

## Enhancing Beam-to-Column Connection Behavior in Concrete-Filled Steel Tubes Using Joint Zone Reinforcement

Mohammad Ardanloo<sup>1</sup>, Adel Ferdousi<sup>2,3\*</sup>, Seyed Saeed Mirrezaei<sup>2</sup>, Mahdi Nouri<sup>2,3</sup>

1- Ph. D. Candidate, Department of Civil engineering, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran

2- Assistant Professor, Department of Civil engineering, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran

3- Robotics and Soft Technologies Research Center Tabriz Branch, Islamic Azad University

### ABSTRACT

Concrete-filled steel tube (CFT) columns have garnered significant attention in high-rise building construction due to their superior advantages over conventional reinforced concrete or steel columns. However, despite these benefits, beam-to-CFT column connections present critical challenges, including load transfer mechanisms between the steel tube and concrete core, stress distribution efficiency, prevention of stress concentrations, and long-term concrete creep effects, which may alter force redistribution over time. This study proposes a novel beam-to-CFT column connection design aimed at enhancing joint performance by locally enlarging the column cross-section at the connection zone. Numerical investigations were conducted using nonlinear static finite element analysis in ABAQUS, where cyclic loading was applied to extract moment-rotation curves. Additionally, the effects of employing upgraded cross-sections of CFT columns (UCFT) in the connection zone were evaluated. The numerical results demonstrate that the proposed connection system effectively reduces stress concentrations at the steel-concrete interface, while improving key performance metrics: ultimate connection capacity (14.88%), energy absorption (66.34%), rotational stiffness (13.94%), and plastic hinge distance from the column face. Furthermore, UCFT sections outperformed conventional CFT sections, increasing ultimate strength (8.86%), energy dissipation (37.39%), and rotational stiffness (7.94%). These findings highlight the potential of the proposed connection to enhance structural robustness and seismic resilience in CFT-based systems.

### ARTICLE INFO

Receive Date: 27 February 2025

Revise Date: 14 June 2025

Accept Date: 11 July 2025

### Keywords:

Innovative moment-resisting connection,  
Energy dissipation capacity,  
Hysteretic behavior,  
Concrete-filled steel tubular (CFT) columns,  
Flexural strength

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/jsce.2025.502452.3650

\*Corresponding author: Adel Ferdousi

Email address: a\_ferdousi@iaut.ac.ir

## بهبود رفتار اتصال تیر به ستون فولادی پر شده با بتن با تقویت ستون در ناحیه اتصال

محمد آردانلو<sup>۱</sup>، عادل فردوسی<sup>۲\*</sup>، سعید میررضایی<sup>۲</sup>، مهدی نوری<sup>۲</sup>

۱- دانشجوی دکتری دانشکده فنی و مهندسی، گروه عمران، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران

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

۳- مرکز تحقیقات رباتیک و فناوری های نرم، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران

### چکیده

استفاده از ستون‌های فولادی پر شده با بتن<sup>۱</sup> در ساختمان‌های مرتفع توجه زیادی را به خود جلب کرده است و علت آن مزایای این ستون‌ها نسبت به ستون‌های بتنی و فولادی متعارف می‌باشد. در سال‌های اخیر جدا از مزایای آن، اتصالات تیر به ستون فولادی پر شده با بتن با چالش‌هایی مهمی همراه است. از جمله این چالش‌ها می‌توان به نحوه انتقال بار از جداره فولادی به بتن، توزیع مناسب تنش، ممانعت از ایجاد تمرکز تنش و خزش بتن اشاره نمود. با توجه به خزش بتن به مرور زمان توزیع نیروها می‌تواند دست‌خوش تغییرات باشد. در پژوهش حاضر نوع جدیدی از اتصال تیر به ستون به منظور بهبود رفتار در ناحیه اتصال مطرح گردیده که با افزایش سطح مقطع ستون در ناحیه اتصال همراه است. در این مقاله به بررسی عددی رفتار اتصال مطرح شده پرداخته شده است. نمونه‌ها در نرم افزار اجزا محدود ABAQUS مدلسازی و از تحلیل استاتیکی غیرخطی استفاده شده است. نمونه‌ها تحت بار چرخه‌ای تحلیل و منحنی‌های لنگر-دوران استخراج گردیده است. همچنین تاثیر استفاده از مقاطع ارتقاء یافته (UCFT) در ناحیه اتصال نیز بررسی شده است. بررسی‌های عددی حاکی از آن است که اتصال جدید معرفی شده می‌تواند تنش در نواحی انتقال بار از جداره به بتن هسته را کاهش، مقاومت نهایی اتصال را تا ۱۴/۸۸ درصد، میزان جذب انرژی تا ۶۶/۳۴ درصد، سختی دورانی تا ۱۳/۹۴ درصد و فاصله مفصل پلاستیک از بر ستون را افزایش داده و در مجموع عملکرد اتصال را بهبود بخشد. همچنین استفاده از مقطع ارتقاء یافته نسبت به مقطع معمولی متداول می‌تواند باعث افزایش مقاومت نهایی اتصال تا ۸/۸۶ درصد، میزان جذب انرژی تا ۳۷/۳۹ درصد و سختی دورانی تا ۷/۹۴ درصد گردد.

کلمات کلیدی: اتصال خمشی پیشنهادی، جذب انرژی، رفتار چرخه‌ای، ستون‌های فولادی پر شده با بتن، ظرفیت خمشی.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	10.22065/jsce.2025.502452.3650	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2025.502452.3650	۱۴۰۴/۰۷/۳۰	۱۴۰۴/۰۴/۲۰	۱۴۰۴/۰۴/۲۰	۱۴۰۴/۰۳/۲۴	۱۴۰۳/۱۲/۰۹
			عادل فردوسی		*نویسنده مسئول:	
			a_ferdousi@iaut.ac.ir		پست الکترونیکی:	

<sup>1</sup> - Concrete Filled Tube

<sup>2</sup> - Upgraded Concrete Filled Steel Tubular Columns

## ۱- مقدمه

امروزه استفاده از ستون‌های فولادی پر شده با بتن<sup>۱</sup> در ساختمان‌های بلند، پل‌ها و همچنین شمع‌ها رواج بسیاری یافته است و علت آن مزایای این ستون‌ها نسبت به ستون‌های بتنی معمولی می‌باشد. از جمله مزایای این ستون‌ها می‌توان به عدم نیاز به قالب بندی، دورگیری بتن، افزایش شکل‌پذیری و مقاومت مناسب با وزن و حجم کمتر اشاره نمود [۱-۳]. با توجه به استفاده از مقطع فولادی پر شده با بتن و عدم نیاز به قالب‌بندی، می‌توان بخش فلزی سازه را در کارخانه ساخت و در محل پروژه به یکدیگر متصل نمود، که این امر باعث افزایش سرعت ساخت و کاهش بار مرده و نیز کاهش ابعاد مقطع نسبت به سازه‌های بتنی گردد. از طرف دیگر بتن محبوس شده در داخل جدار فولادی از مقاومت و پذیری بیشتری برخوردار خواهد بود. همچنین استفاده از مقاطع مرکب با بهبود رفتار تک به تک مصالح فولادی و بتنی در کنار یکدیگر باعث افزایش ظرفیت باربری، جذب انرژی، سختی و سرعت ساخت شده، که این امر سبب رغبت مهندسیین به استفاده از این نوع ستون‌ها شده است [۴-۶].

ایمنی، قابلیت اعتماد و همچنین عملکرد سازه رابطه مستقیمی با رفتار اتصال تیر به ستون دارد که در این خصوص انواع مختلفی از اتصالات پیشنهاد و مورد ارزیابی قرار گرفته است [۷-۱۲].

یکی از مهمترین مسائل مطرح در مورد اجرای اتصال تیرهای فولادی به ستون‌های CFT این است که لنگرهای ناشی از بارهای خارجی، از طریق تیر به صورت مناسب به ستون انتقال یابد که در این خصوص تحقیقات متعددی توسط محققان صورت گرفته است [۱۳-۱۷].

