

# ارزیابی رفتار غیر خطی اتصال تیر فولادی پیوسته میان گذر و ستون CFT دایره‌ای تحت بارگذاری چرخه‌ای

احمد سبزه ئی<sup>۱</sup>، سهیل مجید زمانی<sup>۲\*</sup>

۱. دانشجوی دکتری، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی

۲. استادیار، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، تهران

majidzamani@bhrc.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۸/۰۵

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۱/۲۰

## چکیده

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. برای تشویق طراحان و سازندگان به استفاده از ستون‌های CFT و بهره‌گیری از مزایای آنها، رفع اشکالات اتصالات پیشین و پاسخگویی به نیازهای مطرح شده، باید اتصالاتی مطمئن و اجرایی توسعه یابند. از بررسی پژوهش‌های پیشین چنین برمی‌آید که اتصال تیر فولادی میان‌گذر و ستون CFT 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 بی-شمار پارامترهای هندسی و ابعاد اتصال، انتخاب مناسبی با توجه به ویژگی‌های رفتاری اتصال ناشی از این پارامترها صورت گیرد.

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 و ضخامت بال و جان تیر تحت بارگذاری چرخه‌ای مورد بررسی قرار گرفته است. در برخی نمونه‌ها شرایط فشرده‌گی لرزه‌ای مقطع تیر و مقطع ستون اندکی از حدود مجاز آئین‌نامه خارج شده بود. با این حال، تمامی نمونه‌ها رفتار چرخه‌ای پایدار و تحمل کمترین دررفت طبقه‌ای ۰/۰۴ رادیان را طبق آیین‌نامه AISC به عنوان یک اتصال خمشی ویژه ارضا نمودند و چرخه هیستریزس حجیم با قابلیت اتلاف انرژی قابل توجه را به نمایش گذاشتند. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که در نمونه‌های با ستون مشابه در صورت افزایش ضخامت بال یا جان تیر، انرژی مستهلک شده در چرخه‌های بارگذاری افزایش می‌یابد ولی مقادیر کمتری برای میرایی چرخه‌ای به دست می‌آید. در نمونه‌های با تیر یکسان در صورت افزایش ابعاد ستون، میزان جذب انرژی و میرایی چرخه‌ای افزایش می‌یابند.

**واژگان کلیدی:** رفتار غیرخطی، لوله فولادی، چرخه هیستریزس، اتلاف انرژی، الزامات لرزه‌ای.

مقاطع، ترکیب بتن و فولاد با هدف به کارگیری توامان مزیت های هریک از این مصالح است. برآیند این ترکیب منجر به ایجاد سازه‌ای با ویژگی‌های برتر نسبت به سازه‌های مرسوم بتنی و فولادی می‌شود. از مزایای بتن می‌توان به سختی بالا و مقاومت مناسب در برابر آتش‌سوزی اشاره کرد و فولاد نیز دارای مقاومت و شکل‌پذیری بالا است. پرکردن مقطع فولادی

## ۱- مقدمه

مقاطع فولادی پر شده با بتن<sup>۱</sup>، گروهی از مقاطع مختلط هستند که از عملکرد مشترک فولاد در پیرامون و بتن در بخش درونی مقطع برای باربری بهره می‌گیرند. ایده اصلی پیدایش این

1. Concrete Filled Tube (CFT)

نمونه‌های دو سوم مقیاس شناسایی شدند. تحقیقات نشان دادند که در اتصال تیر میانگذر، مدهای خرابی در سه حالت اتفاق می‌افتد: ۱- خرابی ستون ۲- خرابی تیر ۳- خرابی چشمه اتصال [2].

سال ۲۰۱۵ عزیزاده و همکاران در پژوهشی به عنوان بررسی تجربی عملکرد اتصالات RCS<sup>۲</sup> با استفاده از بتن خود تثبیت به بررسی رفتار چرخه‌ای این اتصالات پرداختند. ایشان دو اتصال داخلی RCS را در مقیاس  $\frac{3}{4}$  بر مبنای مفهوم "ستون و اتصال قوی و تیر ضعیف" طراحی نمودند و در آزمایشگاه مورد بررسی قرار دادند. آرایش اتصال اول بر مبنای آیین نامه ASCE 1994 و اتصال دوم بر مبنای آرایش پیشنهادی ساخته شده بود. هدف، بررسی تاثیر اجزای اتصال روی ظرفیت و عملکرد آن بود. در اتصال اول در محل رسیدن تیر به ستون از تسمه‌های فولادی دور ستون<sup>۳</sup> هم عرض با بال تیر استفاده شده بود ولی در اتصال پیشنهادی دوم عرض ورق‌های اتکایی جانبی از هر طرف تیر صد میلی‌متر پهن‌تر بود. از دیگر تفاوت‌های این دو اتصال استفاده از ورق‌های فولادی دور ستون بر زیر و روی بال‌های تیر در محل رسیدن تیر به ستون است. نتایج حاصل شده از این مطالعه نشان می‌دهد که هر دو اتصال رفتار شکل‌پذیر دارند و قادر به حفظ مقاومت خود در ازای یک کاهش جزئی در سختی هستند. این سیستم دارای جذب انرژی خوب است و می‌توان از آن به عنوان اتصال برای قاب‌های خمشی فولادی و بتنی استفاده کرد. [3].

در سال ۲۰۱۶ میرقادری و همکاران، اتصال خمشی برای تیرهای فولادی عبوری از دو طرف ستون بتن آرمه را مورد بررسی قرار دادند [4]. به دلیل عبور تیرهای فولادی از بیرون ستون، ستون در ناحیه اتصال بصورت پیوسته و ممتد است و امکان آرایش مناسب آرماتورها و دسترسی پیوسته در داخل ستون برای بتن ریزی فراهم می‌شود. همچنین 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

با بتن مزیت‌هایی دارد از جمله استفاده بهینه از مقاومت فولاد و بتن، تاخیر در کماتش موضعی بخش فولادی ستون، افزایش مقاومت بتن به دلیل محصورشدگی و در پایان کاربرد جدار فولادی پیرامونی به عنوان قالب دائمی بتن و همچنین برای تحمل بارهای ضمن اجرا. در نتیجه علاوه بر بهره‌گیری از مزیت‌های بتن و فولاد در این ستون‌ها، سرعت اجرا نیز افزایش خواهد یافت [1].

در سازه‌های قاب خمشی استفاده از اتصالات صلب تیر و ستون برای ایجاد سختی ارتجاعی لازم در برابر بارهای جانبی اجتناب ناپذیر است. در محدوده رفتار غیر ارتجاعی نیز اتصالات تیر و ستون نقش حیاتی در بقای سازه در برابر زلزله-های مخرب ایفا می‌کنند. اتصالات باید به گونه‌ای طراحی شود تا اطمینان حاصل شود که مفصل پلاستیک در محل از پیش تعیین شده ایجاد شده و به عملکرد سایر اجزای سازه‌ای لطمه-ای وارد نمی‌شود. با وجود مزایای مقاطع فولادی پر شده با بتن، چگونگی اتصال تیر و ستون از موارد پیچیدگی این سازه-ها محسوب می‌شود.

همان‌گونه که در ادامه خواهد آمد، اگرچه طیف گسترده‌ای از جزئیات مختلف برای اتصال خمشی لرزه‌ای تیر به ستون پر شده با بتن مطرح شده، ولی تاکنون هیچ جزئیات متداولی در آیین‌نامه اتصالات از پیش تایید شده آمریکا<sup>۱</sup> اعلام نشده است. عدم وجود اتصال مورد استفاده عمومی و متداول از یک سو و فقدان شیوه‌نامه‌ها و دستورالعمل‌های مدون طراحی از سوی دیگر باعث شده پژوهشگران همچنان به دنبال اتصالات با کیفیت مطلوب‌تر، اقتصادی‌تر و با قابلیت جزئیات‌بندی راحت‌تر برای کاربرد در قاب خمشی فولادی باشند.

