذاری افزایش یافته یکسویه با کنترل تغییر مکان تا ۸ درصد دریافت به راس ستون اعمال می گردد. فاصله نقطه جابجایی اعمالی از مرکز اتصال، ۱۰۶۷ میلی متر است. شکل های ۱۰ و ۱۱ شمای عمومی تکیه گاه ها و مبنای بارگذاری و تغییر شکل نمونه ها به عنوان جزئی از قاب خمشی را نشان می دهند.



شکل ۱۱: هندسه مدل و شرایط مرزی نمونه

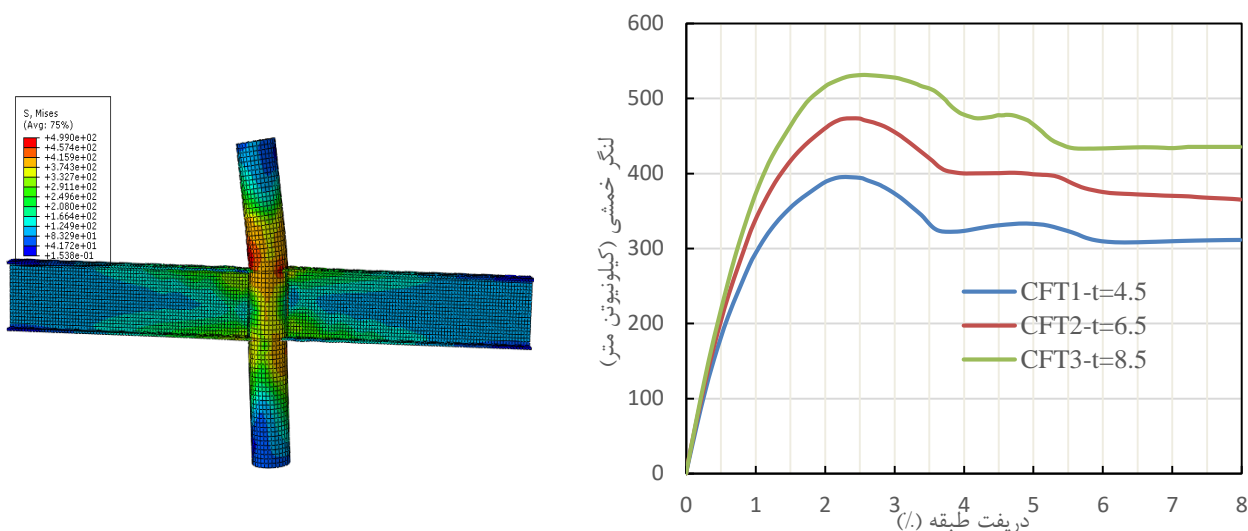


شکل ۱۰: تغییر شکل یک قاب خمشی تحت بار جانبی و نقاط عطف آن

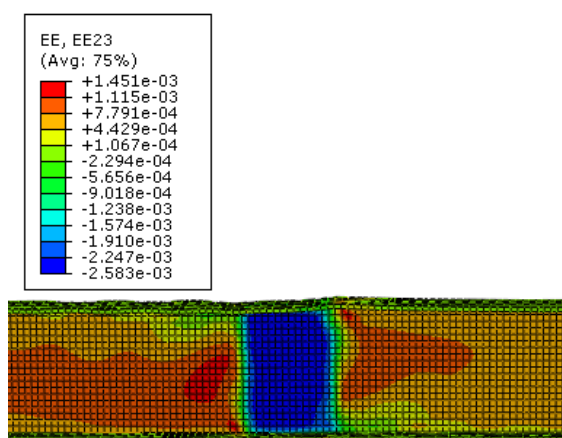
۶- بحث و بررسی نتایج

۱-۶- تاثیر تغییرات ضخامت لوله فولادی ستون بر عملکرد اتصال

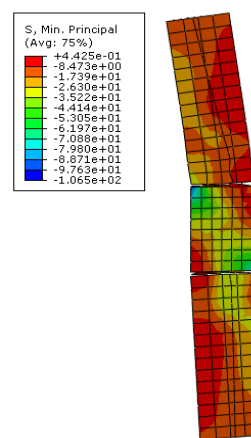
در این بخش به بررسی تاثیر تغییرات ضخامت لوله فولادی در اتصال نشان داده شده در شکل ۱۱ پرداخته می‌شود. برای این امر لوله فولادی ستون با ضخامت‌های ۴/۵، ۶/۵ و ۸/۵ میلی‌متر مورد بررسی قرار می‌گیرد.

شکل ۱۲: تاثیر ضخامت جداره ستون در لنگر خمشی اتصال $D=305\text{ mm}$

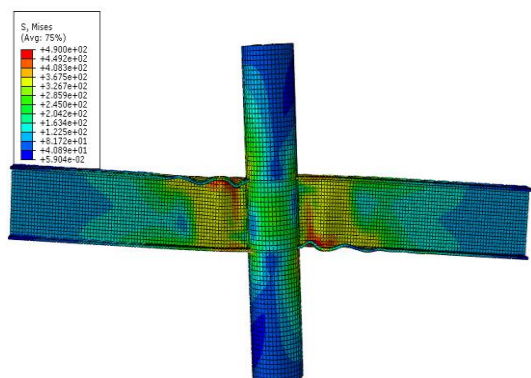
شکل ۱۳: توزیع تنش فون میسز در نمونه CFT2 در پایان تحلیل



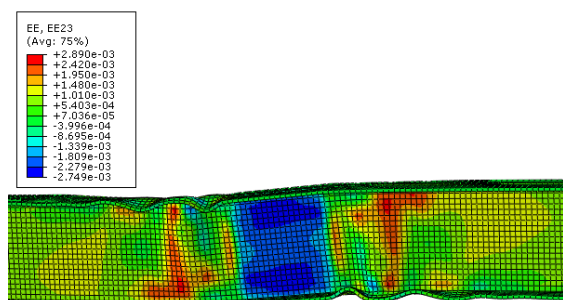
شکل ۱۵: توزیع کرنش برشی تیر در نمونه CFT2 در پایان تحلیل



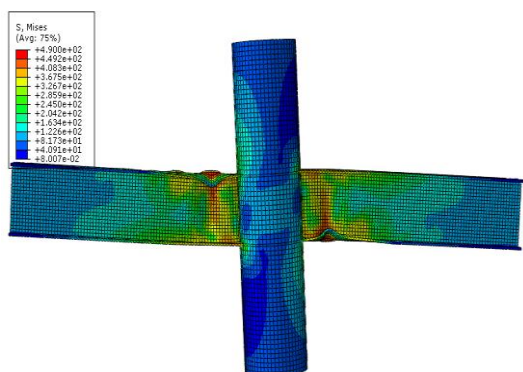
شکل ۱۴: توزیع تنش هسته بتنی در نمونه CFT2 در پایان تحلیل