جدی<sup>۲</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۷ [۱۸] اتصال جدیدی با رویکرد عبور سخت کننده از هسته مرکزی ستون را ارائه کردند که نتایج حاصله حاکی از آن است که این اتصال علاوه بر افزایش سطح زیر منحنی هیستریزس از شکل‌پذیری و اتلاف انرژی خوبی نیز برخوردار است. طبق نتایج این اتصال توانایی پاسخگویی به انتظارات لرزه‌ای را دارد. احمدی<sup>۳</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۹ [۱۹] به بررسی رفتار نوع جدیدی از اتصال تیر به ستون مربعی پرداخته شده است که طبق نتایج، مفصل پلاستیک در تیر فولادی و با فاصله قابل قبولی از ستون تشکیل یافته و هیچ گونه خسارتی در ستون ایجاد نگردیده است. یانگ و همکاران<sup>۴</sup> در سال ۲۰۲۰ [۲۰] استفاده از سخت کننده‌های T شکل در داخل هسته بتنی را پیشنهاد داده‌اند. طبق نتایج، تسلیم در تیرها رخ داده و نیروهای داخلی تیر به صورت مناسبی به ناحیه اتصال انتقال یافته است. اتصال از شکل‌پذیری بالا و ظرفیت جذب انرژی قابل قبول برخوردار است. پاچیده<sup>۵</sup> و همکاران در سال ۲۰۲۱ [۲۱] به بررسی عملکرد لرزه‌ای ستون‌های فولادی پر شده با بتن پرداخته است. برای این منظور، تعدادی نمونه ستون با مقاطع داخلی مربعی، لوزی شکل و دایره‌ای و مقطع بیرونی مربعی به صورت تجربی مورد ارزیابی قرار داده است. بر اساس نتایج، نحوه شکست ستون‌های دارای بخش داخلی مربعی یا لوزی مشابه است، اما برعکس، نمونه‌های با بخش دایره‌ای آسیب‌های شدیدی را متحمل شده است. پاچیده<sup>۶</sup> و همکاران در سال ۲۰۲۱ [۲۲] به بررسی تأثیر افزایش دما بر عملکرد ستون‌های فولادی دو جداره پر شده با بتن پرداخته‌اند که بر اساس نتایج حاصله در اثر افزایش دما شکل مقطع داخلی تأثیر قابل توجهی بر رفتار و مقاومت ستون‌های CFDST<sup>۷</sup> دارد. یی<sup>۸</sup> و همکاران در سال ۲۰۲۱ [۲۳] جهت جلوگیری از مشکلات اجرایی جوشکاری در ناحیه اتصال و صفحه سخت کننده که از هسته اتصال عبور می‌کند، اتصال با ادوات پیچی به تیر را مطرح نموده است. اتصال پیشنهادی دارای مزایایی از قبیل ظرفیت باربری بالا، شکل‌پذیری قابل توجه، عملکرد هیستریزس پایدار، اتلاف انرژی بالا و سهولت ساخت می‌باشد. لویی<sup>۹</sup> و همکاران در سال ۲۰۲۱ [۲۴] اتصال جدیدی را با استفاده از صفحه دو طرفه معرفی کرده است که دو

<sup>1</sup> - Concrete Filled Steel Tubular Columns- CFT

<sup>2</sup> -Zeinizadeh Jeddi

<sup>3</sup> -Ahmadi

<sup>4</sup> -Yang

<sup>5</sup> -pachideh

<sup>6</sup> -Pachide

<sup>7</sup> - Concrete-filled double skin steel tube

<sup>8</sup> -Ye

<sup>9</sup> -Liu

صفحه در دو طرف ستون CFT تیرها را به هم متصل می‌کنند. این اتصال عملکرد لرزه‌ای رضایت بخشی را نشان داده است. انصاری<sup>۱</sup> و همکاران در سال ۲۰۲۱ [۲۵] با استفاده از تحلیل عددی به بررسی اثر پارامترهای مختلف ظرفیت ممان نهایی اتصال آزمایش شده توسط جدی<sup>۲</sup> و همکاران [۱۸] پرداخته شده است. در این تحلیل عددی متغییر ارتفاع، ضخامت و طول سخت کننده عبوری از هسته اتصال می‌باشد. نتایج حاصله حاکی از آن است که افزایش ارتفاع سخت کننده عبوری از هسته تا ۸ درصد می‌تواند ظرفیت خمشی مقطع را افزایش دهد؛ همچنین می‌توان با افزایش طول سخت کننده، محل تشکیل مفصل پلاستیک را از ناحیه اتصال دورتر نمود. برق لامع و همکاران<sup>۳</sup> در سال ۲۰۲۲ [۲۶] به بررسی رفتار مقطع جدید ستون معرفی شده توسط فردوسی برای ستون‌های فولادی پر شده با بتن UCFT<sup>۴</sup> پرداخته است. در این ستون‌ها از شبکه فولادی در نزدیکی جداره ستون استفاده است. از مزایای این ستون‌ها می‌توان به رفع نقص در جداره فولادی ناشی از آتش سوزی و ضربه یا انفجار با کاهش محصور شدگی بتن هسته و متعاقباً کاهش ظرفیت باربری اشاره نمود. رفیعی<sup>۵</sup> و همکاران در سال ۲۰۲۲ [۲۷] قرار دادن یک جعبه فولادی در ناحیه اتصال به صورت پیش ساخته با اتصال پیچی به جان ستون را پیشنهاد داده است. نتایج حاکی از آن است که اتصال شرایط آیین‌نامه‌ای را برآورده نموده و از صلاحیت کافی برخوردار است. با وجود نتایج رضایت بخش در رابطه با این اتصال، نکته قابل توجه این است که ساخت، نصب و مونتاژ آن بایستی با دقت بسیار زیاد و رواداری کم انجام شود. رضوی<sup>۶</sup> و همکاران در سال ۲۰۲۳ [۲۸] در ناحیه اتصال جزئیات TIT<sup>۷</sup> را مطرح نموده است. در این تحقیق پارامترهای مکانیکی مانند تسلیم و استحکام نهایی و شکل‌پذیری نمونه‌ها مورد ارزیابی قرار گرفته است. بر اساس نتایج، لوله قرار گرفته در داخل هسته اتصال در طول مدت آزمایش در محدوده الاستیک قرار گرفته و خرابی در آن رخ نداده است. پروری و همکاران در سال ۲۰۲۴ [۱] بررسی تاثیر سخت کننده‌های الحاقی بر عملکرد لرزه‌ای اتصال تیر به ستون فولادی پر شده با بتن پرداخته شده است که در نتیجه این تحقیق استفاده مؤثر از سخت‌کننده‌ها در قاب‌های خمشی تأثیرات عملکردی و اقتصادی مناسبی دارد. وانگ<sup>۸</sup> و همکاران در سال ۲۰۲۴ [۲۹] نوع جدیدی از اتصالات را با هدف بهبود رفتار اتصال با غلاف خارجی بین ستون SS-CFSST و تیر فولادی معرفی کرده است. آزمایش‌های رفت و برگشتی بر روی ۹ نمونه انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد که حالت‌های شکست شامل، شکست صفحه جانبی، پارگی دهانه تیر و تشکیل مفصل پلاستیک در تیر است. ژانگ<sup>۹</sup> و همکاران در سال ۲۰۲۴ [۳۰] در این مطالعه سه نمونه اتصال تیر به ستون تقویت شده با دیافراگم داخلی، تحت بارگذاری چرخه‌ای قرار گرفته و اثرات نسبت ضخامت صفحه روی رفتار مکانیکی این اتصالات بررسی شده است. طبق نتایج، با کاهش ضخامت دیوارهای ستون، رفتار زلزله‌ای شامل مقاومت، سختی و شکل‌پذیری اتصالات به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. فرامرزاده<sup>۱۰</sup> و همکاران در سال ۲۰۲۵ [۳۱] به بررسی آزمایشگاهی و عددی رفتار مقطع تقویت شده از ستون‌های دوجداره فولادی پر شده با بتن تحت بارگذاری چرخه‌ای پرداخته است. در این مطالعه از سخت کننده‌های قائم و میلگردهای حلقوی درستون‌های CFT استفاده شده است. نتایج این مطالعه حاکی از آن است که سخت کننده‌های قائم و میلگردهای حلقوی پس از زوال جداره خارجی لوله فولادی از افت شدید مقاومت ستون جلوگیری می‌کنند. جائو<sup>۱۱</sup> و همکاران در سال ۲۰۲۵ [۳۲] دو نوع اتصال تیر به ستون مربعی فولادی پر شده با بتن را مورد ارزیابی قرار داده است. یکی از طریق اتصال با دیافراگم خارجی و دیگری اتصال با دیافراگم عبوری می‌باشد. نتایج حاکی از آن است که دو طرح اتصال برای کاربردهای لرزه‌ای مناسب می‌باشند. اتصال با دیافراگم خارجی به دلیل شکل‌پذیری بالاتر در شرایط خاص می‌تواند ارجحیت داشته باشد. وانگ<sup>۱۲</sup> و همکاران در سال ۲۰۲۵ [۳۳] به ارزیابی عملکرد لرزه‌ای اتصالات با صفحه انتهایی تحت بارگذاری چرخه‌ای پرداخته است. پارامترهای اصلی مورد بررسی شامل

1 - Ansari

2 - Zeinizadeh Jeddi

3 - barghlame

4 - Concrete-Filled Steel tubular Columns (Upgraded CFT)

5 - Rafiei

6 - Razavi

7 - Tube-in-tube

8 - Wang

9 - Zhang

10 - Faramarzadeh

11 - Guo

12 - Wang

حالات شکست، ظرفیت باربری، سختی، شکل پذیری و اتلاف انرژی می باشد. که در نتیجه اتصالات با صفحه انتهایی عملکرد لرزه ای مطلوب و رضایت بخشی داشته است.