## ۲- تحقیقات گذشته

در سال ۲۰۰۱ مطالعاتی توسط عزیززی و الرمیلی به منظور درک رفتار اتصالات تیر میانگذر صورت گرفت. شش گونه اتصال تیر به ستون CFT با بار محوری ثابت و تحت بار جانبی سیکلی مورد آزمایش قرار گرفتند. مدهای خرابی محتمل برای اتصال تیر میانگذر از طریق انجام آزمایش روی

2. Reinforced Concrete column Steel beam  
3. Additional Band Plate

1. AISC-358

اجزای اتصال رخ نداد. براساس نتایج آزمایش‌ها، 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 ارضا نمود [6].

## ۲- هدف از انجام پژوهش حاضر

از نظر حفظ پیوستگی اتصال و سهولت انتقال نیرو بدون واسطه، عبور مقطع کامل تیر به صورت پیوسته از میان ستون CFT بهترین گزینه است. مراحل مهم ساخت این اتصال شامل برش جداره ستون لوله فولادی اندکی بزرگتر از اندازه تیر، عبور تیر از لوله فولادی، تثبیت تیر در جای خود به کمک جوش اصلی یا کمکی و سپس بتن ریزی داخل لوله با بتن خود متراکم شونده است. در صورت رعایت تناسب اندازه تیر و لوله فولادی و دقت کافی در برش جداره لوله، مشکل خاصی در ساخت اتصال وجود ندارد. البته بهترین تکنیک، ستون درختی (column tree) است که قطعات کوتاه تیر در کارخانه به لوله متصل شده و سپس در کارگاه پس از استقرار ستون، قسمت میانی تیر با اتصال پیچی به تیرهای کوتاه (stub) روی ستون پیوند داده می‌شود.

در مورد این چگونگی اتصال و به ویژه رفتار چرخه‌ای آن تاکنون مطالعات منسجمی صورت نگرفته است. به عنوان گام اول، در پژوهش حاضر تحلیل عددی به کمک نرم‌افزار اجزا محدود آباکوس روی ۱۴ نمونه انجام شده است. بررسی رفتار چرخه‌ای اتصال تیر فولادی پیوسته میان‌گذر و ستون CFT دایره‌ای با تغییر در پارامترهای قطر لوله فولادی، ضخامت لوله فولادی، ضخامت بال و ضخامت جان تیر هدف این پژوهش است.

## ۴- درستی آزمایشی و چگونگی مدل سازی نمونه-های عددی

به منظور اطمینان از درستی روش تحلیل عددی، مدل اجزاء محدود در این مطالعه با توجه به آزمایش واقعی بارگذاری مونوتونیک اتصال مدل NSF5 که توسط الرمیلی و عزیزنمینی در سال ۲۰۰۱ انجام شده بود، درستی آزمایشی شد [2]. این نمونه که در شکل (۱) نشان داده شده است، شامل تیری

ارزیابی قرار گرفت و پارامترهای مهم از جمله شروع و گسترش مفصل پلاستیک در تیرها، کرنش در اجزای فولادی چشمه اتصال، کرنش در بتن در سطح تماس با اجزای فولادی و تشکیل دستک قطری در هسته بتنی بررسی شد. نتیجه گرفته شد که اتصال دارای عملکرد لرزه‌ای مناسب با رفتار چرخه‌ای پایدار و بدون لاغرشدگی است. در نمونه مورد بررسی، مفصل پلاستیک در هر چهار تیر در فاصله کمی از بر ستون تشکیل شدند و هیچ آسیبی در ورق‌های پوششی ناحیه اتصال اتفاق نیفتاد [4].

در سال ۲۰۱۷ عرب‌نژاد و همکاران، اتصال خمشی لرزه‌ای تیر فولادی به ستون‌های دایره‌ای پر شده با بتن با روش ورق میان‌گذر عبوری از ستون را مورد بررسی آزمایشگاهی و عددی قرار دادند. چهار اتصال مطابق پروتکل آیین‌نامه آمریکا تحت بارگذاری سیکلی قرار گرفتند. تاثیر ورق میان‌گذر و مقطع تیر بر رفتار شکست اتصال، عملکرد هیستریزس، ظرفیت دورانی، استهلاک انرژی و شکل پذیری اتصال در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفت. به دلیل عبور ورق میان‌گذر از میان وجه ستون، این اتصال قادر است که پیوند صلب میان تیر I شکل و ستون قوطی شکل را فراهم کند. اتصال پیشنهادی با داشتن ظرفیت تغییرشکل بالا و داشتن حلقه‌های هیستریزس چاق و عدم وقوع لاغرشدگی از قابلیت اتلاف انرژی بالایی در هنگام چرخه‌های بارگذاری برخوردار است [5].

در سال ۲۰۱۹ مطالعاتی توسط میرقادری و احمدی صورت گرفت که به بررسی اتصالات جدید خمشی لرزه‌ای برای تیر فولادی به ستون‌های مربعی، دایره‌ای و لوزی شکل توخالی و پر شده با بتن با روش ورق میان‌گذر پرداخت. اتصال به ستون‌های مربعی و دایره‌ای از نوع جوشی و اتصال به ستون لوزی به صورت پیچی بودند. برای ارزیابی هر نمونه، سه اتصال میانی با مقیاس کامل در نظر گرفته شد که دو نمونه از آنها ستون‌های پر شده با بتن و یک نمونه ستون توخالی بودند. نمونه‌ها به طور همزمان تحت بارگذاری چرخه‌ای و بار محوری معادل ده درصد ظرفیت محوری ستون قرار گرفتند. در هر سه دسته اتصالات تست شده، مفصل پلاستیک در تیرها و دور از ستون‌ها ایجاد شد و هیچ نوع آسیبی در ناحیه چشمه اتصال و

شکل ۲. مدل سازی اتصال NSF5

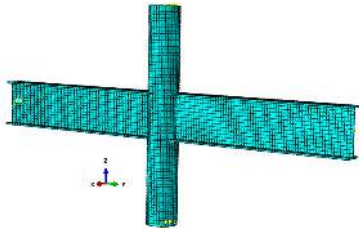


Fig. 2. Specimen NSF5 FE model

شکل ۳. بزرگنمایی ناحیه اتصال بال و جان

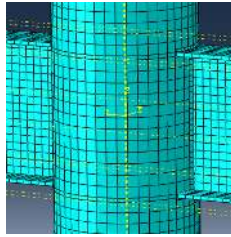


Fig. 3. Magnified view of connection

در این مطالعه، مدل سازی بتن در نرم افزار آباکوس با استفاده از مدل پلاستیسیته بتن آسیب دیده انجام شده است. این مدل از ترکیب کشش ایزوتروپیک و فشار پلاستیک برای نمایش رفتار غیرخطی بتن استفاده می کند. همچنین در این مدل، کاهش سختی با در نظر گرفتن کرنش پلاستیک در کشش و فشار تعریف می شود.

شکل ۴. منحنی رفتار تنش-کرنش بتن

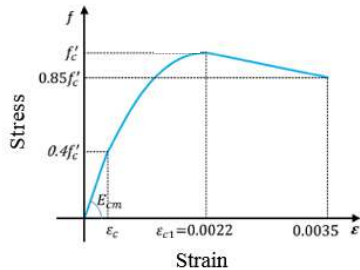


Fig. 4. Assumed concrete stress-strain curve

جدول ۲. پارامترهای مدل خسارت پلاستیک بتن [9]

40	Dilation Angle
0.1	Eccentricity
1.16	$f_{b0}/f_{c0}$
0.666	K
0.001	Viscosity Parameter

Table 2. Concrete damage model parameters

بر اساس شرایط بارگذاری در آزمایش، بارگذاری نمونه ها در دو مرحله انجام گرفت. ابتدا بار محوری به بالای ستون وارد

به عمق ۴۵۰ میلی متر با ضخامت جان ۷/۶ میلی متر و عرض بال ۱۵۲ میلی متر و ضخامت بال ۱۰/۸ میلی متر است. همچنین ستون لوله ای با قطر خارجی ۴۰۶ میلی متر و ضخامت ۶/۴ میلی متر بکار رفته است.