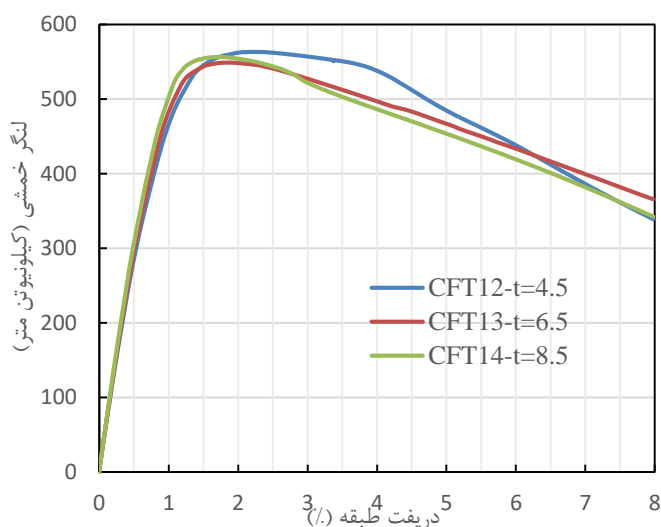
شکل ۱۷: توزیع تنش فون میسر در نمونه CFT13 در پایان تحلیل



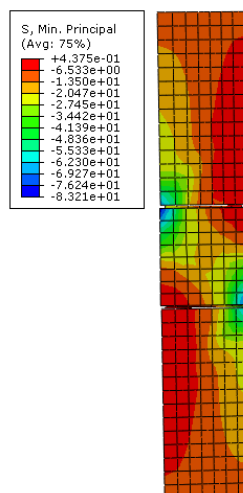
شکل ۱۹: توزیع کرنش برشی تیر در نمونه CFT13 در پایان تحلیل



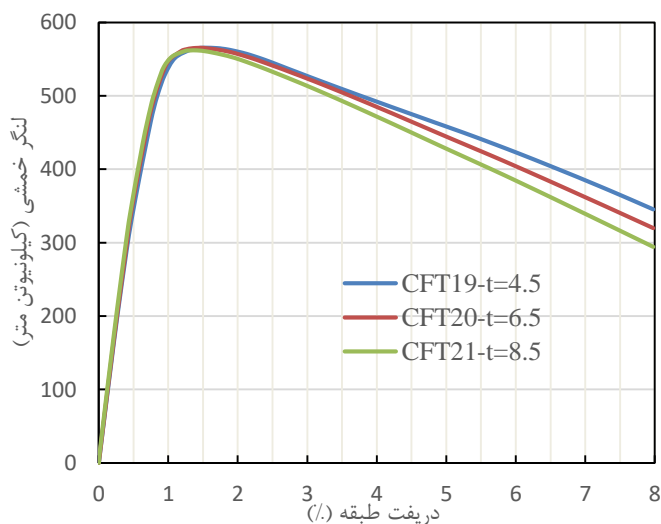
شکل ۲۱: توزیع تنش فون میسر در نمونه CFT20 در پایان تحلیل



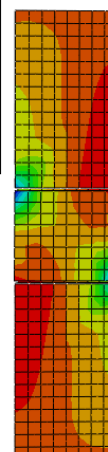
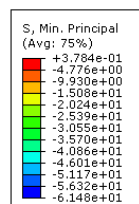
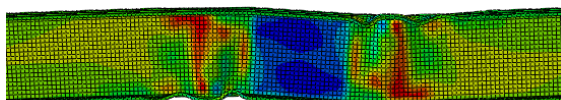
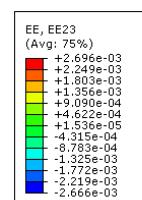
شکل ۱۶: تاثیر ضخامت جداره ستون در لنگر خمشی اتصال $D=405\text{ mm}$



شکل ۱۸: توزیع تنش هسته بتنی در نمونه CFT13 در پایان تحلیل



شکل ۲۰: تاثیر ضخامت جداره ستون در لنگر خمشی اتصال $D=505\text{ mm}$



شکل ۲۳: توزیع کرنش برشی تیر در نمونه CFT20 در پایان تحلیل

شکل ۲۲: توزیع تنش هسته بتنی در نمونه CFT20 در پایان تحلیل

همانطور که در اشکال ۱۲، ۱۶ و ۲۰ مشاهده می‌شود، می‌توان نتیجه گرفت که تغییرات ضخامت لوله فولادی، هنگامی تاثیرگذار است که شکست اتصال در سطح جداره لوله فولادی واقع شود. همانطور که در جدول ۵ مشاهده می‌شود، هنگامی که سهم جذب انرژی توسط ستون فولادی از سایر المان‌ها بیشتر است، تغییرات ضخامت لوله فولادی، در نتایج موثر خواهد بود. با افزایش قطر ستون و ثابت بودن مقطع تیر، شکست اتصال از لوله فولادی به مقطع تیر انتقال می‌یابد، بطوری که در شکل ۲۱ مفصل پلاستیک در بال تیر نمونه CFT20 کاملاً مشهود است.

جدول ۵: میزان انرژی تجمعی جذب شده در اجزای اتصال تیر فولادی پیوسته میان گذر در ستون‌های CFT با قطرهای مختلف

نمونه	سهم انرژی جذب شده در تیر فولادی	سهم انرژی جذب شده در ستون لوله‌ای فولادی	سهم انرژی جذب شده در هسته بتنی
CFT 2 – D = 305 mm	۱۳٪	۶۲٪	۲۵٪
CFT 13 – D = 405 mm	۹۱٪	۴٪	۵٪
CFT 20 – D = 505 mm	۹۴٪	۲٪	۴٪