از نقاط قوت اتصالات ستون های CFT می توان به موارد زیر اشاره نمود

۱- ترکیب فولاد و بتن باعث افزایش ظرفیت باربری و سختی اتصال می شود.

۲- بتن داخل جداره فولادی از کماتش موضعی جداره فولادی جلوگیری می کند.

۳- شکل پذیری بالا به دلیل وجود بتن پرکننده.

۴- کاهش خطر گسیختگی ناگهانی در مقایسه با اتصالات تمام فولادی.

۵- سهولت اجرا و نصب.

۶- کاهش نیاز به قالب بندی پیچیده به دلیل وجود جداره خارجی فولادی.

از معضله های مهم اتصال تیر به ستون های CFT می توان به موارد زیر اشاره نمود.

۱- نحوه انتقال بار از جداره فولادی به بتن، توزیع مناسب تنش و ممناعت از ایجاد تمرکز تنش

۲- پدیده خزش و افت هسته بتنی که در نتیجه به مرور زمان بتن از جداره فلزی جدا شده و توزیع تنش از جداره فولادی به بتن در مرور زمان تغییر می کند.

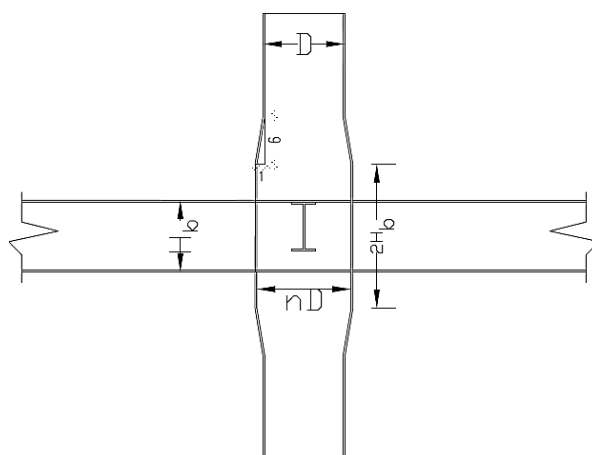
در مطالعه حاضر نوع جدیدی از اتصال تیر به ستون فولادی پر شده با بتن، توسط فردوسی مطرح شده که در ناحیه اتصال تیر به ستون، سطح مقطع ستون افزایش یافته و این افزایش سطح مقطع به صورت تدریجی (گلدانی) انجام گرفته است.

از مزایای افزایش سطح مقطع در ناحیه اتصال می توان به بهبود رفتار در چشمه اتصال تیر به ستون، کاهش تنش های موجود و توزیع یکنواخت در ناحیه اتصال اشاره نمود.

در مقاله حاضر از نرم افزار ABAQUS به منظور ارزیابی رفتار اتصال مد نظر استفاده شده است. در قدم اول یک نمونه آزمایشگاهی اتصال تیر به ستون و یک نمونه آزمایشگاهی ستون UCFT در نرم افزار اجزا محدود ABAQUS مدل سازی و نتایج حاصل از تحلیل عددی با نتایج آزمایشگاهی مقایسه می گردد تا از صحت مدل سازی عددی اطمینان حاصل گردد. سپس تاثیر افزایش سطح مقطع در ناحیه اتصال و همچنین استفاده از مقطع UCFT تواما با افزایش سطح مقطع در ناحیه اتصال بررسی شده است.

## ۲- معرفی اتصال پیشنهادی تیر به ستون CFT

در مقاله حاضر با افزایش سطح مقطع ستون در ناحیه اتصال سعی بر بهبود رفتار اتصال شده است. تغییرات در ناحیه اتصال با افزایش سطح مقطع به میزان  $n$  برابر قطر اولیه ستون  $D$  (قطر خارجی جداره فولادی) است که  $n$  های در نظر گرفته شده در این مطالعه به ترتیب برابر  $۱/۰۵$ ،  $۱/۱$ ،  $۱/۱۵$  و  $۱/۲$  می باشد. این نمونه ها به ترتیب  $Nx-yP$  نام گذاری گردیده است. به صورتی که  $x$  نشان از شماره نمونه و  $y$  نشان از افزایش قطر خارجی ستون به درصد می باشد. لازم به ذکر است ضخامت جداره فولادی در طول ستون ثابت بوده و افزایش نمی یابد. تغییر مقطع ستون در ناحیه اتصال به صورت تدریجی، به عبارتی گلدانی بوده و از شیب  $۱$  به  $۶$  استفاده شده است. همچنین برای ارتفاع ستون در ناحیه افزایش یافته دو برابر ارتفاع تیر  $2H_b$  در نظر گرفته شده است. ارتفاع در نظر گرفته شده به منظور پیش بینی وجود ادوات اتصال تیر به ستون در ناحیه اتصال می باشد. در قدم بعدی ستون ها به وسیله شبکه فولادی نزدیک به ستون مسلح و نتایج با نمونه های بدون شبکه مقایسه گردیده است. جزئیات اتصال تیر به ستون CFT مطرح شده در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱- جزئیات ناحیه اتصال تیر به ستون فولادی پر شده با بتن

### ۳- صحت سنجی

با توجه به هزینه بالای مطالعات تجربی، پیچیدگی‌ها و سختی‌های انجام آزمایش، در سال‌های اخیر استفاده از تحلیل‌های عددی مورد توجه محققین قرار گرفته است. بنابراین جهت حصول اطمینان از صحت مدلسازی، مقایسه نتایج حاصل از تحلیل عددی با نتایج به دست آمده از آزمایشگاه ضروری می‌باشد. دو عدد آزمایش تجربی انجام یافته توسط برق لامع و همکاران [۲۶] و جدی و همکاران [۲۵] انتخاب و به صورت عددی در نرم افزار اجزا محدود ABAQUS مدل‌سازی شده است. نتایج حاصله از تحلیل عددی با نتایج تجربی مقایسه شده است. در این مقاله از تحلیل استاتیکی غیر خطی<sup>۱</sup> با استفاده از تکنیک استاتیک جنرال<sup>۲</sup> استفاده شده است.

### ۳-۱ رفتار فولاد و بتن مورد استفاده در تحلیل عددی

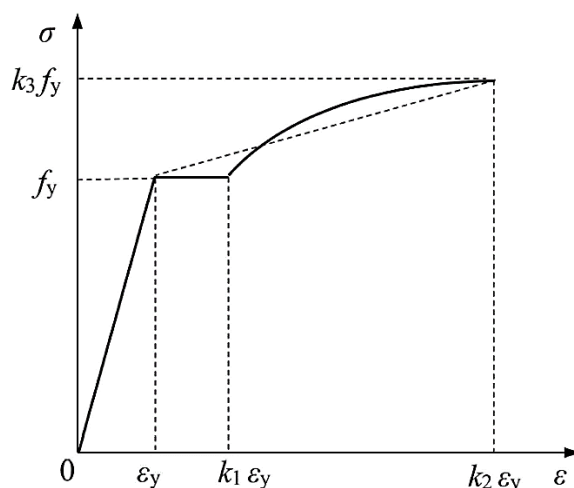
با توجه به اعلام خلاصه نتایج آزمایش کشش برای مصالح فولادی می‌توان با در دست داشتن این نتایج نمودار تنش-کرنش را ترسیم نمود. برای این کار به تنش تسلیم، مدول الاستیسته و حداکثر کرنش در لحظه گسیختگی نیاز است. با توجه به رابطه (۱) ارائه شده در [۳۴] رابطه بین ناحیه خطی، تسلیم شدگی و سخت شوندگی به سادگی توسط سه ضریب  $K_1$ ،  $K_2$  و  $K_3$  امکان‌پذیر است که با استفاده از رابطه ۱ می‌توان به سادگی آن را ترسیم کرد. شکل ۲ بیانگر رفتار شماتیک نمودار تنش کرنش معادل برای فولاد است.

$$\sigma = \begin{cases} E_s \varepsilon & , \varepsilon \leq \varepsilon_y \\ F_y & , \varepsilon_y < \varepsilon \leq K_1 \varepsilon_y \\ K_3 F_y + \frac{E_s(1-K_3)}{\varepsilon_y(K_2-K_1)^2} (\varepsilon - K_2 \varepsilon_y)^2 & , K_1 \varepsilon_y < \varepsilon \leq K_2 \varepsilon_y \end{cases} \quad (1)$$

در رابطه فوق  $E_s$  مدول الاستیسته فولاد،  $F_y$  تنش تسلیم فولاد،  $\varepsilon_y$  کرنش لحظه تسلیم،  $K_1$  نسبت کرنش شروع سخت شدگی فولاد به کرنش تسلیم،  $K_2$  نسبت کرنش حداکثر به کرنش تسلیم،  $K_3$  نسبت تنش حداکثر به تنش تسلیم است. مقادیر  $K_2$  و  $K_3$  از نتایج تجربی به دست می‌آید و برای مقدار  $K_1$  مقدار ۳ [۳۴] در نظر گرفته شده است.