مدل نمونه NSF5 در شکل (۲) شامل اتصال میانی از قاب فولادی پر شده با بتن و نیز نصف ارتفاع ستون در طبقات بالا و پایین و دو نیم دهانه تیر، متناظر با نقطه عطف تیر و ستون تحت بار جانبی، است. مدل شامل ستون فولادی دایروی تو-خالی، تیر فولادی و بتن داخل جداره ی فولادی است. تکیه گاه های دو سر ستون، مفصلی هستند [7]. همچنین برای جلوگیری از حرکت خارج از صفحه ی اتصال، تیر در دو نقطه در مقابل حرکت خارج از صفحه مهار شده است.

در این مطالعه برای فولاد مدول الاستیسیته ۲۰۰ گیگاپاسکال و ضریب پواسون ۰/۳ فرض شد. نمودار رفتار مصالح فولادی بصورت مدل الاستوپلاستیک دو خطی در نظر گرفته شد. تنش تسلیم و تنش نهایی این مصالح بر اساس مرجع درستی آزمایی [2] مطابق مقادیر ارائه شده در جدول (۱) است.

جدول ۱. مقاومت تسلیم و مقاومت نهایی اجزای فولادی [2]

$F_u$ (MPa)	$F_y$ (MPa)	Member
554	443	Steel tube
500	358	Beam flange
494	319	Beam web

Table 1. Yield and ultimate strengths of steel

برای محاسبه مدول الاستیسیته بتن بر اساس رابطه پیشنهادی ACI318 عمل شده است:  $E_c = 4700\sqrt{f_c}$  در این رابطه  $E_c$  مدول الاستیسیته بتن و  $f_c$  مقاومت فشاری بتن هر دو بر حسب مگاپاسکال است که در این نمونه برابر ۳۴/۳ مگاپاسکال در نظر گرفته شده بود [8]

شکل ۱. جزئیات اتصال NSF5 [2]

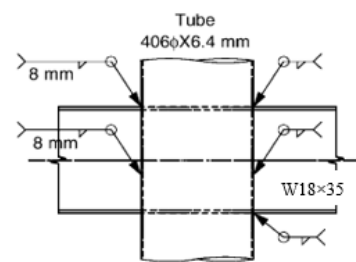


Fig. 1. Specimen NSF5 details

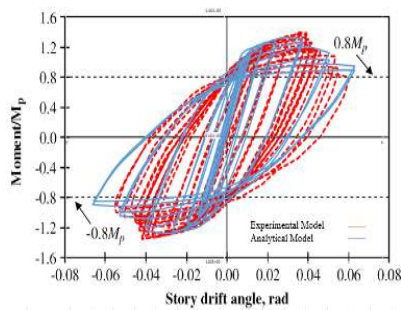


Fig. 5. Numerical analysis verified with experiment

شکل ۶ توزیع تنش فون میسز نمونه NSF5 در پایان تحلیل

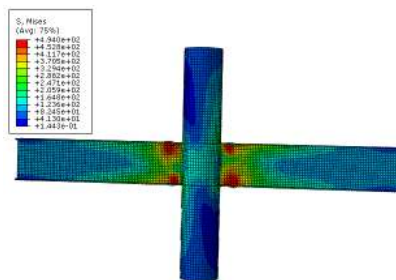


Fig. 6. Final Mises stresses in NSF5 specimen

شکل ۷. درستی آزمایشی تحلیل عددی در مقایسه با نمودار نیرو-دریفت

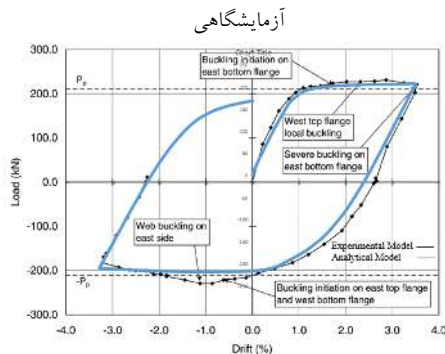


Fig. 7. Numerical analysis verified with experiment

## ۵- مشخصات مدل‌ها

در این بخش با استفاده از روش عددی پیش گفته، مطالعه بر روی پارامترهای مختلف اتصال تیر فولادی پیوسته میان‌گذر و ستون CFT لوله‌ای انجام می‌گردد. مشخصات نمونه‌ها در جدول (۳) ارائه شده است. کلاً ۱۴ نمونه در این رشته مطالعات مورد بررسی قرار گرفته‌اند. نسبت  $M_{pc}/M_{pb}$  در این نمونه‌ها مابین  $0.78$  تا  $1/95$  متغیر است. در جدول (۳)،  $D$  قطر لوله فولادی،  $t$  ضخامت لوله فولادی،  $b$  عرض بال تیر فولادی،  $t_f$

شد و سپس دوران معادل ۶ درصد به دو سر تیر به صورت کوپل مشابه بارگذاری تجربی نمونه‌ها اعمال شد. فاصله نقطه جابه‌جایی اعمالی از مرکز اتصال،  $2057/5$  میلی‌متر بوده است. برای انجام مطالعه تحلیلی بر روی نمونه NSF5 [2] از روش غیرخطی Static General با الگوریتم همگرایی نیوتن - رافسون در نرم‌افزار آباکوس استفاده شده است.

در محل‌هایی که در هنگام تحلیل غیرخطی بین دو المان جدا از هم برخوردی صورت می‌گیرد باید ویژگی‌های مربوط به برخورد در روی دو سطح تعریف شود. در این مطالعه، با استفاده از ماژول Interaction، برای سطح تماس تیر فولادی و بتن در ستون‌های کامپوزیت از رفتار مماسی در حالت پانل‌تی با ضریب اصطکاک  $0.25$  بین دو سطح استفاده شده است. سطح تماس در راستای عمود از نوع سطح تماس سخت<sup>۱</sup> 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 [10]. برای تعریف سطح تماس جوش با فولاد، اتصال بصورت کامل فرض شده و از گزینه Tie استفاده گردیده است که جابه‌جایی واقع در دو سطح مختلف را در محل تماس دو سطح به یکدیگر وابسته می‌کند [11].

برای مش‌بندی هسته بتنی از المان توپر شش‌وجهی هشت‌گانه ای سه بعدی C3D8R استفاده شده است. حرف R بیانگر استفاده از انتگرال کاهش یافته است [7]. 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. نمودار لنگر خمشی-دریفت طبقه‌ای حاصل از آزمایشگاه و تحلیل اجزا محدود در شکل (۵) و همچنین نمودار نیرو-دریفت طبقه‌ای تا دریفت  $3/5$  درصد در شکل (۷) نشان داده شده است. مشخص است که دو نمونه رفتار تقریباً مشابهی دارند و درستی فرضیات و روش تحلیل عددی قابل تأیید است.

شکل ۵. درستی آزمایشی تحلیل عددی در مقایسه با نمودار لنگر-دوران آزمایشگاهی

1. Hard contact

در این مطالعه، بارگذاری نمونه‌ها در دو مرحله انجام می‌شود. ابتدا بار محوری به راس ستون وارد شده و سپس بارگذاری جانبی چرخه‌ای رفت و برگشتی با کنترل جابجایی مطابق جدول (۴) بر اساس پروتکل بارگذاری 341-16 ANSI/AISC [13]، در بالای ستون اعمال می‌شود. فاصله نقطه جابه‌جایی اعمالی از مرکز اتصال، ۱۲۱۹ میلی‌متر است.

ضخامت بال تیر فولادی،  $h$  ارتفاع جان تیر فولادی،  $t_w$  ضخامت جان تیر فولادی،  $P$  میزان نیروی محوری اعمالی بر اساس ظرفیت محوری ستون بدون لنگر (برحسب درصد)،  $M_{pb}$  لنگر پلاستیک تیر ( $M_{pb}$ )، از رابطه  $F_y Z_b$  محاسبه می‌شود،  $M_{pc}$  لنگر پلاستیک ستون یعنی  $(F_{yc} - \frac{P_{nc}}{A_g}) \sum Z_c$ ، و  $M_{pc}/M_{pb}$  نسبت ظرفیت خمشی ستون به ظرفیت خمشی تیر می‌باشد [12].