جدول ۶: جزئیات محاسباتی و تحلیلی نمونه‌های ارائه شده در شکل‌های ۱۶، ۱۲ و ۲۰

نمونه	M_{pb} (kN.m)	M_{pc} (kN.m)	M_{pb} / M_{pc}	M_u (kN.m)	$\epsilon_c \times 10^{-2}$	$\epsilon_b \times 10^{-2}$	θ_u (درصد رادیان)	θ_y (درصد رادیان)	θ_u / θ_y	$K_y = M_u / \theta_y$ (kN.m)
CFT1	۵۰۹	۲۰۱	۰/۳۹	۳۹۵	۶/۶۵	۰/۲۵	۳/۴۷	۱/۳۶	۲/۵۵	۲۹۱
CFT2	۵۰۹	۲۵۶	۰/۵۰	۴۷۴	۵/۵۱	۰/۶۸	۳/۸۰	۱/۴۵	۲/۶۱	۳۲۶
CFT3	۵۰۹	۳۰۷	۰/۶۰	۵۳۱	۳/۹۴	۱/۶۷	۵/۱۷	۱/۴۹	۳/۴۶	۳۵۶
CFT12	۵۰۹	۳۹۹	۰/۷۸	۵۶۳	۱/۶۱	۱/۹۷	۵/۱۲	۱/۱۵	۴/۴۷	۴۹۱
CFT13	۵۰۹	۴۹۷	۰/۹۸	۵۴۹	۰/۶۴	۳/۱۷	۵/۰۲	۱/۰۴	۴/۸۳	۵۲۷
CFT14	۵۰۹	۵۹۲	۱/۱۶	۵۵۴	۰/۱۶	۱/۴۱	۴/۴۹	۰/۹۹	۴/۵۵	۵۶۱
CFT19	۵۰۹	۶۸۶	۱/۳۵	۵۶۵	۰/۱۸	۲/۴۶	۴/۳۳	۰/۸۸	۴/۹۲	۶۴۳
CFT20	۵۰۹	۸۴۱	۱/۶۵	۵۶۵	۰/۰۶	۲/۱۱	۴/۱۲	۰/۸۴	۴/۹۳	۶۷۶
CFT21	۵۰۹	۹۹۳	۱/۹۵	۵۶۲	۰/۰۳	۲/۳۹	۳/۸۶	۰/۸۰	۴/۸۳	۷۰۳

در جدول ۶، M_u نشان‌دهنده حداکثر لنگر قابل تحمل اتصال، ϵ_c نشان‌دهنده حداکثر کرنش پلاستیک معادل جداره ستون در گام تحلیل متناظر با حداکثر لنگر قابل تحمل اتصال، ϵ_b نشان‌دهنده حداکثر کرنش پلاستیک معادل تیر فولادی در گام تحلیل متناظر با حداکثر

قابل تحمل لنگر اتصال، θ_u نشان‌دهنده‌ی دوران نهایی اتصال، θ_y نشان‌دهنده‌ی دوران تسلیم اتصال، θ_u/θ_y نشان‌دهنده‌ی ضریب شکل پذیری اتصال و M_u/θ_y نشان‌دهنده‌ی سختی تسلیم اتصال می‌باشد [۱۹].

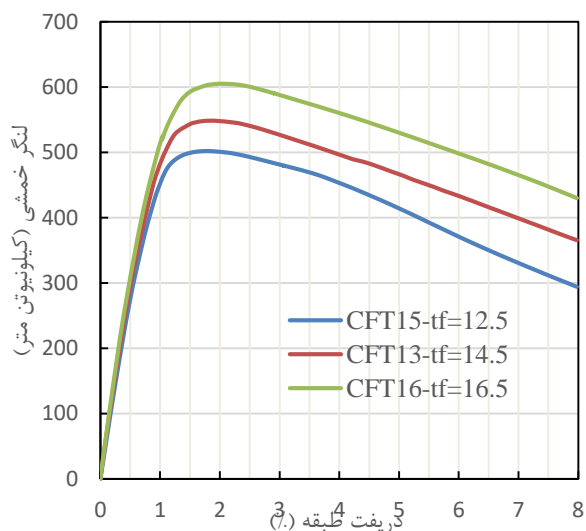
در نمونه‌های CFT1، CFT2 و CFT3 همانطور که از محاسبات تئوری جدول ۶ استنباط می‌گردد، لنگر پلاستیک تیر نمونه‌ها برابر ۵۰۹ کیلونیوتن‌متر و لنگر پلاستیک ستون نمونه‌ها به ترتیب برابر با ۲۰۱، ۲۵۶ و ۳۰۷ کیلونیوتن‌متر می‌باشد. نسبت ظرفیت خمشی ستون به ظرفیت خمشی تیر (M_{pc} / M_{pb}) در این نمونه‌ها کمتر از یک است که متناظر با شکست اتصال در جداره لوله فولادی می‌باشد. در شکل ۱۲، لنگر نهایی اتصال نمونه‌ها به ترتیب ۳۹۵، ۴۷۴ و ۵۳۱ کیلونیوتن‌متر می‌باشد. همانطور که در جدول ۶ مشاهده می‌شود، در هر سه نمونه، ϵ_c نسبت به ϵ_b مقادیر بزرگتری دارد که بیانگر این است که شکست اتصال نمونه، در سطح جداره لوله فولادی واقع شده است. لازم به ذکر است با افزایش ضخامت لوله فولادی، دوران نهایی و ضریب شکل پذیری اتصال افزایش می‌یابد. همچنین با این تغییر، افزایش سختی الاستیک اتصال مشهود است. شکل ۱۴، نحوه تشکیل دستک قطری در دریافت ۸ درصد با تنش دستک در حدود ۱۶ مگاپاسکال را برای نمونه CFT2 نشان می‌دهد. شکل ۱۵، کرنش‌های برشی تیر را نشان می‌دهد که جان تیر در ناحیه چشمه اتصال بصورت الاستیک رفتار می‌کند.

در نمونه‌های CFT12، CFT13 و CFT14 بر اساس محاسبات تئوری جدول ۶، لنگر پلاستیک تیر نمونه‌ها برابر ۵۰۹ کیلونیوتن‌متر و لنگر پلاستیک ستون نمونه‌ها به ترتیب برابر با ۳۹۹، ۴۹۷ و ۵۹۲ کیلونیوتن‌متر می‌باشد. با افزایش ضخامت لوله فولادی، شکست اتصال از مقطع ستون به مقطع تیر انتقال می‌یابد که نسبت ظرفیت خمشی ستون به ظرفیت خمشی تیر (M_{pc} / M_{pb}) در جدول ۶ بیانگر این موضوع می‌باشد. در شکل ۱۶، لنگر نهایی اتصال نمونه‌ها به ترتیب ۵۶۳، ۵۴۹ و ۵۵۴ کیلونیوتن‌متر می‌باشد. لازم به ذکر است با افزایش ضخامت لوله فولادی، ضریب شکل پذیری اتصال تغییر چندانی نمی‌کند و سختی الاستیک این نمونه‌ها نسبت به CFT1، CFT2 و CFT3 افزایش کمتری پیدا می‌کند. شکل ۱۸، نحوه تشکیل دستک قطری در دریافت ۸ درصد با تنش دستک در حدود ۱۳ مگاپاسکال را برای نمونه CFT13 نشان می‌دهد. شکل ۱۹، کرنش‌های برشی تیر را نشان می‌دهد که جان تیر در ناحیه چشمه اتصال بصورت الاستیک رفتار کرده و فقط در انتهای بارگذاری اندکی وارد محدوده غیرخطی شده است.