<sup>1</sup>-Nonlinear Static Analysis

<sup>2</sup>-General static



شکل ۲- مدل رفتاری فولاد تا لحظه گسیختگی [۲۴]

با توجه به مقاومت فشاری بتن گزارش شده می‌توان به راحتی نمودار تنش کرنش بتن را تخمین و ترسیم نمود و از اطلاعات به دست آمده در مدل‌سازی عددی بهره جست. در این مطالعه از مدل Concrete damage plasticity برای مدل‌سازی بتن در ناحیه پلاستیک استفاده شده است. در ناحیه الاستیک رفتار بتن خطی و با تعریف مقادیر مدول الاستیسته و ضریب پواسون تعریف گردیده است. برای بتن در ناحیه فشاری از رابطه ۳ و بتن ناحیه کششی رابطه ۴ استفاده گردیده است. شکل ۳ رفتار بتن تحت کشش و فشار را نشان می‌دهد.

$$E = 9.5(f'_c + 8)^{1/3} \quad (۲)$$

$$\sigma_c = \left( \frac{kn - kn^2}{1 + (k-2)n} \right) f'_c \quad (۳)$$

$$\sigma_t = \begin{cases} E\varepsilon_t & \varepsilon_t \leq \varepsilon_{cr} \\ f_{cr} \left( \frac{\varepsilon_{cr}}{\varepsilon_t} \right)^{0.4} & \varepsilon_t > \varepsilon_{cr} \end{cases} \quad (۴)$$

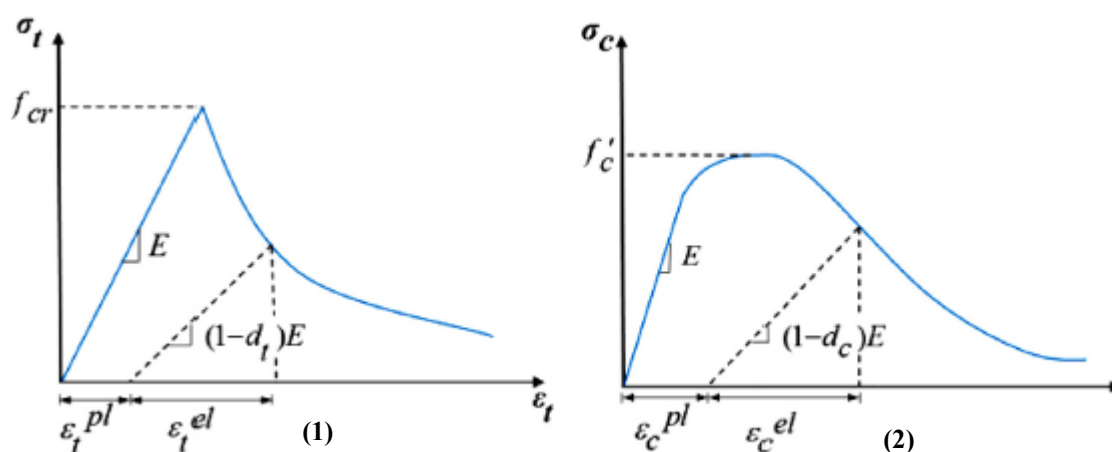
$$f_{cr} = 0.31 \sqrt{f'_c} \quad (۵)$$

$$\varepsilon_{cr} = \frac{f_{cr}}{E} \quad (۶)$$

$$d_c = 1 - \frac{\sigma_c}{E(\varepsilon_c - \varepsilon_p)} \quad (۷)$$

$$d_t = 1 - \frac{\varepsilon_{cr}}{\varepsilon_t} \quad (۸)$$

در روابط فوق E مدول الاستیسته بتن،  $f'_c$  مقاومت فشاری بتن،  $k = 1.16E \frac{\varepsilon_0}{f'_c}$ ،  $n = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0}$ ،  $\sigma_c$  تنش فشاری بتن،  $\varepsilon_0$  کرنش نظیر حداکثر تنش بتن،  $\sigma_t$  تنش کششی بتن،  $\varepsilon_t$  کرنش کششی بتن،  $f_{cr}$  حداکثر تنش کششی بتن،  $\varepsilon_{cr}$  کرنش ترک خوردگی بتن،  $d_c$  پارامتر خراب بتن تحت فشار و  $d_t$  پارامتر خرابی بتن تحت کشش می‌باشد [۲۵].



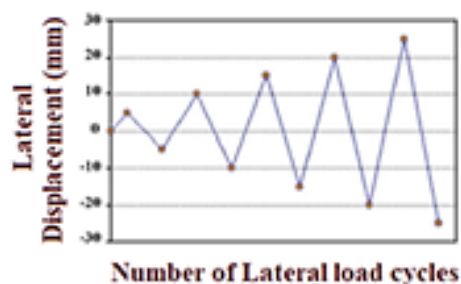
شکل ۳- رفتار بتن ۱- تحت کشش ۲- تحت فشار [۲۵]

### ۲-۳ صحت سنجی رفتار ستون با مقطع جدید UCFT

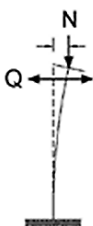
در این آزمایش از لوله فولادی به قطر داخلی ۲۵۴ میلی‌متر، ضخامت ۸ میلی‌متر و طول ۲۰۰۰ میلی‌متر به عنوان جداره خارجی ستون، قطر شبکه فولادی داخل هسته برابر ۲۲۷ میلی‌متر نزدیک به جداره خارجی، ابعاد شبکه فولادی ۲۵/۴ میلی‌متر، قطر مفتول ۳ میلی‌متر، مقاومت فشاری بتن ۳۲/۴ مگاپاسکال و تنش تسلیم فولاد جداره خارجی و شبکه به ترتیب برابر ۳۳۷ و ۳۲۶ مگاپاسکال می‌باشد. شکل ۴ تصاویر آزمایشگاهی نمونه UCFT شکل ۵ تاریخچه بارگذاری چرخه‌ای و شکل ۶ نحوه اعمال شرایط مرزی را نشان می‌دهد [۲۶].



شکل ۴- نمونه‌های آزمایشگاهی UCFT [۲۶]

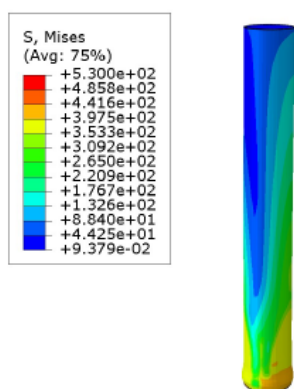


شکل ۵- تاریخچه بار چرخه‌ای نمونه UCFT [۲۶]

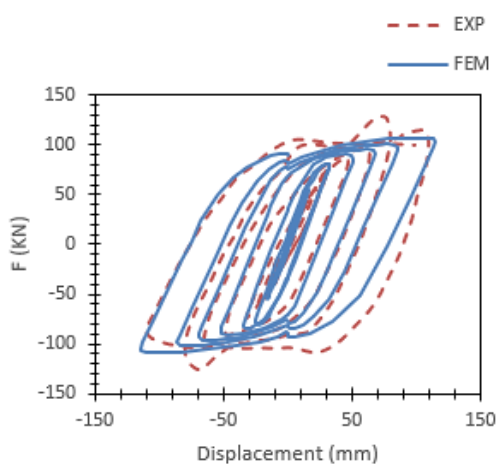


شکل ۶- شرایط مرزی نمونه UCFT [۲۶]

جهت مدل‌سازی عددی نمونه آزمایشگاهی UCFT برای بتن و فولاد جداره خارجی از المان‌های مکعبی سه بعدی (C38DR) و برای فولاد جداره داخلی به صورت معادل از المان (T3D2) Wire استفاده شده است. همچنین جداره خارجی در داخل بتن با استفاده از دستور Embedded region مدفون گردیده و در ناحیه اتصال بتن به فولاد از اندرکنش node-to-surface contact با Hard contact و penalty mode با ضریب اصطکاک ۰/۶ استفاده شده است [۲۶]. شکل ۷ کانتور تنش حاصل از تحلیل عددی برای نمونه UCFT و شکل ۸ نمودار چرخه‌ای حاصل از تحلیل عددی در مقایسه با نمونه آزمایشگاهی UCFT را نشان می‌دهد. ماکزیمم مقدار لنگر حاصل از تحلیل اجزا محدود در جهت‌های مثبت و منفی به ترتیب ۱۰۷ کیلونیوتن و ۱۰۹ کیلونیوتن است که به ترتیب ۳ و ۲ درصد کمتر از نتایج آزمایشگاهی در جهت‌های مثبت و منفی می‌باشد. همانگونه که مشاهده می‌شود، نتیجه حاصل نزدیک به واقعیت بوده و در نتیجه می‌توان از مدل‌سازی عددی برای تخمین رفتار دیگر نمونه‌ها استفاده نمود.