جدول ۳. ابعاد و جزئیات اتصالات پیوسته میان‌گذر در ستون‌های CFT لوله‌ای شکل در این مقاله

$M_{pc}/M_{pb}$	$M_{pc}$ (kN.m)	$M_{pb}$ (kN.m)	P (%)	$t_w$ (mm)	$h$ (mm)	$t_f$ (mm)	$b$ (mm)	$t$ (mm)	D (mm)	Specimen
0.78	399	509	20%	9	428	14.5	190	4.5	405	CFT1
0.98	497	509	20%	9	428	14.5	190	6.5	405	CFT2
1.16	592	509	20%	9	428	14.5	190	8.5	405	CFT3
1.09	497	456	20%	9	428	12.5	190	6.5	405	CFT4
0.89	497	561	20%	9	428	16.5	190	6.5	405	CFT5
1.04	497	477	20%	7	428	14.5	190	6.5	405	CFT6
0.93	502	540	20%	11	428	14.5	190	6.5	405	CFT7
1.35	686	509	20%	9	428	14.5	190	4.5	505	CFT8
1.65	841	509	20%	9	428	14.5	190	6.5	505	CFT9
1.95	993	509	20%	9	428	14.5	190	8.5	505	CFT10
1.84	841	456	20%	9	428	12.5	190	6.5	505	CFT11
1.50	841	561	20%	9	428	16.5	190	6.5	505	CFT12
1.76	841	477	20%	7	428	14.5	190	6.5	505	CFT13
1.56	841	540	20%	11	428	14.5	190	6.5	505	CFT14

Table 3. Geometries and strengths of beam and column in specimens studied in this paper

شکل ۸. شمای عمومی یک نمونه اتصال مورد بحث

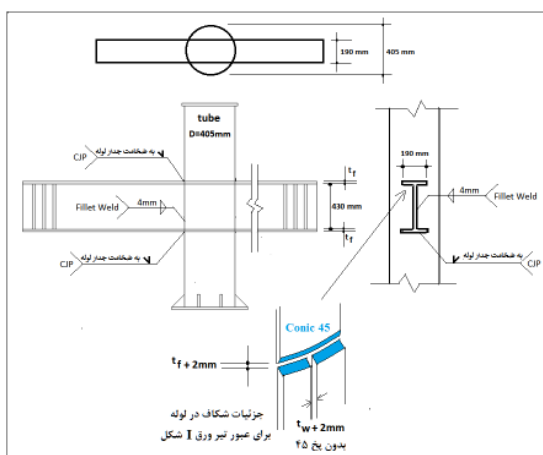


Fig. 8. Typical configuration of specimens in this paper

شکل‌های (۸ و ۹) شمای عمومی نمونه‌ها و مبنای بارگذاری و تغییر شکل نمونه‌ها به عنوان جزئی از قاب خمشی را نشان می‌دهند.

شکل ۱۱. نمودار هیستریزیس لنگر خمشی اتصال در برابر دریفت طبقه

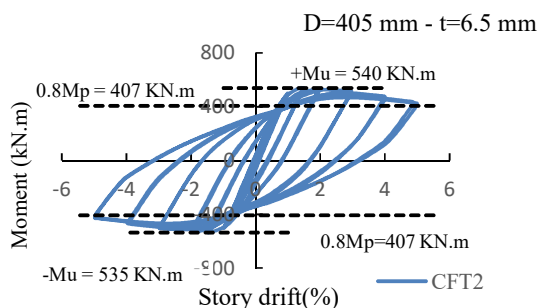


Fig. 11. Connection moment-story drift hysteresis curves D=405 mm - t= 6.5 mm

شکل ۱۲. نمودار هیستریزیس لنگر خمشی اتصال در برابر دریفت طبقه

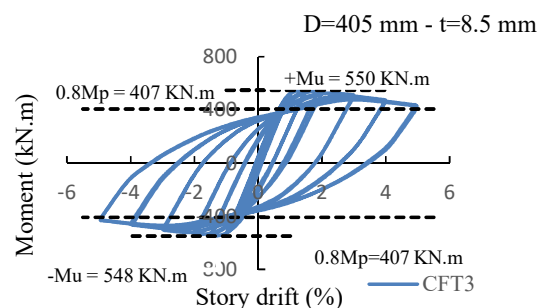


Fig. 12. Connection moment-story drift hysteresis curves D=405 mm - t= 8.5 mm

شکل ۱۳. نمودار هیستریزیس لنگر خمشی اتصال در برابر دریفت طبقه

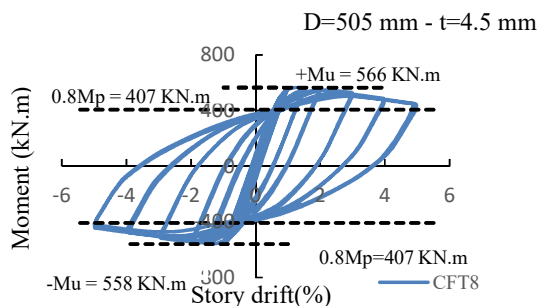


Fig. 13. Connection moment-story drift hysteresis curves D=505 mm - t= 4.5 mm

شکل ۹. هندسه مدل و شرایط مرزی نمونه

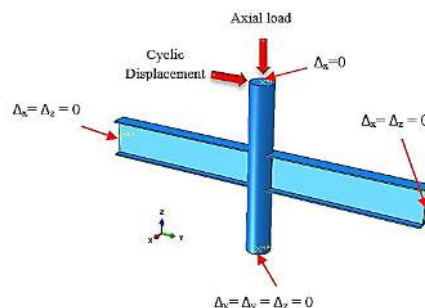


Fig. 9. Geometry and boundary conditions of model

جدول ۴. الگوی بارگذاری چرخه‌ای کنترل کننده زاویه دریفت

Inter story drift ratio	Cycle repetition	Loading steps
0.375	3	1
0.5	3	2
0.75	3	3
1	2	4
1.5	2	5
2	2	6
3	2	7
4	2	8
5	2	9

Table 4. Cyclic loading pattern based on drift ratio

### ۶- تغییرات ضخامت لوله فولادی ستون

در این بخش به بررسی تاثیر تغییرات ضخامت لوله فولادی در اتصال نشان داده شده در شکل (۹) تحت بارگذاری چرخه‌ای پرداخته می‌شود. برای این امر لوله فولادی ستون با ضخامت ۴/۵، ۶/۵ و ۸/۵ میلی‌متر مورد بررسی قرار می‌گیرد.

شکل ۱۰. نمودار هیستریزیس لنگر خمشی اتصال در برابر دریفت طبقه

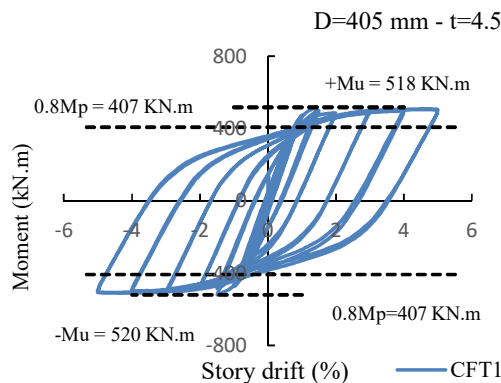


Fig. 10. Connection moment-story drift hysteresis curves D=405 mm - t= 4.5 mm

شکل ۱۴. نمودار هیستریزیس لنگر خمشی اتصال در برابر دریفت طبقه  
D=505 mm - t=6.5 mm

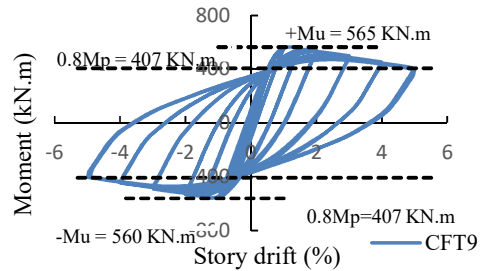


Fig. 14. Connection moment-story drift hysteresis curves D=505 mm - t= 6.5 mm

شکل ۱۵. نمودار هیستریزیس لنگر خمشی اتصال در برابر دریفت طبقه  
D=505 mm - t=8.5 mm