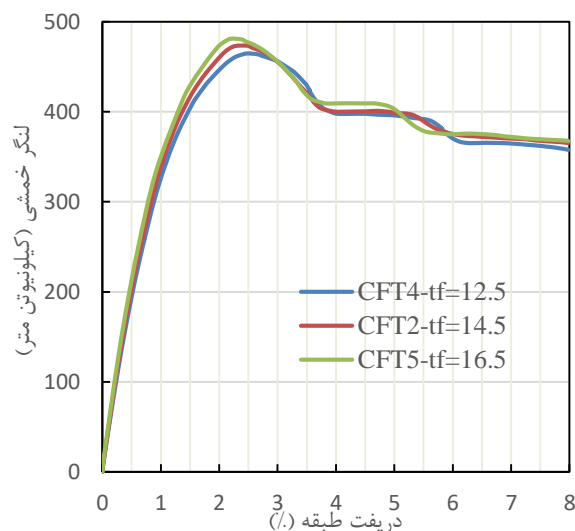
با توجه به جدول ۶ در نمونه CFT19، CFT20 و CFT21 لنگر پلاستیک تیر نمونه‌ها برابر ۵۰۹ کیلونیوتن‌متر و لنگر پلاستیک ستون نمونه‌ها به ترتیب برابر با ۶۸۶، ۸۴۱ و ۹۹۳ کیلونیوتن‌متر می‌باشد. نسبت ظرفیت خمشی ستون به ظرفیت خمشی تیر (M_{pc} / M_{pb}) بیشتر از یک است که متناظر با شکست اتصال در تیر فولادی می‌باشد. همانطور که در شکل ۲۱ مشاهده می‌شود تغییر شکل‌های غیرالاستیک و ماندگار در محل مفصل‌های پلاستیک در تیرها متمرکز است، در حالی که ستون و ناحیه چشمه اتصال در طول بارگذاری، الاستیک رفتار کردند که این رفتار همخوان با نسبت‌های مندرج در جدول ۶ می‌باشد. در شکل ۲۰، لنگر نهایی اتصال نمونه‌ها به ترتیب ۵۶۵، ۵۶۵ و ۵۶۲ کیلونیوتن‌متر می‌باشد؛ بنابراین لنگر نهایی اتصال‌ها دارای مقادیر بزرگتری نسبت به لنگر پلاستیک تیر نمونه‌ها می‌باشد. همانطور که در جدول ۶ مشاهده می‌شود، در هر سه نمونه، ϵ_c نسبت به ϵ_b مقادیر کوچکتری دارد که بیانگر این است که شکست اتصال نمونه، در تیر فولادی واقع شده است. با توجه به این نکته افزایش ضخامت لوله فولادی، در ضریب شکل پذیری اتصال تغییر چندانی ایجاد نمی‌کند و سختی الاستیک این نمونه‌ها نسبت به CFT12، CFT13 و CFT14 افزایش کمتری پیدا می‌کند. شکل ۲۲، نحوه تشکیل دستک قطری در دریافت ۸ درصد با تنش دستک در حدود ۱۰ مگاپاسکال را برای نمونه CFT20 نشان می‌دهد. شکل ۲۳، کرنش‌های برشی تیر را نشان می‌دهد که جان تیر در ناحیه چشمه اتصال بصورت الاستیک رفتار کرده و فقط در انتهای بارگذاری، به مقدار بسیار جزئی وارد محدوده غیرخطی شده است.

۶-۲- تاثیر تغییرات ضخامت بال و جان تیر بر عملکرد اتصال

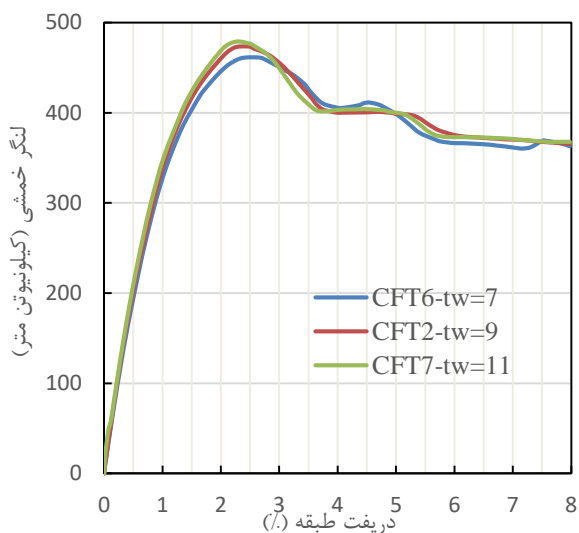
در این بخش به بررسی تاثیر ضخامت بال و ضخامت جان تیر در رفتار اتصال پرداخته می‌شود. برای این امر بال تیر با ضخامت ۱۲/۵ و ۱۴/۵ میلی‌متر و جان تیر با ضخامت ۷، ۹ و ۱۱ میلی‌متر مورد بررسی قرار می‌گیرد.



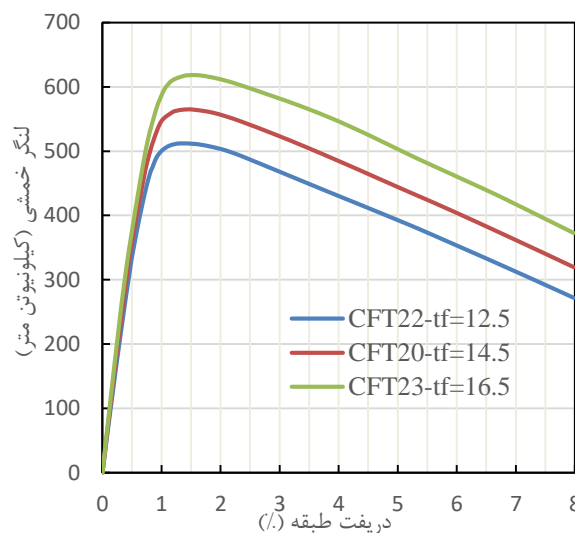
شکل ۲۵: تاثیر ضخامت بال تیر در لنگر خمشی اتصال $D=405$ mm



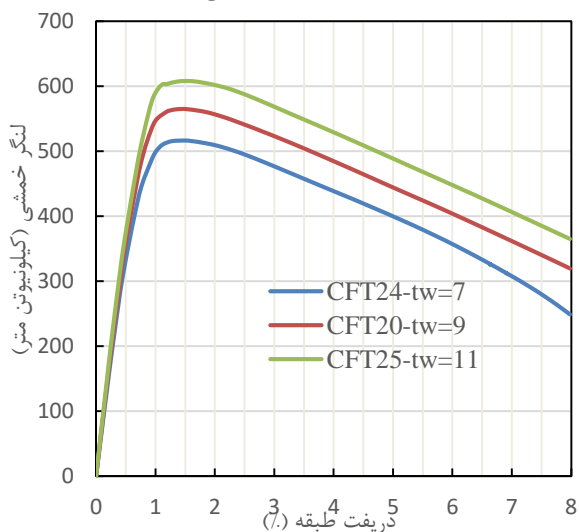
شکل ۲۴: تاثیر ضخامت بال تیر در لنگر خمشی اتصال $D=305$ mm