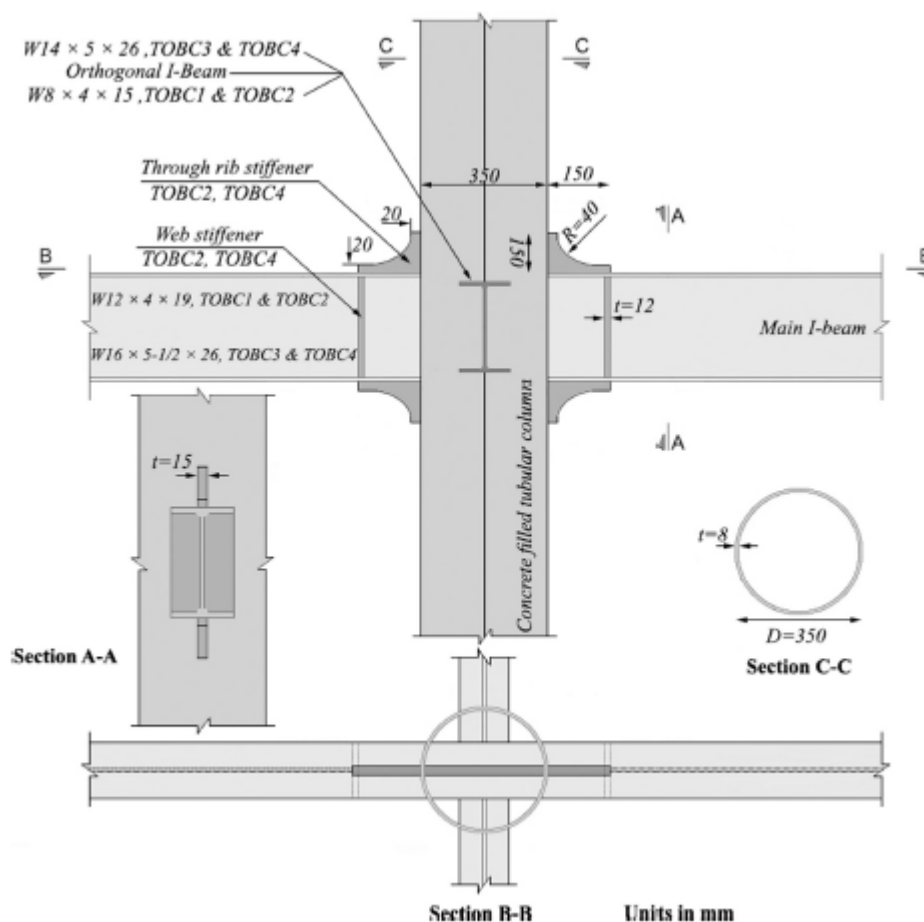


شکل ۷ کانتور تنش حاصل از تحلیل عددی نمونه UCFT



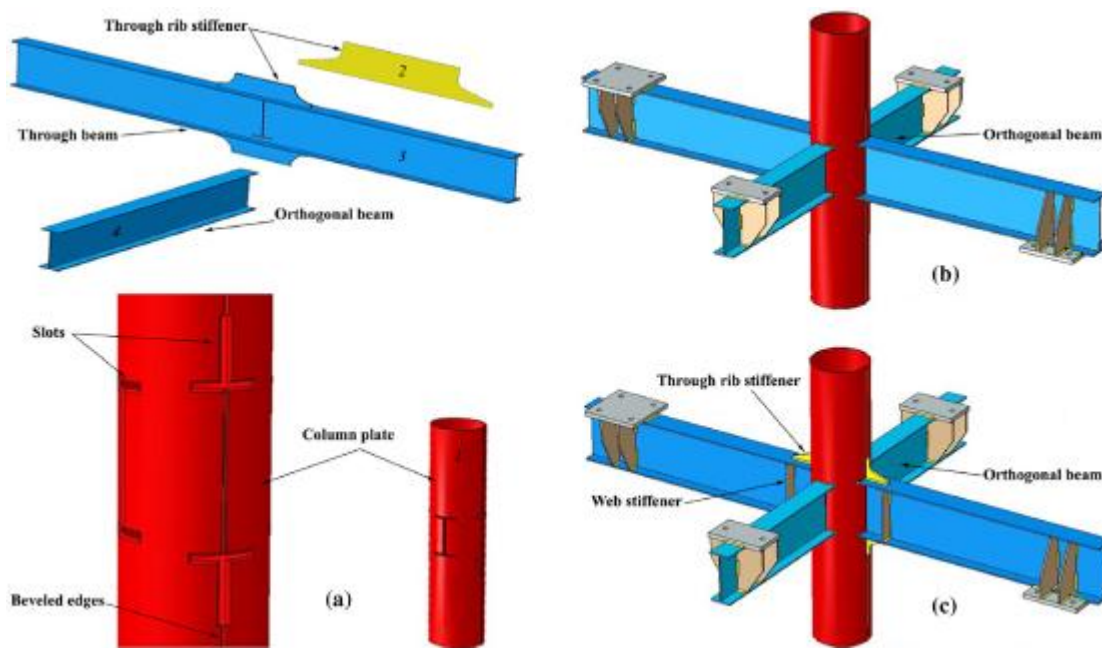
شکل ۸- نمودار چرخه‌ای حاصل از تحلیل عددی با در مقایسه با نمونه آزمایشگاهی UCFT

در قدم بعدی نمونه آزمایشگاهی که توسط جدی و همکاران [۱۸] برای اتصال تیر به ستون فولادی انجام یافته مدلسازی و نتایج با یکدیگر مقایسه شده است. در این آزمایش بعد از تحلیل و طراحی نمونه‌ها، چهار نمونه با مقیاس یک دوم در آزمایشگاه تحت بارگذاری رفت و برگشتی استاتیکی مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. از جمله پارامترهای مورد ارزیابی در بررسی رفتار اتصال تیر به ستون فولادی پر شده با بتن معرفی شده، می‌توان به بررسی مد شکست اتصال، کاهش سختی، کاهش مقاومت، شکل‌پذیری و جذب انرژی اشاره نمود. مشخصات هندسی برای نمونه TOPC1 و TOPC2 از مقطع  $W12 \times 4 \times 19$  برای تیر اصلی و  $W8 \times 4 \times 15$  برای تیر فرعی و نمونه TOPC3 و TOPC4 از مقطع  $W16 \times 5 - 1/2 \times 26$  برای تیر اصلی و  $W14 \times 5 \times 26$  برای تیر فرعی مطابق شکل ۹ استفاده شده است. در تمامی نمونه‌ها ارتفاع ستون و طول تیر اصلی و فرعی به ترتیب برابر ۱۹۱۰ میلی‌متر، ۳۵۰۰ میلی‌متر و ۲۵۰۰ میلی‌متر است. قطر خارجی ستون فولادی پر شده با بتن برابر ۳۵۰ میلی‌متر با ضخامت جداره ۸ میلی‌متر می‌باشد. نمونه TOPC2 همان TOPC1 است با این تفاوت که مطابق شکل ۱۰ سخت‌کننده در بالای تیر و در داخل ستون مدفون<sup>۱</sup> شده و سخت‌کننده جان تیر به آن نمونه اضافه گردیده است. در نمونه TOPC3 و TOPC4 نیز همین اتفاق افتاده است. مشخصات هندسی و مکانیکی مصالح به ترتیب در جدول‌های شماره ۱ و ۲ آورده شده است.