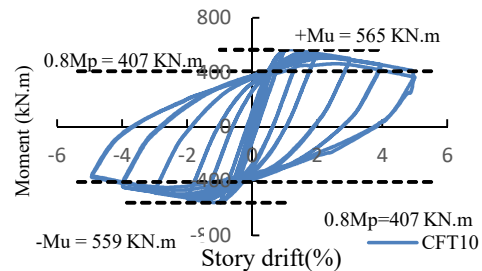


Fig. 15. Connection moment-story drift hysteresis curves D=505 mm - t= 8.5 mm

شکل ۱۶. توزیع تنش فون میسز در تیر و جداره لوله فولادی نمونه  
CFT1 در پایان تحلیل

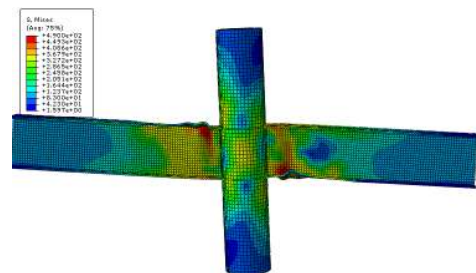


Fig. 16. Final Mises stresses in steel sections of specimen CFT1

شکل ۱۷. تشکیل مفصل پلاستیک در تیر نمونه CFT1 در پایان تحلیل

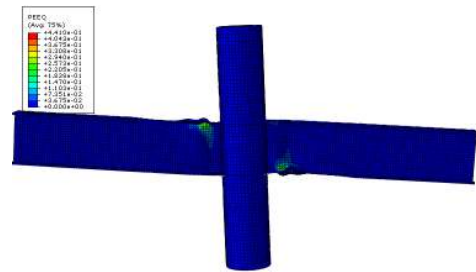


Fig. 17. Equivalent plastic strains associated with plastic hinge in specimen CFT1

شکل ۱۸. توزیع تنش فون میسز در جان تیر فولادی نمونه CFT1 در پایان تحلیل

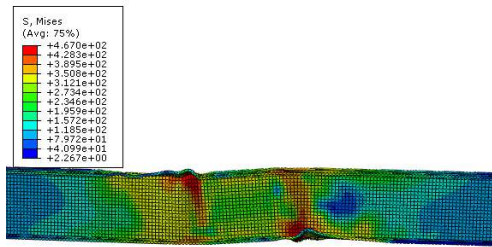


Fig. 18. Final Mises stresses in beam web of specimen CFT1

شکل ۱۹. توزیع کرنش برشی در جان تیر فولادی نمونه CFT1 در پایان تحلیل

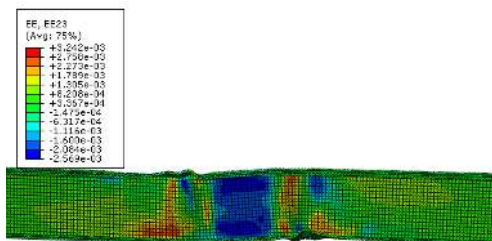


Fig. 19. Final Shear strains in beam web of specimen CFT1

طبق الزام آیین‌نامه ANSI/AISC 341-16 ظرفیت دوران متناظر با تغییر مکان جانبی نسبی در قاب های خمشی متوسط و ویژه به ترتیب برابر با ۰/۰۲ و ۰/۰۴ رادیان بوده و نباید مقاومت اتصال در حد دورانی مذکور کمتر از ۸۰ درصد لنگر پلاستیک تیر باشد [13]. همچنین مطابق با لزوم مبحث دهم و تذکر بخش تفسیر آیین‌نامه ANSI/AISC 341-16 لرزه‌ای برای قاب‌های خمشی ویژه باید حدود ۰/۰۳ رادیان از دوران اتصال در ناحیه فرا ارتجاعی قرار داشته باشد. با توجه به اشکال (۱۰ تا ۱۵) مشاهده می‌شود که تمام نمونه‌ها شرایط لازم برای استفاده در قاب خمشی ویژه را دارند. مطابق شکل (۱۶) و (۱۷) تغییر شکل‌های غیرالاستیک و ماندگار در تیرها متمرکز شده‌اند و کمانش موضعی بال و جان به همراه تمرکز رفتار غیرخطی در محل مفصل پلاستیک تیرها مشاهده می‌شود. در همین حال، ستون‌ها و ناحیه چشمه اتصال در طول بارگذاری به صورت الاستیک رفتار کردند. مطابق شکل (۱۸) و (۱۹) جان تیر در ناحیه چشمه اتصال به صورت الاستیک رفتار کرده و فقط در انتهای بارگذاری، به مقدار بسیار جزئی وارد



در نمونه‌های CFT8، CFT9 و CFT10 با قطر ستون ۵۰۵ میلی‌متر، مطابق شکل (۱۳ تا ۱۵)، لنگر نهایی اتصال نمونه‌ها به ترتیب ۵۶۶، ۵۶۶ و ۵۶۵ کیلونیوتن‌متر است که در زاویه تغییر شکل نسبی ۰/۰۱ تا ۰/۰۲ رادیان حاصل می‌شوند. در این نمونه‌ها که نسبت لنگر مقاوم ستون به تیر بیش از ۱/۳۵ است، کرنش‌های خمیری به شکل قابل انتظار در تیر متمرکز می‌شوند و با افزایش ضخامت لوله فولادی لنگر نهایی اتصال تقریباً ثابت می‌ماند.

جدول ۵. میزان انرژی مستهلک شده در سیکل آخر نمونه‌های ارائه شده در شکل‌های (۱۰ تا ۱۵)

Damping coefficient (%)	Energy dissipation at last cycle (kN.m)	Steel tube wall thickness (mm)	Column Dia. (mm)	Specimen
34.7	110	4.5	405	CFT1
37.1	98.4	6.5	405	CFT2
38.6	101.8	8.5	405	CFT3
40.9	109.6	4.5	505	CFT8
43.7	107.3	6.5	505	CFT9
46.3	104.3	8.5	505	CFT10

Table 5. Energy dissipated in last cycle of specified specimens

با توجه به جدول (۵) ضریب میرایی معادل این نمونه‌ها به ترتیب برابر با ۰/۴۰/۹، ۰/۴۳/۷ و ۰/۴۶/۳ است. بنابراین با افزایش قطر ستون و حفظ مشخصات تیر، ضریب میرایی معادل حدود ۱۶ درصد افزایش می‌یابد. انرژی مستهلک شده در آخرین حلقه پاسخ نمونه‌ها در جدول (۵) ارتباط مهم و معنی‌داری با ضخامت جداره ستون نشان نمی‌دهد. در کل می‌توان نتیجه گرفت که سازوکار مطلوب تشکیل مفصل خمیری در تیر در نمونه‌های مورد بررسی با وجود تغییرات ابعاد ستون بسیار محتمل و قابل انتظار است.

## ۷- تغییرات ضخامت بال تیر فولادی

در این بخش به بررسی تاثیر ضخامت بال تیر در اتصال تحت بارگذاری چرخه‌ای پرداخته می‌شود. برای این امر بال تیر با ضخامت ۱۲/۵، ۱۴/۵ و ۱۶/۵ میلی‌متر مورد بررسی قرار می‌گیرد.

محدوده غیرخطی شده است. از این مشاهده می‌توان نتیجه گرفت که جان تیر در اتصال مورد بررسی در تامین صلبيت برشی چشمه اتصال و جلوگیری از تسلیم برشی آن به ویژه در تغییر شکل‌های بزرگ، نقش عمده‌ای دارد.

هر اتصالی که از قابلیت اتلاف انرژی بالاتری برخوردار باشد، در صورت دارا بودن ظرفیت تغییر شکل کافی، دارای عملکرد مناسب‌تری در بارگذاری‌های لرزه‌ای خواهد بود. سطح زیر نمودار هیستریزس نیرو-جاب‌جایی، بیانگر مقدار انرژی مستهلک شده در نمونه‌ها است. نسبت میرایی معادل با توجه به رابطه  $\xi = \frac{1}{4\pi} \frac{S_{ABCD}}{(S_{OBF} + S_{ODE})}$  محاسبه می‌شود که مساحت هر جز در شکل (۲۰) مشخص شده است. بررسی تغییرات نسبت میرایی معادل، یکی از روش‌های مورد استفاده در ارزیابی کارایی لرزه‌ای اتصالات است [15 و 16].