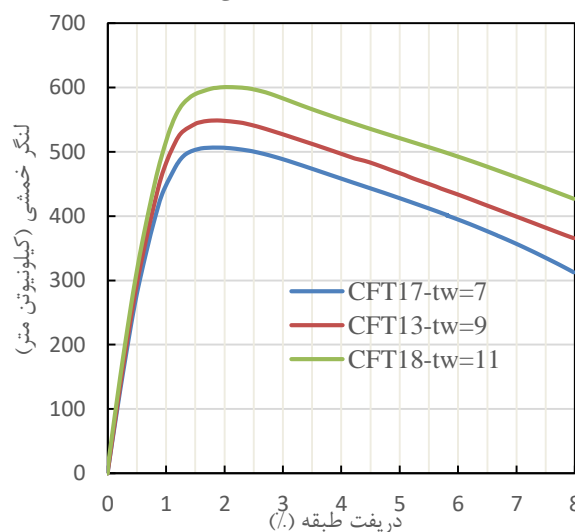
شکل ۲۷: تاثیر ضخامت جان تیر در لنگر خمشی اتصال $D=305$ mm



شکل ۲۶: تاثیر ضخامت بال تیر در لنگر خمشی اتصال $D=505$ mm



شکل ۲۹: تاثیر ضخامت جان تیر در لنگر خمشی اتصال $D=305$ mm



شکل ۲۸: تاثیر ضخامت جان تیر در لنگر خمشی اتصال $D=505$ mm

از اشکال ۲۴ تا ۲۶ می‌توان استنتاج نمود که افزایش ضخامت بال تیر هنگامی تاثیرگذار است که شکست اتصال در تیر واقع شود و در مواقعی که شکست در جداره لوله فولادی باشد، تاثیر بسزایی ندارد. در اشکال ۲۷ تا ۲۹ می‌توان مشاهده نمود افزایش ضخامت جان تیر، به نحوی که وقتی ضخامت از ۷ میلی‌متر به ۱۱ میلی‌متر تغییر می‌کند، در ستون‌های CFT لوله‌ای شکل با قطر ۵۰۵ و ۴۰۵ میلی‌متر حدود ۱۸ درصد در افزایش ظرفیت نهایی اتصال موثر است. در صورتی که این افزایش ضخامت در ستون‌های CFT لوله‌ای شکل با قطر ۳۰۵ میلی‌متر در حدود ۴ درصد می‌باشد. بنابراین افزایش ضخامت جان تیر در حالتی که شکست اتصال در تیر واقع شود، تاثیر مهمی دارد.

جدول ۷: جزئیات محاسباتی و تحلیلی نمونه‌های ارائه شده در شکل‌های ۲۴ تا ۲۹

نمونه	M_{pb} (kN.m)	M_{pc} (kN.m)	M_{pc} / M_{pb}	M_u (kN.m)	ε_c $\times 10^{-2}$	ε_b $\times 10^{-2}$	θ_u (درصد رادیان)	θ_y (درصد رادیان)	θ_u / θ_y	$K_y = M_u / \theta_y$ (kN.m)
CFT2	۵۰۹	۲۵۶	۰/۵۰	۴۷۴	۵/۵۱	۰/۶۸	۳/۸۰	۱/۴۵	۲/۶۱	۳۲۶
CFT4	۴۵۶	۲۵۶	۰/۵۶	۴۶۵	۵/۳۷	۱/۰۷	۴/۲۵	۱/۵۱	۲/۸۱	۲۰۸
CFT5	۵۶۱	۲۵۶	۰/۴۶	۴۸۱	۵/۰۱	۰/۴۲	۳/۷۱	۱/۴۳	۲/۶۰	۳۳۷
CFT6	۴۷۷	۲۵۶	۰/۵۴	۴۶۱	۵/۲۹	۱/۰۲	۴/۱۸	۱/۴۷	۲/۸۵	۳۱۴
CFT7	۵۴۰	۲۵۶	۰/۴۷	۴۷۹	۵/۷۸	۰/۴۶	۳/۵۴	۱/۴۳	۲/۴۸	۳۳۶
CFT13	۵۰۹	۴۹۷	۰/۹۸	۵۴۹	۰/۶۴	۳/۱۷	۵/۰۲	۱/۰۴	۴/۸۳	۵۲۷
CFT15	۴۵۶	۴۹۷	۱/۰۹	۵۰۲	۰/۴۱	۲/۱۳	۴/۷۱	۱/۰	۴/۷۱	۵۰۲
CFT16	۵۶۱	۴۹۷	۰/۸۹	۶۰۵	۰/۹۱	۲/۴۲	۵/۵۰	۱/۱۱	۴/۹۷	۵۴۷
CFT17	۴۷۷	۴۹۷	۱/۰۴	۵۰۷	۰/۴۲	۲/۷۵	۴/۹۱	۱/۰۱	۴/۸۵	۵۰۰
CFT18	۵۴۰	۴۹۷	۰/۹۳	۶۰۱	۰/۸۹	۲/۵۸	۵/۳۶	۱/۰۸	۴/۹۶	۵۵۶
CFT20	۵۰۹	۸۴۱	۱/۶۵	۵۶۵	۰/۰۶	۲/۱۱	۴/۱۲	۰/۸۴	۴/۹۳	۶۷۶
CFT22	۴۵۶	۸۴۱	۱/۸۴	۵۱۲	۰/۱۵	۲/۲۵	۳/۸۷	۰/۸	۴/۸۴	۶۴۱
CFT23	۵۶۱	۸۴۱	۱/۵۰	۶۱۸	۰/۱۲	۲/۵۴	۴/۵۰	۰/۸۸	۵/۱۱	۷۰۳
CFT24	۴۷۷	۸۴۱	۱/۷۶	۵۱۷	۰/۰۷	۲/۳۸	۴/۰	۰/۸۲	۴/۸۹	۶۳۱
CFT25	۵۴۰	۸۴۱	۱/۵۶	۶۰۸	۰/۰۶	۱/۸۴	۴/۳۰	۰/۸۶	۴/۹۷	۷۰۴