شکل ۹- جزئیات اتصال مورد استفاده در آزمایش [۱۸]

<sup>1</sup> Through rib stiffener



شکل ۱۰- جزئیات مربوط به اجرای سخت کننده ها در مدل‌های آزمایش شده [۱۸]

جدول ۱- مشخصات هندسی تیرها [۱۸]

نمونه	مقطع	ارتفاع $h_b$ (mm)	عرض تیر $b_w$ (mm)	ضخامت جان $t_w$ (mm)	ضخامت بال $t_f$ (mm)	اساس مقطع $S_x$ (mm <sup>3</sup> )	سطح مقطع $A_s$ (mm <sup>2</sup> )
TOBC1,2	W 12 × 4 × 19	۳۹۹۳/۵	۳۴۹۰/۴۴/۵	۹/۵۹	۶/۳۵	۱۰۱/۶	۳۰۸
TOBC1,2	W 8 × 4 × 15	۲۸۳۸/۷	۱۹۳۳۶۷/۴	۷/۹۴	۶/۳۵	۱۰۱/۶	۲۰۶/۴
TOBC3,4	W 16 × 5-1/2 × 26	۴۹۵۴/۸	۶۲۹۲۶۳/۳	۹/۵۲	۶/۳۵	۱۳۹/۷	۴۰۰
TOBC3,4	W 14 × 5 × 26	۴۹۶۱/۳	۵۷۸۴۶۳/۴	۱۱/۱	۶/۳۵	۱۲۷	۳۵۲/۴

جدول ۲- مشخصات مکانیکی مصالح مورد استفاده در نمونه های آزمایشگاهی [۱۸]

محل نمونه	مقاومت تسلیم (N/mm <sup>2</sup> )	مقاومت نهایی (N/mm <sup>2</sup> )	(%) تغییر طول نسبی	
W 12 × 4 × 19	Flange	۳۰۱/۷۳	۴۳۵/۲۶	۲۸/۱۳
	Web	۳۲۲/۸۳	۴۴۸/۴	۲۸/۵۸
W 8 × 4 × 15	Flange	۲۸۹/۹	۴۲۴/۳۴	۲۸/۸۲
	Web	۳۳۱/۶	۴۴۳	۲۶
W 16 × 5-1/2 × 26	Flange	۲۸۸/۴۷	۴۲۶/۵	۲۸/۶
	Web	۲۹۱/۳۱	۴۲۶/۷۵	۲۶/۷۶
W 14 × 5 × 26	Flange	۳۱۳/۵۵	۴۴۶/۱۸	۲۷/۴۴
	Web	۳۸۰/۶۸	۴۵۳/۸۷	۲۲/۶
Column	Plate	۳۴۰/۲۲	۴۹۴/۸۹	۲۴/۰۴
Through rib stiffener	Plate	۳۳۱/۵	۴۷۸/۵	۲۶/۳
Web stiffener	Plate	۳۳۱/۵	۴۷۸/۵	۲۶/۳

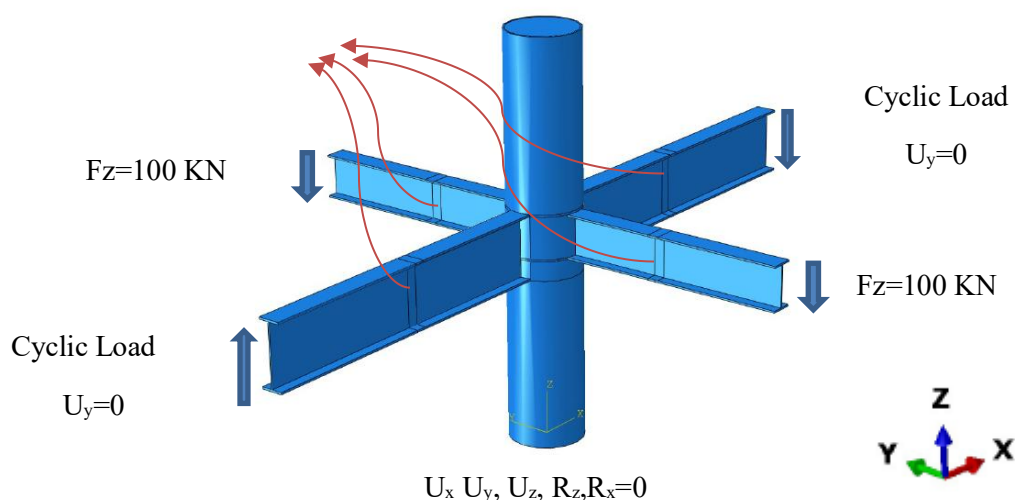
جدول ۳ مشخصات مکانیکی بتن [۲۵]

مقدار	مشخصات مکانیکی
۴۰ GPa	مدول الاستیسیته
۰/۲	ضریب پواسون
۰/۲۲۰۰	$\epsilon_0$
۰/۳۵۰۰	کرنش در لحظه شکست
۴۰	زاویه اتساع
۰/۱	برون محوری
۱/۱۶	$f_{b0}/f_{c0}$
۰/۱۶۷	$K_b$
۰/۰۰۰۱	پارامتر ویسکوزیته

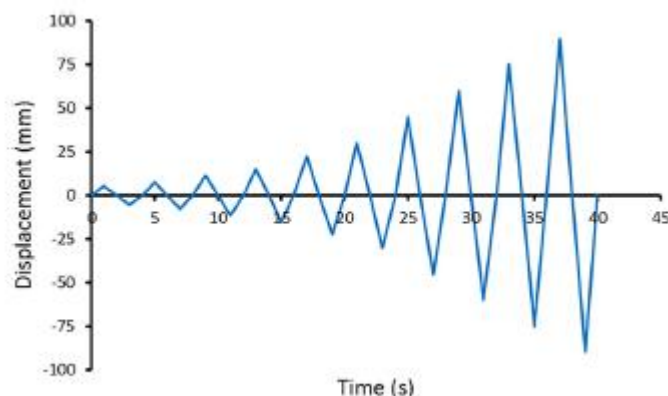
جدول ۳ زاویه اتساع پارامتری بر حسب درجه که به میزان تراکم و زاویه اصطحاک داخلی مصالح بستگی دارد. برون محوری خروج از مرکزیت نشان دهنده نرخ نزدیک شدن جریان هذلولی به مجانب آن است.  $f_{b0}/f_{c0}$  نسبت عملکرد تنش اولیه فشاری دو محوری به تنش اولیه فشاری تک محوره است.  $K$  نسبت تنش دوم کششی به فشاری می‌باشد.

با توجه به اجرای ناحیه اتصال به صورت جوشی و جهت یکپارچه سازی اجزا از اندرکنش tie برای اتصالات جوشی با فرض عدم وجود ایراد و نقصی در ناحیه جوش استفاده شده است. برای مدلسازی تمامی اجزا، از المان‌های Solid (C3D8R) استفاده شده است. از مش ریز با اندازه‌ی ۲۰ میلی‌متر برای ستون و بخش‌هایی از تیر اصلی در مناطق پرخطر (بر اتصال تا تکیه‌گاه جانبی تیر اصلی) استفاده شده است. در حالی که سایر قسمت‌ها با مش درشت‌تر به اندازه‌ی ۶۰ میلی‌متر مدلسازی شده تا زمان تحلیل کاهش یابد [۲۵]. شکل ۱۱ شرایط مرزی اعمالی مطابق شرایط آزمایشگاهی همچنین نحوه بارگذاری نمونه عددی را نشان می‌دهد. شکل ۱۲ نحوه اعمال بارگذاری چرخه‌ای را نشان می‌دهد [۱۸-۳۵-۳۶].





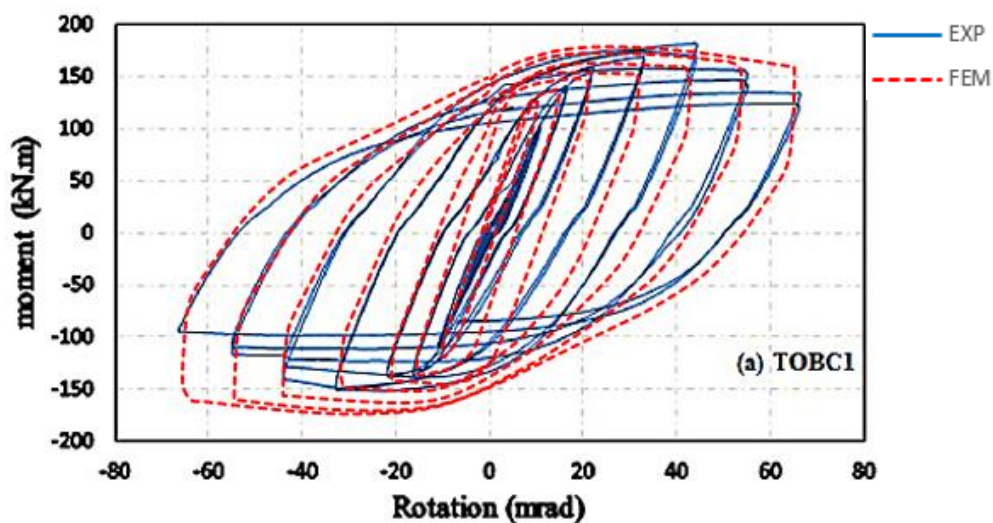
شکل ۱۱- نحوه اعمال شرایط مرزی مطابق شرایط آزمایشگاهی