شکل ۲۰. نمونه حلقه هیستریزس متعارف [14].

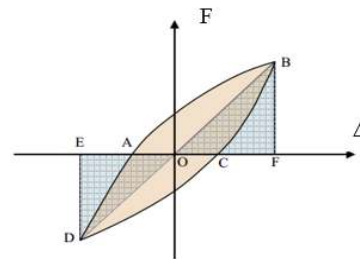


Fig. 20. A typical hysteresis loop showing elastic and inelastic energy absorption

در نمونه‌های CFT1، CFT2 و CFT3 با قطر ستون ۴۰۵ میلی‌متر، مطابق شکل‌های (۱۰) تا (۱۲)، لنگر نهایی اتصال نمونه‌ها به ترتیب ۵۱۸، ۵۴۰ و ۵۵۰ کیلونیوتن‌متر است که در زاویه تغییر شکل نسبی ۰/۰۱ تا ۰/۰۲ رادیان رخ می‌دهد. با ۸۹٪ افزایش ضخامت لوله فولادی در این سه نمونه و با وجود تغییر نسبت لنگر مقاوم ستون به تیر از ۰/۷۸ به ۱/۱۶، لنگر نهایی اتصال فقط ۶٪ افزایش یافته است که این رفتار همخوان با تمرکز رفتار خمیری در تیر فولادی است. با توجه به جدول (۵) ضریب میرایی معادل،  $\xi$ ، نمونه‌ها به ترتیب برابر با ۰/۳۴/۷، ۰/۳۷/۱ و ۰/۳۸/۶ است، بنابراین با افزایش ضخامت لوله فولادی ضریب میرایی معادل نمونه‌ها حدود ۱۱ درصد افزایش می‌یابد.

شکل ۲۱. نمودار هیستریزیس لنگر خمشی اتصال در برابر دررفت طبقه  
D=405 mm - t<sub>f</sub>=12.5 mm

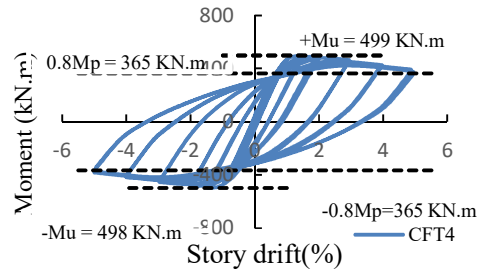


Fig. 21. Connection moment-story drift hysteresis curves D=405 mm - t<sub>f</sub>= 12.5 mm

شکل ۲۴. نمودار هیستریزیس لنگر خمشی اتصال در برابر دررفت طبقه  
D=505 mm - t<sub>f</sub>=16.5 mm

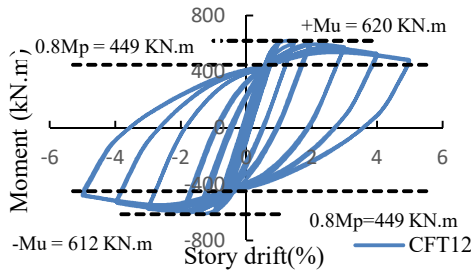


Fig. 24. Connection moment-story drift hysteresis curves D=505 mm - t<sub>f</sub>= 16.5 mm

جدول ۶. میزان انرژی مستهلک شده در سیکل آخر نمونه‌های ارائه شده در شکل‌های (۲۱ تا ۲۴)

Damping coefficient (%)	Energy dissipation at last cycle (kN.m)	Beam flange thickness (mm)	Column Dia. (mm)	Specimen
38.9	90.3	12.5	405	CFT4
37.1	98.4	14.5	405	CFT2
35.8	118.8	16.5	405	CFT5
48.3	93.2	12.5	505	CFT11
43.7	107.3	14.5	505	CFT9
41.5	122.2	16.5	505	CFT12

Table 6. Energy dissipated in last cycle of specified specimens

شکل ۲۲. نمودار هیستریزیس لنگر خمشی اتصال در برابر دررفت طبقه  
D=405 mm - t<sub>f</sub>=16.5 mm

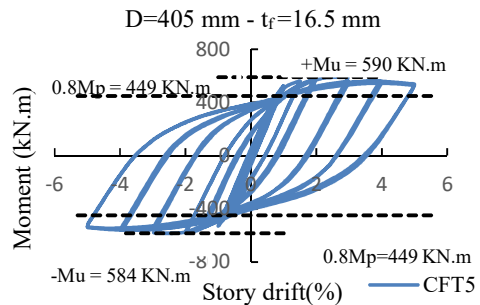


Fig. 22. Connection moment-story drift hysteresis curves D=405 mm - t<sub>f</sub>= 16.5 mm

شکل ۲۳. نمودار هیستریزیس لنگر خمشی اتصال در برابر دررفت طبقه  
D=505 mm - t<sub>f</sub>=12.5 mm

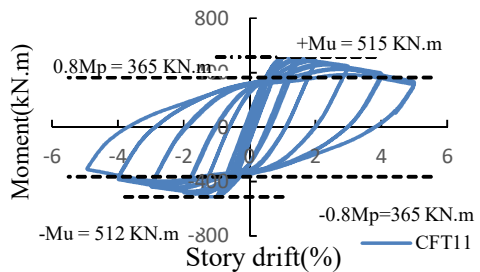


Fig. 23. Connection moment-story drift hysteresis curves D=505 mm - t<sub>f</sub>= 12.5 mm

در نمونه‌های CFT4، CFT2 و CFT5 با قطر ستون ۴۰۵ میلی‌متر، مطابق شکل (۲۱)، (۱۱) و (۲۲) لنگر نهایی اتصال نمونه‌ها به ترتیب ۴۹۹، ۵۴۰ و ۵۹۰ کیلو نیوتن متر است. با افزایش ضخامت بال تیر فولادی از ۱۲/۵ میلی‌متر به ۱۶/۵ میلی‌متر لنگر نهایی اتصال حدود ۱۸ درصد افزایش می‌یابد. با توجه به جدول (۶) ضریب میرایی معادل، ξ، نمونه‌های CFT4، CFT2 و CFT5 برای آخرین سیکل بارگذاری به ترتیب برابر با ۳۸/۹٪، ۳۷/۱٪ و ۳۵/۸٪ است. با افزایش ضخامت بال تیر فولادی، ضریب میرایی معادل نمونه‌ها حدود ۸ درصد کاهش می‌یابد زیرا با افزایش ضخامت بال، میزان جذب انرژی در حالت الاستیک (مجموع مساحت مثلث OBF و OED در شکل ۲۰) نسبت به میزان جذب انرژی چرخه‌ای (مساحت منحنی ABCD شکل ۲۰) افزایش بیشتری دارد. علت این امر تاثیر افزایش ضخامت بال تیر در افزایش مقاومت مقطع در برابر کمانش موضعی است. رخداد کمانش موضعی نقش مهمی در تشکیل مفصل پلاستیک بال فشاری و استهلاک انرژی دارد.

افزایش ضخامت بال تیر فولادی، ضریب میرایی معادل نمونه‌ها حدود ۱۴ درصد کاهش می‌یابد. علت این است که با افزایش ضخامت بال، وقوع کماتش موضعی در تیر به تاخیر می‌افتد و استهلاک انرژی چرخه‌ای کاهش می‌یابد.

### ۸- تغییرات ضخامت جان تیر فولادی

برای بررسی تاثیر ضخامت جان تیر در اتصال تحت بارگذاری چرخه‌ای، جان تیر با ضخامت ۷، ۹ و ۱۱ میلی‌متر مورد توجه قرار می‌گیرد.