در نمونه‌های CFT2، CFT4، CFT5 و همانطور که از محاسبات تئوری جدول ۷ استنباط می‌گردد، لنگر پلاستیک ستون نمونه‌ها برابر ۲۵۶ کیلونیوتن‌متر و لنگر پلاستیک تیر نمونه‌ها به ترتیب برابر با ۴۵۶، ۵۰۹ و ۵۶۱ کیلونیوتن‌متر می‌باشد. نسبت ظرفیت خمشی ستون به ظرفیت خمشی تیر (M_{pc} / M_{pb}) در این نمونه‌ها کمتر از یک است که این نسبت متناظر با شکست اتصال در جداره لوله فولادی می‌باشد. در شکل ۲۴، لنگر نهایی اتصال نمونه‌ها به ترتیب ۴۶۵، ۴۷۴ و ۴۸۱ کیلونیوتن‌متر می‌باشد. با توجه به اینکه در محاسبات تئوری، شکست اتصال مورد بحث در ستون واقع شده است به عبارت دیگر، ε_c نسبت به ε_b مقادیر بزرگتری دارد، در نتیجه افزایش ضخامت بال تیر تاثیری در لنگر نهایی اتصال ندارد و مطابق جدول ۷ مقادیر لنگر نهایی اتصال‌ها تقریباً یکسان می‌باشد.

در نمونه‌های CFT13، CFT15 و CFT16 همانطور که از محاسبات تئوری جدول ۷ برمی‌آید، لنگر پلاستیک ستون نمونه‌ها برابر ۴۹۷ کیلونیوتن‌متر و لنگر پلاستیک تیر نمونه‌ها به ترتیب برابر با ۵۰۲، ۵۴۹ و ۶۰۵ کیلونیوتن‌متر می‌باشد. لازم به ذکر است با افزایش ضخامت بال تیر فولادی، ضریب شکل‌پذیری اتصال و سختی الاستیک اتصال افزایش می‌یابد.

در نمونه‌های CFT20، CFT22 و CFT23 همانطور که از محاسبات تئوری جدول ۷ استنباط می‌گردد، لنگر پلاستیک ستون نمونه‌ها برابر ۸۴۱ کیلونیوتن‌متر و لنگر پلاستیک تیر نمونه‌ها به ترتیب برابر با ۴۵۶، ۵۰۹ و ۵۶۱ کیلونیوتن‌متر می‌باشد. نسبت ظرفیت خمشی ستون به ظرفیت خمشی تیر (M_{pc} / M_{pb}) بیشتر از یک است که متناظر با شکست اتصال در تیر فولادی می‌باشد. به عبارت دیگر، ε_c نسبت به ε_b مقادیر کوچکتری دارد. در شکل ۲۶، لنگر نهایی اتصال نمونه‌ها به ترتیب ۵۱۲، ۵۶۵ و ۶۱۸ کیلونیوتن‌متر می‌باشد. در نتیجه افزایش ضخامت بال تیر فولادی، باعث کاهش کمانش موضعی در بال تیر می‌شود، لنگر نهایی اتصال افزایش می‌یابد و دوران نهایی اتصال افزایش قابل توجهی دارد.

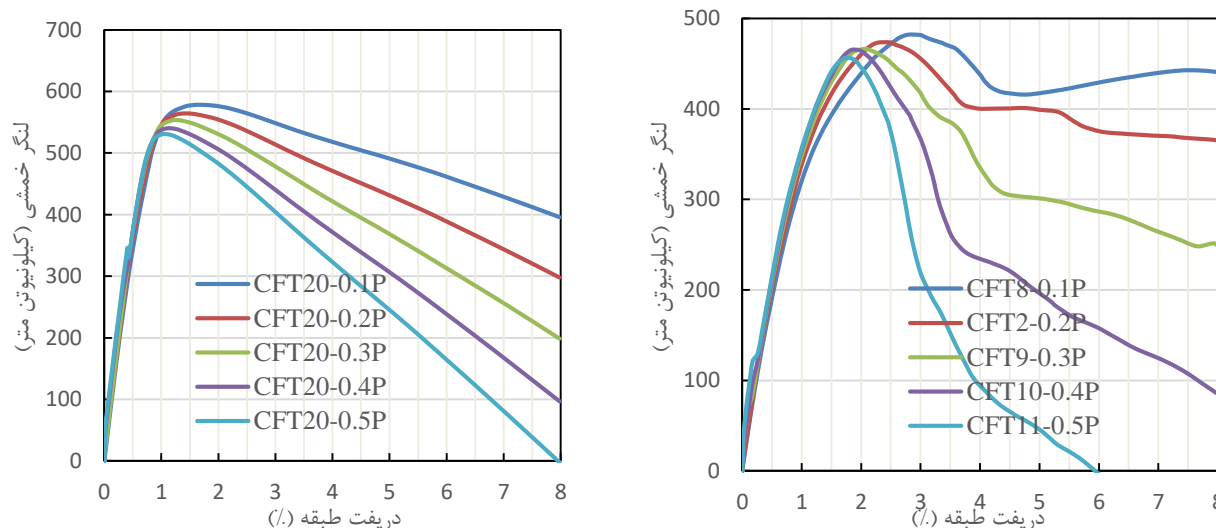
در نمونه‌های CFT6، CFT2 و CFT7 همانطور که از محاسبات تئوری جدول ۷ برمی‌آید، لنگر پلاستیک ستون نمونه‌ها برابر ۲۵۶ کیلونیوتن متر و لنگر پلاستیک تیر نمونه‌ها به ترتیب برابر با ۴۷۷، ۵۰۹ و ۵۴۰ کیلونیوتن متر می‌باشد. نسبت ظرفیت خمشی ستون به ظرفیت خمشی تیر (M_{pc} / M_{pb}) کمتر از یک است که متناظر با شکست اتصال در جداره لوله فولادی می‌باشد. در شکل ۲۷، لنگر نهایی اتصال نمونه‌ها به ترتیب ۴۶۱، ۴۷۴ و ۴۷۹ کیلونیوتن متر می‌باشد، با توجه به اینکه در محاسبات تئوری، شکست اتصال مورد بحث در سطح جداره لوله فولادی واقع شده است، به عبارت دیگر، ϵ_c نسبت به ϵ_b مقادیر بزرگتری دارد، در نتیجه افزایش ضخامت جان تیر تأثیری در لنگر نهایی اتصال ندارد و مطابق جدول ۷ مقادیر لنگر نهایی این اتصال‌ها تقریباً یکسان می‌باشد.

در نمونه‌های CFT17، CFT13 و CFT18 همانطور که از محاسبات تئوری جدول ۷ استنباط می‌گردد، لنگر پلاستیک ستون نمونه‌ها برابر ۴۹۷ کیلونیوتن متر و لنگر پلاستیک تیر نمونه‌ها به ترتیب برابر با ۴۷۷، ۵۰۹ و ۵۴۰ کیلونیوتن متر می‌باشد. در شکل ۲۸، لنگر نهایی اتصال نمونه‌ها به ترتیب ۵۰۷، ۵۴۹ و ۶۰۱ کیلونیوتن متر می‌باشد.