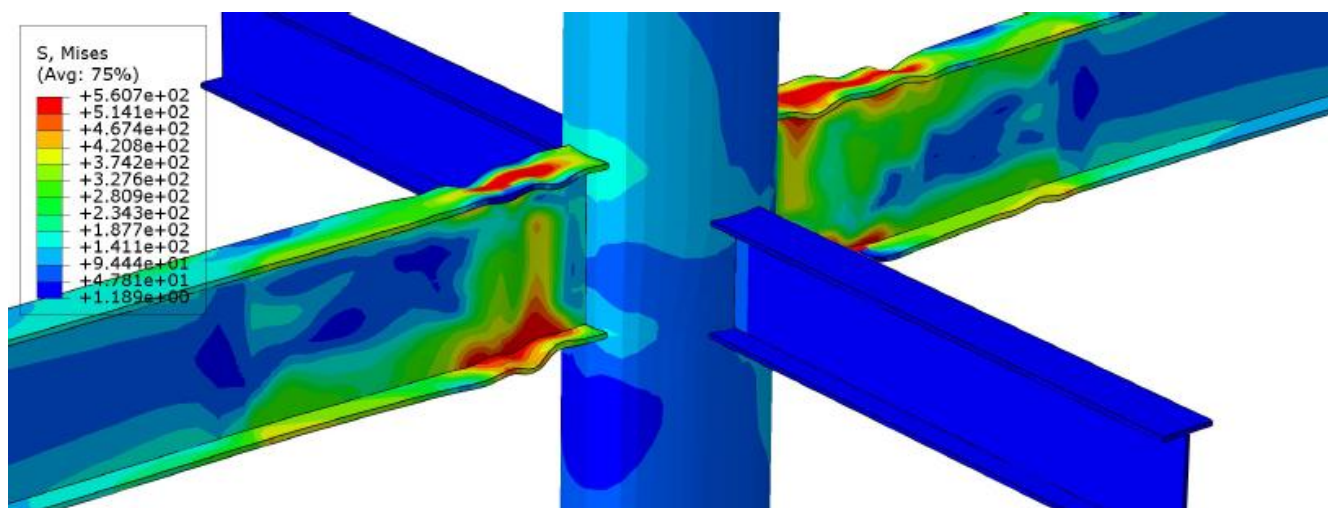
شکل ۱۲- نمودار بارگذاری چرخه‌ای [۲۵]

شکل ۱۳ نمودار لنگر-دوران حاصل از تحلیل عددی در مقایسه با نمونه تجربی تحت بارگذاری رفت و برگشتی را نشان داده است. شکل ۱۴ کانتور تنش تحت بار رفت و برگشتی نمونه عددی در آخرین سیکل بارگذاری را نشان می‌دهد. شکل ۱۵ خرابی حاصله در نمونه آزمایشگاهی را نشان می‌دهد که در تصویر مفصل پلاستیک، کمانش و خرابی ایجاد شده در بال تیر قابل مشاهده است. در نتایج گرافیکی عددی نیز این خرابی‌ها نیز قابل مشاهده هستند. با توجه به نتایج حاصله از تحلیل عددی و نتایج آزمایشگاهی می‌توان گفت نتایج مدلسازی اجزا محدود نزدیک به آزمایشگاهی است. ماکزیمم مقدار لنگر حاصل از تحلیل اجزا محدود در جهت‌های مثبت و منفی به ترتیب ۱۷۵/۵۶ کیلونیوتن‌متر و ۱۶۴/۰۳ کیلونیوتن‌متر است که به ترتیب ۳/۸۸ و ۷/۹۱ کمتر و بیشتر از نتایج آزمایشگاهی در جهت‌های مثبت و منفی می‌باشد.

از علل اختلاف بین نتایج مدل عددی و آزمایشگاهی می‌توان به عدم تعریف مکانیزم شکست فولاد، متفاوت بودن شرایط مرزی آزمایشگاه و مدل عددی و عدم تطابق دقیق پارامترهای آسیب بتن اشاره نمود. با این حال، مقایسه نتایج، نشان‌دهنده دقت قابل قبول تحلیل اجزا محدود در پیش‌بینی منحنی لنگر-دوران است.



شکل ۱۳- نمودار لنگر-دوران حاصل از تحلیل عددی در مقایسه با نمونه تجربی تحت بارگذاری رفت و برگشتی برای نمونه TOBC1



شکل ۱۴- کانتور تنش تحت بار رفت و برگشت نمونه عددی



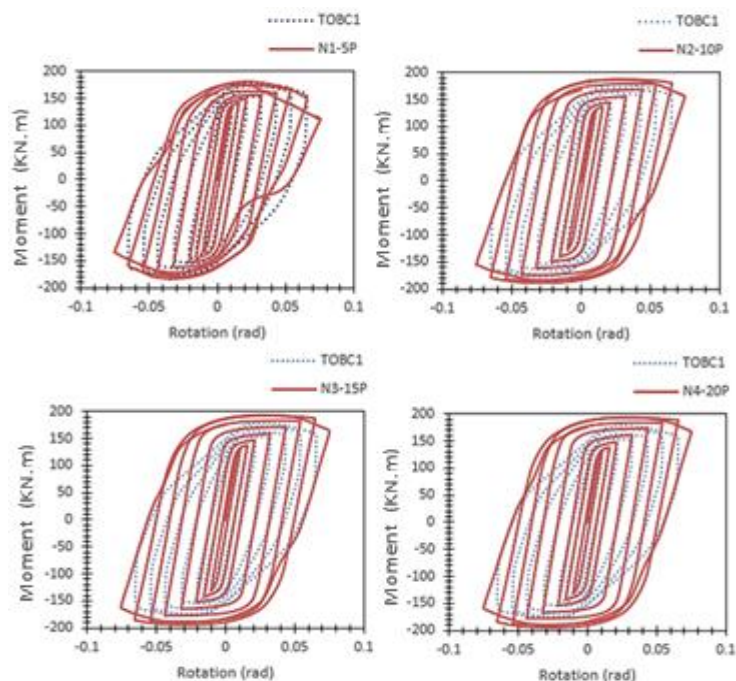
شکل ۱۵- عکس‌های گرفته شده از نمونه TOBC1

## ۴- نتایج افزایش سطح مقطع ستون در ناحیه اتصال

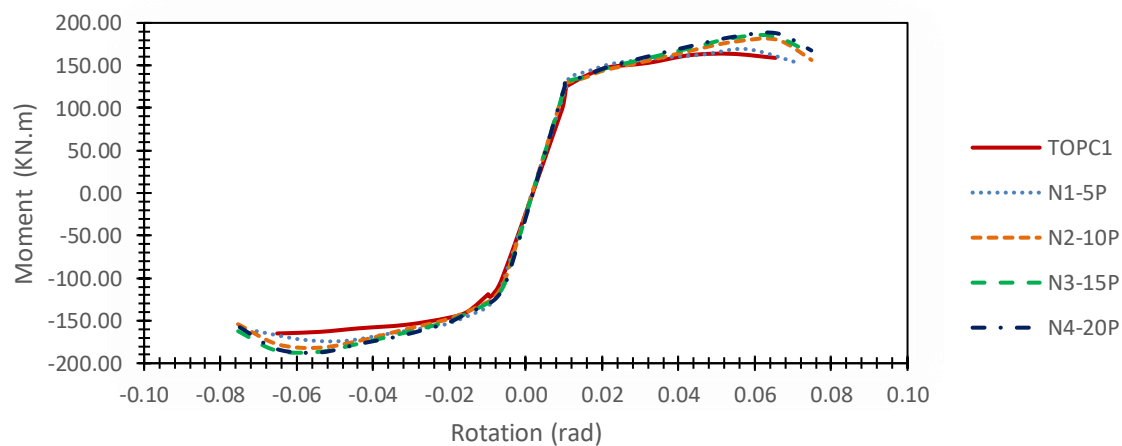
به منظور ارزیابی بهتر نتایج، از مقاطع مورد استفاده در نمونه صحت سنجی استفاده شده است تا بتوان تغییرات در نتایج را با نمونه اولیه مقایسه و تفسیر نمود. شرایط مرزی مطابق با شرایط تعریف شده در نمونه صحت سنجی است. در مرحله اول، تغییرات در ناحیه اتصال با افزایش سطح مقطع به میزان ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد بعد ستون صورت گرفته است. بعد ستون در مقطع اولیه خود برابر ۳۵۰ میلیمتر و در ناحیه افزایش یافته مقطع برابر ۳۶۷/۵، ۳۸۵، ۴۰۲/۵ و ۴۲۰ میلیمتر است. با توجه به استفاده از تغییر مقطع به صورت گلدانی در ناحیه اتصال از شیب ۱ به ۶ برای تغییر مقطع استفاده شده است. ضخامت جداره ستون افزایش نیافته است. در این ۴ مدل از هیچ سخت کننده‌ای استفاده نگردیده است. نمونه تحت بارگذاری رفت و برگشتی قرار گرفته و نتایج لنگر-دوران برای این چهار نمونه در مقایسه با نمونه صحت سنجی شده در شکل ۱۶ نشان داده شده است. شکل ۱۷ نمودار لنگر حداکثر هر چرخه-دوران را برای نمونه‌های N1-5P، N2-10P، N3-15P و N4-20P در مقایسه با نمونه TOPC1 و شکل ۱۸ کانتور تنش نمونه‌های N1-5P، N2-10P، N3-15P و N4-20P تحت بار رفت و برگشتی در آخرین سیکل بارگذاری را نشان داده است. همانگونه که در شکل ۱۸ مشاهده می‌گردد بیشترین تنش ایجاد شده در بال‌های تیر بوده که باعث کماتش موضعی در قسمت‌هایی از بال و جان تیر شده است. در هیچ قسمت از جان ستون در ناحیه چشمه اتصال مقدار تنش از حد تسلیم فراتر نرفته است. با توجه به نمودار لنگر-دوران نمونه‌ها مشاهده می‌شود که رفتار آن‌ها تقریباً پایدار و یکنواخت بوده و از میزان جذب انرژی و مقاومت بیشتری در مقایسه با نمونه صحت سنجی برخوردار است. مقادیر حداکثر لنگر خمشی  $M_{max}$ ، دوران حداکثر  $R_{max}$ ، سطح زیر منحنی لنگر دوران  $S$  و سختی دورانی  $K$  نمونه‌ها در جدول ۴ آورده شده است. نمونه‌های N1-5P، N2-10P، N3-15P و N4-20P در مقایسه با نمونه صحت سنجی دچار لاغر شدگی کمتری شده است. شکل ۱۹ برش از داخل چشمه اتصال و همین‌طور بتن و جداره فولادی وتیرهای عبوری را به صورت مقایسه‌ای برای نمونه TOPC1 و N2-10P را نشان می‌دهد. با توجه به شکل افزایش فاصله مفصل پلاستیک از بر ستون در نمونه دارای افزایش سطح مقطع در ناحیه اتصال ملموس می‌باشد.