شکل ۲۵. نمودار هیستریزس لنگر خمشی اتصال در برابر دررفت طبقه

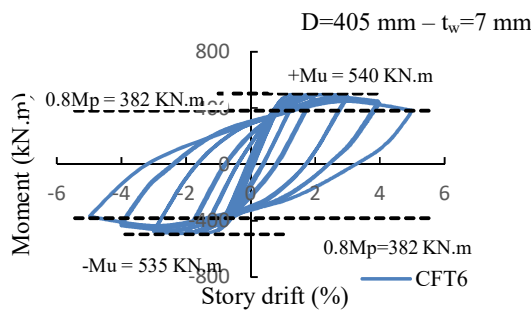


Fig. 25. Connection moment-story drift hysteresis curves D=405 mm -  $t_w=7$  mm

شکل ۲۶. نمودار هیستریزس لنگر خمشی اتصال در برابر دررفت طبقه

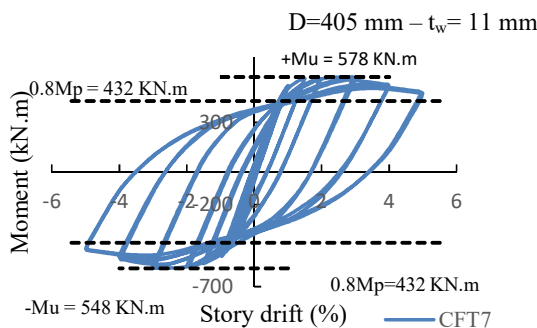


Fig. 26. Connection moment-story drift hysteresis curves D=405 mm -  $t_w=11$  mm

نتایج نشان می‌دهند که وقتی ضخامت جان از ۷ میلی‌متر به ۱۱ میلی‌متر تغییر می‌کند، ظرفیت نهایی اتصال حدود ۱۷ درصد افزایش پیدا می‌کند. نمونه CFT13 طبق شرایط AISC، که باید نسبت لنگر نهایی اتصال به لنگر پلاستیک تیر در دوران ۰/۰۴ رادیان بیش از ۰/۸ باشد، عملکرد قابل قبولی دارد. در این نمونه مقاومت اتصال در حد دورانی ۰/۰۵ رادیان کمتر از ۸۰ درصد لنگر پلاستیک تیر می‌باشد. علت را در کنترل

در نمونه‌های CFT9، CFT11 و CFT12 با قطر ستون ۵۰۵ میلی‌متر، مطابق شکل‌های (۲۳)، (۱۴) و (۲۴) لنگر نهایی اتصال نمونه‌ها به ترتیب ۵۱۵، ۵۶۶ و ۶۲۰ کیلو نیوتن متر است. با افزایش ضخامت بال تیر فولادی از ۱۲/۵ میلی‌متر به ۱۶/۵ میلی‌متر، حدود ۲۰ درصد افزایش ظرفیت نهایی اتصال مشاهده می‌شود. نمونه CFT11 طبق شرایط AISC، که باید نسبت لنگر نهایی اتصال به لنگر پلاستیک تیر در دوران ۰/۰۴ رادیان بیش از ۰/۸ باشد، عملکرد قابل قبولی دارد. اما در این نمونه مقاومت اتصال در حد دوران ۰/۰۵ رادیان، کمتر از ۸۰ درصد لنگر پلاستیک تیر است. علت را در کنترل بال تیر نمونه CFT11 از منظر کماتش موضعی و الزامات لرزه‌ای کماتش موضعی برای خمش مطابق مبحث دهم مقررات ملی ساختمان [12] می‌توان یافت که نشان می‌دهد نسبت عرض به ضخامت بال درست هماهنگ با آیین‌نامه نیست.

کنترل بال تیر از منظر کماتش موضعی:

$$\frac{h}{t_w} = \frac{95}{12.5} = 7.6 < \lambda_p = 0.38 \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 9.29 \text{ OK}$$

کنترل بال تیر از منظر الزامات لرزه‌ای کماتش موضعی:

$$\frac{h}{t_w} = \frac{95}{12.5} = 7.6 < \lambda_{hd} = 0.3 \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 7.34 \text{ Not OK}$$

در نمونه‌های CFT11 و CFT4 با توجه به ثابت بودن مقطع

تیر، افزایش مقطع ستون از قطر ۴۰۵ میلی‌متر به ۵۰۵ میلی‌متر باعث افزایش نسبت ظرفیت خمشی ستون به تیر از ۱/۰۹ به ۱/۸۴ شده است و این بدین معنی است که پتانسیل تشکیل مفصل پلاستیک در تیر افزایش می‌یابد. نتایج حاصل از تحلیل در جدول (۷) نیز نشان می‌دهد که تیر در نمونه دارای ستون قطورتر سهم بیشتری در استهلاک انرژی چرخه‌ای دارد.

جدول ۷. سهم اجزای اتصال در جذب انرژی تجمعی در نمونه CFT11 و CFT4

concrete core	steel tube	steel beam	Col. Dia. (mm)	Specimen
6%	4%	90%	405	CFT 4
4%	2%	94%	505	CFT 11

Table 7. Share of connection elements in absorbing cumulative energy in specimens CFT4 and CFT11

با توجه به جدول (۶) ضریب میرایی معادل،  $\mu_e$  نمونه‌های CFT9، CFT11 و CFT12 برای آخرین سیکل بارگذاری به ترتیب برابر با ۰/۴۳/۷، ۰/۴۸/۳ و ۰/۴۱/۵ است. با

چرخه‌ای، افزایش بیشتری دارد. علت این امر تأثیر افزایش ضخامت جان تیر در افزایش مقاومت مقطع در برابر کمانش موضعی است. کمانش موضعی نقش مهمی در تشکیل مفصل پلاستیک بال فشاری و استهلاک انرژی دارد.

## ۹- نتیجه‌گیری

در این تحقیق یک مطالعه با مدل‌سازی عددی در مورد رفتار چرخه‌ای اتصال ستون لوله فولادی پر شده با بتن و تیر فولادی میان‌گذر برای بررسی تأثیر قطر لوله فولادی، ضخامت لوله فولادی، ضخامت بال و جان تیر تحت بارگذاری رفت و برگشتی در ۱۴ نمونه، به کمک نرم‌افزار آباکوس انجام شده است. پس از درستی‌آزمایی مدل با نتایج آزمایشگاهی و محاسبات لازم نتایج به این صورت به دست آمده‌اند:

۱- در هماهنگی با فرضیات طراحی نمونه‌ها، مفصل پلاستیک در تیر فولادی مشاهده شد و ستون ارتجاعی باقی ماند. البته به نظر می‌رسد روابط متعارف، مقاومت خمشی ستون CFT را دست پائین برآورد می‌کنند که برای اطمینان است.

۲- طبق شرایط AISC که مقرر می‌کند در دوران اتصال به میزان ۰/۰۴ رادیان، نسبت لنگر نهایی اتصال به لنگر پلاستیک تیر بیش از ۰/۸ باشد، نمونه‌ها عملکرد قابل قبولی دارند. لازم به ذکر است در نمونه‌های CFT11 و CFT13 نسبت لنگر نهایی اتصال به لنگر پلاستیک تیر در دوران ۰/۰۵ رادیان کمتر از ۰/۸ است که دلیل این امر به ترتیب کمبود ضخامت بال و کمبود ضخامت جان تیر است که منجر به کمانش موضعی و افت مقاومت زودرس می‌شود.

۳- بررسی میزان استهلاک انرژی در نمونه‌ها نشان می‌دهد که اتصال مورد بررسی با داشتن ظرفیت تغییر شکل بالا و داشتن حلقه‌های هیستریزس چاق و عدم وقوع لاغرشدگی از قابلیت اتلاف انرژی بالایی در طی چرخه‌های بارگذاری برخوردار است. نسبت میرایی چرخه‌ای نمونه‌های مورد مطالعه حدوداً بین ۳۵٪ تا ۴۸٪ محاسبه شده است.

۴- در نمونه‌های با تیر یکسان در صورت افزایش ابعاد ستون، میزان جذب انرژی و میرایی چرخه‌ای افزایش می‌یابند.