در نمونه‌های CFT24، CFT20 و CFT25 همانطور که از محاسبات تئوری جدول ۷ استنباط می‌گردد، لنگر پلاستیک ستون نمونه‌ها برابر ۸۴۱ کیلونیوتن متر و لنگر پلاستیک تیر نمونه‌ها به ترتیب برابر با ۴۷۷، ۵۰۹ و ۵۴۰ کیلونیوتن متر می‌باشد، که نسبت ظرفیت خمشی ستون به ظرفیت خمشی تیر (M_{pc} / M_{pb}) بیشتر از یک می‌باشد که این نسبت متناظر با شکست اتصال در تیر فولادی می‌باشد. در شکل ۲۹، لنگر نهایی اتصال نمونه‌ها به ترتیب ۵۱۷، ۵۶۵ و ۶۰۸ کیلونیوتن متر می‌باشد. با توجه به اینکه در محاسبات تئوری، شکست این اتصالات در تیر فولادی واقع شده است و تغییرشکل‌های غیرالاستیک و ماندگار در محل مفصل‌های پلاستیک در تیرها متمرکز می‌باشد، در حالی که ستون و ناحیه چشمه اتصال در طول بارگذاری الاستیک رفتار می‌کنند، در نتیجه افزایش ضخامت جان تیر فولادی باعث کاهش کمناش موضعی در جان تیر می‌شود.

۳-۶- تأثیر میزان بار محوری وارد بر ستون بر عملکرد اتصال

در این بخش به بررسی تأثیر تغییرات میزان بار محوری وارد بر ستون در رفتار اتصال میانگدر پرداخته می‌شود. در این مطالعه میزان بار محوری وارد بر ستون در پنج حالت یعنی ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ درصد ظرفیت محوری ستون مورد بررسی قرار می‌گیرد.



شکل ۳۰: تأثیر نیروی محوری ستون بر لنگر خمشی اتصال $D=305\text{ mm}$ شکل ۳۱: تأثیر نیروی محوری ستون بر لنگر خمشی اتصال $D=505\text{ mm}$

با توجه به شکل ۳۰ می‌توان گفت افزایش نیروی محوری وارد بر ستون اتصال، باعث کاهش ظرفیت نهایی اتصال می‌شود و با افت ناگهانی در نمودار لنگر خمشی - دررفت طبقه، همراه است. به عبارت دیگر، با افزایش نیروی محوری، کمناش موضعی در گام‌های اولیه اعمال تغییر شکل، موجب گسیختگی لوله فولادی می‌گردد. در نتیجه شکل پذیری ستون‌ها تحت افزایش نیروی محوری کاهش می‌یابد که به دلیل تمرکز آسیب‌های ناشی از بارهای جانبی و محوری در جداره لوله فولادی می‌باشد.

با توجه به شکل ۳۱ می‌توان گفت که با توجه به شکست تیر در اتصال مورد بحث، افزایش بار محوری ستون باعث کاهش ظرفیت نهایی اتصال می‌شود. وجود نیروی محوری طبق رابطه $\sum M_{pc} = \sum Z_c(F_{yc} - \frac{P_{nc}}{A_g})$ باعث کاهش ظرفیت خمشی ستون و در نتیجه کاهش ظرفیت خمشی اتصال می‌شود. همچنین با توجه به وقوع شکست در تیر، افت ناگهانی مقاومت خمشی بر اثر کمانش موضعی در نمودار لنگر خمشی - دررفت طبقه با شدت کمتری نسبت به آنچه در شکل ۳۰ دیده می‌شود، رخ می‌دهد.

۷- نتیجه گیری

در این تحقیق یک مطالعه پارامتری برای بررسی تاثیر قطر لوله فولادی، ضخامت لوله فولادی، ضخامت بال و جان تیر و همچنین میزان بار محوری اعمالی به ستون بر رفتار اتصال تیر میانگذر و ستون لوله فولادی پر شده با بتن انجام شده است. برای مجموعه‌ای از ۲۹ نمونه با مشخصات مختلف، مدل‌سازی عددی به کمک نرم‌افزار آباکوس انجام شده است. پس از انجام تحلیل‌ها و محاسبه‌های لازم، نتایج به شرح زیر به دست آمده‌اند:

۱- در ستون‌های لوله‌ای پر شده با بتن با $M_{pc} / M_{pb} < 0.6$ در انطباق با برآورد تئوری، شکست اتصال در جداره لوله فولادی واقع می‌شود و در محدوده $M_{pc} / M_{pb} > 0.6$ ، همانطور که در مدل‌سازی‌های عددی مشاهده شد، تغییر شکل‌های پلاستیک در تیرها متمرکز شده است. کمانش موضعی بال و جان تیر به علت تمرکز رفتار غیر خطی در محل مفصل تیرها شدیدتر است.

۲- با افزایش ضخامت جداره لوله فولادی از ۴/۵ میلیمتر به ۸/۵ میلیمتر، در ستون‌های لوله‌ای پر شده با بتن با $M_{pc} / M_{pb} < 0.6$ لنگر نهایی و شکل پذیری اتصال به ترتیب ۳۴/۴٪ و ۳۵/۷٪ افزایش می‌یابد اما در محدوده $M_{pc} / M_{pb} > 0.6$ ، عملاً ضخامت لوله تاثیر چندانی بر لنگر نهایی و شکل پذیری اتصال ندارد.

۳- در ستون‌های لوله‌ای پر شده با بتن با $M_{pc} / M_{pb} > 0.6$ ، با افزایش ضخامت بال تیر فولادی لنگر نهایی اتصال افزایش می‌یابد، به نحوی که وقتی ضخامت از ۱۲/۵ میلیمتر به ۱۶/۵ میلیمتر، تغییر می‌کند، ظرفیت نهایی و شکل پذیری اتصال به ترتیب حدود ۲۱٪ و ۶٪ افزایش پیدا می‌کند. لازم به ذکر است در محدوده $M_{pc} / M_{pb} < 0.6$ ، عملاً ضخامت بال تیر تاثیر چندانی بر لنگر نهایی و شکل پذیری اتصال ندارد.

۴- در ستون‌های لوله‌ای پر شده با بتن با $M_{pc} / M_{pb} > 0.6$ ، با افزایش ضخامت جان تیر فولادی، لنگر نهایی اتصال افزایش می‌یابد، به نحوی که وقتی ضخامت از ۷ میلیمتر به ۱۱ میلیمتر، تغییر می‌کند، ظرفیت نهایی و شکل پذیری اتصال به ترتیب حدود ۲۰٪ و ۵٪ افزایش پیدا می‌کند. لازم به ذکر است در محدوده $M_{pc} / M_{pb} < 0.6$ ، عملاً ضخامت جان تیر تاثیر چندانی بر لنگر نهایی و شکل پذیری اتصال ندارد.

۵- در اتصال تیر فولادی پیوسته میان‌گذر و ستون CFT، مکانیزم مقاوم برای تغییر شکل برشی ناحیه چشمه اتصال شامل مقاومت درون صفحه‌ای جان تیر، جداره لوله دایره‌ای و همچنین هسته بتنی می‌باشد. در نمونه‌های مورد بررسی مشاهده شد که جان تیر در محدوده چشمه اتصال، الاستیک باقی ماند و فقط در انتهای بارگذاری اندکی وارد محدوده غیرخطی شد. از این مشاهده می‌توان نتیجه گرفت که جان تیر در اتصال مورد بررسی در تامین صلبیت برشی چشمه اتصال و جلوگیری از تسلیم برشی آن به ویژه در تغییرشکل‌های بزرگ، نقش عمده‌ای دارد.

۶- در ستون‌های لوله‌ای پر شده با بتن درگیری بین بتن و فولاد و اصطکاک بین آنها منجر به فعال شدن دستک قطری بتنی در ناحیه چشمه اتصال می‌شود. در محدوده $M_{pc} / M_{pb} > 0.6$ مانند نمونه‌های CFT13 و CFT20 در دررفت ۸ درصد تنش فشاری دستک قطری بتن به ترتیب حدود ۱۳ و ۱۰ مگاپاسکال می‌باشد. این تراز از تنش متناظر با عملکرد ارتجاعی دستک قطری بتن است و نشان می‌دهد که با وجود تغییر شکل زیاد قاب خمشی، بتن در چشمه اتصال از تنش‌های خرد کننده به دور مانده و باربری ارتجاعی خود را حفظ نموده است.

۷- باربری خمشی اتصال، رابطه معکوس با تغییرات بار محوری وارد بر ستون دارد. به نحوی که در ستون‌های لوله‌ای پر شده با بتن با $M_{pc} / M_{pb} < 0.6$ ، افت ناگهانی مقاومت خمشی بر اثر کمانش موضعی در نمودار لنگر خمشی - دررفت طبقه با شدت بیشتری نسبت به سایر حالات رخ می‌دهد.

مراجع:

- [1] Morino, Sh., Uchikoshi, M., Yamaguchi, I. (2001). Concrete-filled steel tube column system-its advantages. *Journal of steel structures*, Vol. 1, pp. 33-44.
- [2] Ying, W. (2006). *Development of new CFT columns-CFT beam Frame Structure using Self-compacting Concrete*. Kochi University of Technology, Japan.
- [3] Kurobane, Y., Packer, JA., Wardenier, J., Yeomans, N. (2004). *Design guide for structural hollow section column connections*. CIDECT Design Guide. No. 9, Koln Germany: CIDECT and Verlag TUV Rheinland GmbH.
- [4] Elremaily, A., Azizinamini, A. (2001). Experimental behavior of steel beam to CFT column connections. *Journal of constructional steel research*, Vol. 57, No. 10, pp. 1099-1119.
- [5] Azizinamini, A., Schneider, SP. (2004). Moment Connections to Circular Concrete-Filled Steel Tube Columns. *Journal of Structural engineering*, Vol. 130, No. 2, pp. 213-224.
- [6] Wang, JF., Hanb, LH., Uy, b. (2009). Behavior of flush end plate joints to concrete-filled steel tubular columns. *Journal of constructional steel research*, Vol. 65, pp. 925-939.
- [7] Sheet, L., Gunasekaran, U., MacRae, G. (2013). Experimental investigation of CFT column to steel beam connections under cyclic loading. *Journal of constructional steel research*, Vol. 86, pp. 167-182.
- [8] Arabnejad Khanouki, M.M., Ramli Sulong, N.H., Shariati, M., Tahir, M.M. (2016). Investigation of through beam connection to concrete filled circular steel tube (CFCST) column. *Journal of constructional steel research*, Vol. 121, pp. 144-162.
- [9] Mirghaderi, S.R., Bakhshayesh Eghbali, N., Ahmadi, M.M., (2016). Moment-connection between continuous steel beams and reinforced concrete column under cyclic loading. *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 118, pp. 105-119.
- [10] Zeinizadeh Jeddi, M., Ramli Sulong, N.H., Arabnejad Khanouki, M.M. (2017). Seismic performance of a new through rib stiffener beam connection to concrete-filled steel tubular columns: An experimental study. *Journal of Engineering Structures*, Vol. 131, pp. 477-491.
- [11] Ahmadi, M.M., Mirghaderi, R. (2019). Experimental studies on through-plate moment connection for beam to HSS/CFT column, *Journal of constructional steel research*, Vol. 161, pp. 154-170.
- [12] Zhou, X., Liu, J., Cheng, G., Gan, D., Chen, Y. (2020). New connection system for circular tubed reinforced concrete columns and steel beams. *Journal of Engineering Structures*, Vol. 214, pp. 235-249.
- [13] ABAQUS user's manual, revision 2017, Swanson Analysis Systems Inc.
- [14] ACI-318. (2008). *Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary*.
- [15] ENV1992-1-1. (1992) *Eurocode-2: Design of Concrete Structures, Part 1: General Rules and Rules for Building*. CEN.
- [16] Gupta, PK., Sarda, SM., Kumar, MS. (2007). Experimental and computational study of concrete filled steel tubular columns under axial loads. *Journal of constructional steel research*, Vol. 63, pp. 182-193.
- [17] Ellobodya, E., Youngb, B., Lam, D. (2006). Behavior of normal and high strength concrete-filled compact steel tube circular stub columns. *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 62, pp. 706-715.
- [18] Kmiecik, P., Kamirminski, M. (2011). Modeling of reinforced concrete structures and composite structures with concrete strength degradation taken into consideration. *Archives of civil and mechanical engineering*, Vol. XI, No.3.
- [19] Nie, J., Qin, K., Cai, C.S. (2008). Seismic behavior of connections composed of CFSSTCs and steel-concrete composite beams-finite element analysis. *Journal of constructional steel research*, Vol. 64, pp. 680-688.
- [20] ANSI/AISC 360-16. (2016). *Seismic provisions for structural steel buildings*. Chicago, IL: American Institute of Steel Construction.
- [21] Park, R., (1989). Evaluation of ductility of structures and structural assemblages from laboratory testing. *Journal of the New Zealand national society for earthquake engineering*, Vol. 22, No. 3, pp. 155-166.