جان تیر نمونه CFT13 از منظر کمانش موضعی و الزامات لرزه‌ای کمانش موضعی برای خمش مطابق مبحث دهم مقررات ملی ساختمان [12] می‌توان یافت که نشان می‌دهد نسبت ارتفاع به ضخامت جان کاملاً منطبق بر آئین‌نامه نیست.

کنترل جان تیر از منظر کمانش موضعی:

$$\frac{h}{t_w} = \frac{428}{7} = 61.1 < \lambda_p = 3.76 \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 98.1 \text{ OK}$$

کنترل جان تیر از منظر الزامات لرزه‌ای کمانش موضعی:

$$\frac{h}{t_w} = \frac{428}{7} = 61.1 < \lambda_{hd} = 2.165 \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 56.5 \text{ Not OK}$$

در نمونه CFT6 و CFT13 با توجه به ثابت بودن مقطع تیر، افزایش مقطع ستون از قطر ۴۰۵ میلی‌متر به ۵۰۵ میلی‌متر باعث افزایش نسبت ظرفیت خمشی ستون به تیر از ۱/۰۴ به ۱/۷۶ شده است و این بدین معنی است که پتانسیل تشکیل مفصل پلاستیک در تیر افزایش می‌یابد.

جدول ۸. میزان انرژی مستهلک شده در سیکل آخر نمونه‌های مورد بحث در بند (۸) مقاله حاضر

Damping coefficient (%)	Energy dissipation at last cycle (kN.m)	Beam web thickness (mm)	Column Dia. (mm)	Specimen
38.2	89.9	7	405	CFT6
37.1	98.4	9	405	CFT2
37.7	112.2	11	405	CFT7
46.8	93.3	7	505	CFT13
43.7	107.3	9	505	CFT9
43.4	124	11	505	CFT14

Table 8. Energy dissipated in last cycle of specified specimens

با توجه به جدول (۸) ضریب میرایی معادل،  $\bar{\mu}$ ، نمونه‌های CFT13، CFT9 و CFT14 برای آخرین سیکل بارگذاری به ترتیب برابر با ۴۳/۷٪، ۴۳/۴٪ و ۴۶/۸٪ است. با افزایش ضخامت جان تیر فولادی، ضریب میرایی معادل نمونه‌ها حدود ۷ درصد کاهش می‌یابد زیرا با افزایش ضخامت جان، میزان جذب انرژی در حالت الاستیک نسبت به میزان جذب انرژی

- column, *Journal of constructional steel research*, 161, 154-170.
- [7] ABAQUS user's manual, revision 2017 in, Swanson Analysis Systems Inc.
- [8] ACI-318. 2008 Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary.
- [9] 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*, 63, 182-193.
- [10] 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.
- [11] 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*, 64, 680-688.
- [12] Building Construction Code of Iran, Part 10 "Design and Construction of Steel Buildings", 2013 (In Persian)
- [13] ANSI/AISC 341-16. 2016. Seismic provisions for structural steel buildings, Chicago, IL: American Institute of Steel Construction.
- [14] Chen Q, Cai J, Bradford M, Liu X, Zuo Zh, 2014 Seismic behavior of a through-beam connection between concrete-filled steel tubular columns and reinforced concrete beams, *Journal of Engineering Structures*, 80, 24-39.
- [15] Yilmaz O, Bekiroğlu S, 2018 Seismic Performance of Post-Northridge Welded Connections, *Latin American Journal of Solids and Structures*, 15(2).
- [16] Ben Mou, Xi Li, Yongtao Bai, Lisa Wang, 2019 Shear Behavior of Panel Zones in Steel Beam-to-Column Connections with Unequal Depth of Outer Annular Stiffener, *ASCE Journal of Structural Eng.*, 145(2): 04018247.
- ۵- در نمونه‌های با ابعاد ستون یکسان، افزایش ضخامت بال و جان تیر باعث افزایش مقاومت خمشی ارتجاعی تیر و افزایش مقاومت مقطع تیر در برابر کمانش موضعی می‌شود. همچنین افزایش انرژی مستهلک شده در مفصل پلاستیک تیر بر اثر افزایش ضخامت اجزای تیر مشاهده می‌شود. این دو روند در محاسبه نسبت میرایی چرخه‌ای اتصال با یکدیگر در تقابل هستند و در پایان افزایش ضخامت بال و جان تیر به کاهش میرایی اتصال منجر می‌شود.
- سپاسگزاری**
- از آقای دکتر مهدی خوش کردار برای همکاری در تنظیم نهایی متن مقاله صمیمانه تشکر می‌گردد.
- مراجع**
- [1] Han L, Li W, BJORHOVDE R, 2014 Developments and advanced applications of concrete-filled steel tubular (CFST) structures: Members, *Journal of Constructional steel research*, 100, 211-228.
- [2] Elremaily A, Azizinamini A, 2001 Experimental behavior of steel beam to CFT column connections, *Journal of constructional steel research*, 57(10), 1099-1119.
- [3] Alizadeh, S., Attari, N. K., and Kazemi, M. T, 2015 Experimental investigation of RCS connections performance using self-consolidated concrete, *Journal of Constructional Steel Research*, 114, 204-216.
- [4] 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*, 118, 105-119.
- [5] Zeinizadeh Jeedi 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*, 131, 477-491.
- [6] Ahmadi M.M, Mirghaderi R, 2019 Experimental studies on through-plate moment connection for beam to HSS/CFT

# Evaluation of the non-linear behavior of the connection between the continuous steel beam and the circular CFT column under cyclic loading

Ahmad Sabzei<sup>1</sup>, Sohail Majid Zamani<sup>2\*</sup>

1. PhD student, Road, Housing and Urban Development Research Center
2. Assistant Professor, Road, Housing and Urban Development Research Center

## Abstract

Concrete Filled Tubes (CFT) have been proposed and used as suitable sections for columns. Main benefits of using CFT columns include optimum use of concrete in compression and steel in tension, better protection of columns against fire and ease of construction due to using column steel shell as temporary load bearing element. The main drawback of using CFT is difficulty of providing suitable beam column connections in moment frames. The problem arises from lack of access to internal space of steel tube to install the required continuity plates and any shell reinforcements. Several proposals have been presented by researchers to create the required bond between steel beam and CFT column through methods such as collar stiffener plates, embedded horizontal rebars connected to beam flanges and through column continuous beams. In order to encourage designers and builders to use CFT columns and take advantage of their benefits, it is necessary to solve the problems of proposed connections to reach at reliable and effective connections. From the review of the previous researches, it appears that the connection of continuous steel beam and CFT column is a suitable option to provide the connection of beam and column in composite bending frames. However, in order to design a connection in a real structure or to design laboratory specimens, it is necessary to make a suitable choice among countless combinations of geometric parameters and dimensions of the connection, based on the structural characteristics of the connection resulting from these parameters. While final solution cannot be determined without consideration of specific properties of each project, but total trends can be established through parametric studies covering a range of parameters likely to be encountered in practice.

In this article, numerical modeling of the continuous steel beam connection with tubular CFT columns is conducted by finite element analysis to investigate several key parameters including the effect of steel column diameter, steel column thickness, beam flange thickness and beam web thickness on cyclic performance of connection. In some specimens, the seismic compactness conditions of the beam section and the column section were slightly out of the permissible limits of the regulations. However, all of the samples satisfied the stable cyclic behavior and tolerated the maximum story drift limit of 0.04 radians according to the AISC regulations as a special moment connection. Results showed large load-drift hysteresis cycles with significant energy dissipation capability. The analysis results show that in connections with the same column but with different beam sections, if the thickness of the beam flange or beam web is increased, the absorbed energy increases in loading cycles, but lower values are obtained for cyclic hysteretic damping. This phenomenon was attributed to the effect of strengthening beam web and beam flange on reducing the tendency of beam to buckle. Since buckling of beam contributes to the dissipated energy of inelastic cycles, any reduction in buckling potential leads to a reduction in hysteretic damping of connection. In connections with the same beam but with different column sizes, if the dimensions of the column are increased, the amount of energy dissipation and cyclic damping increase.

**Keywords:** nonlinear behavior, concrete filled tube, hysteresis cycle, energy dissipation, seismic requirements.