جدول ۴ حداکثر لنگر خمشی، دوران، سطح زیر منحنی لنگر دوران و سختی

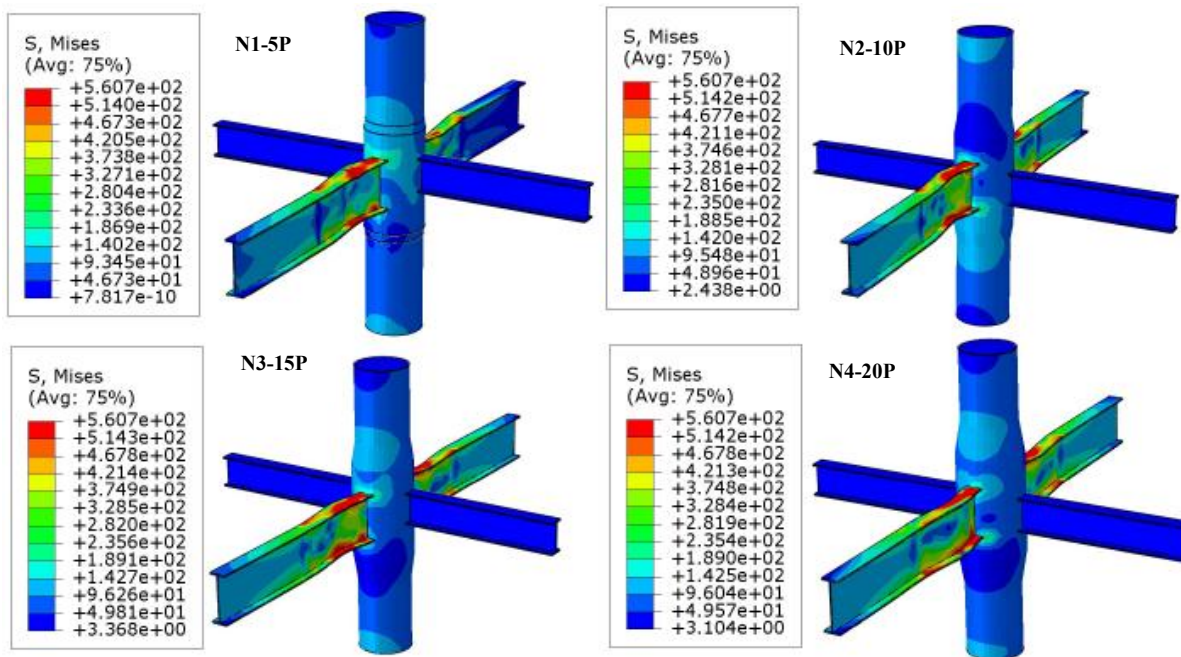
	TOPC1	N1-5P	N2-10P	N3-15P	N4-20P
Mmax (Kn.m)	۱۶۳/۶۳	۱۶۹/۲۸	۱۸۰/۴۰	۱۸۴/۷۴	۱۸۷/۹۷
Rmax (rad)	۰/۰۵۴	۰/۰۵۸	۰/۰۶۶	۰/۰۶۵	۰/۰۶۵
S(Kn.m.rad)	۱۰۸/۰۴	۱۵۵/۶۲	۱۷۳/۲۹	۱۷۸/۳۱	۱۷۹/۷۲
K(Kn.m/rad)	۱۰۶۱۵/۴۷	۱۱۵۴۰/۸۶	۱۱۵۴/۸۰	۱۱۹۹۶/۶۴	۱۲۰۹۵/۰۱



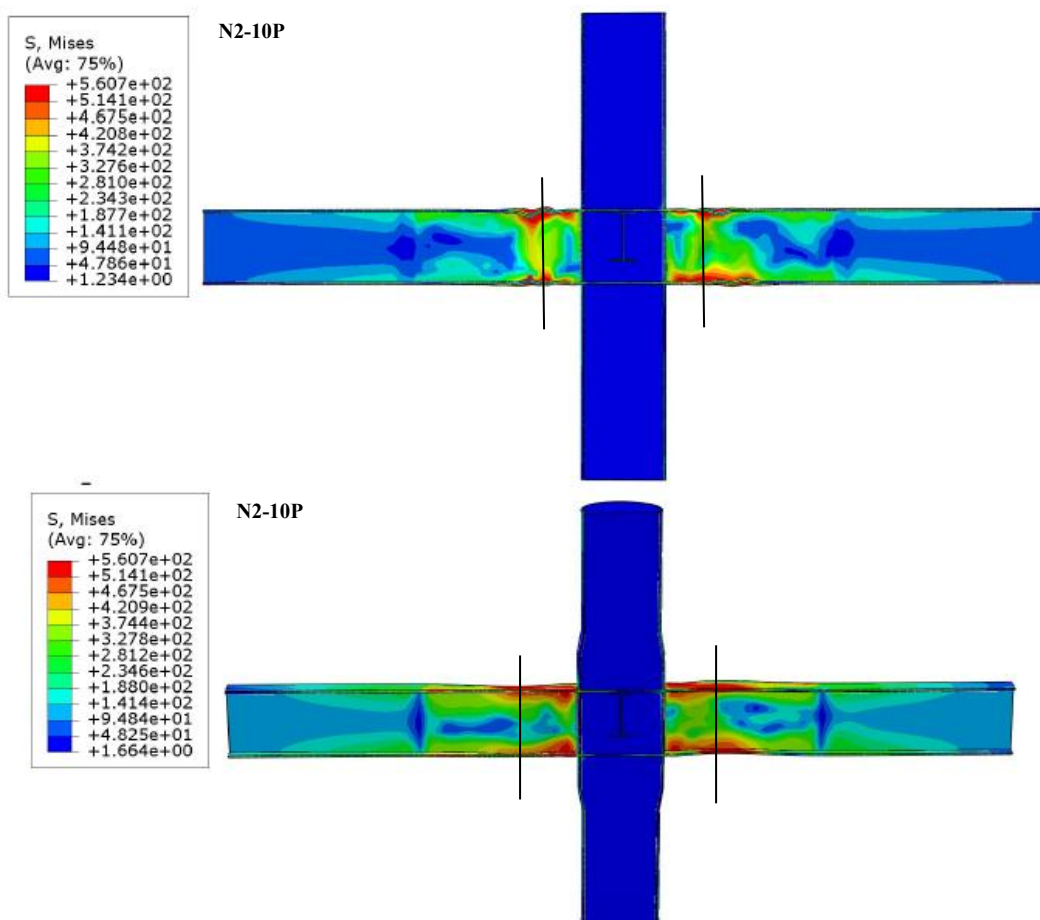
شکل ۱۶- نتایج لنگر دوران برای نمونه های N1-5P، N2-10P، N3-15P و N4-20P در مقایسه با نمونه TOBC1



شکل ۱۷- نمودار لنگر حداکثر هر چرخه-دوران را برای نمونه های N1-5P، N2-10P، N3-15P و N4-20P در مقایسه با نمونه TOPC1



شکل ۱۸- کانتور تنش نمونه های N1-5P، N2-10P، N3-15P و N4-20P تحت بار رفت و برگشتی



شکل ۱۹- فاصله مفصل پلاستیک از بر ستون نمونه TOPC1 و N2-10P

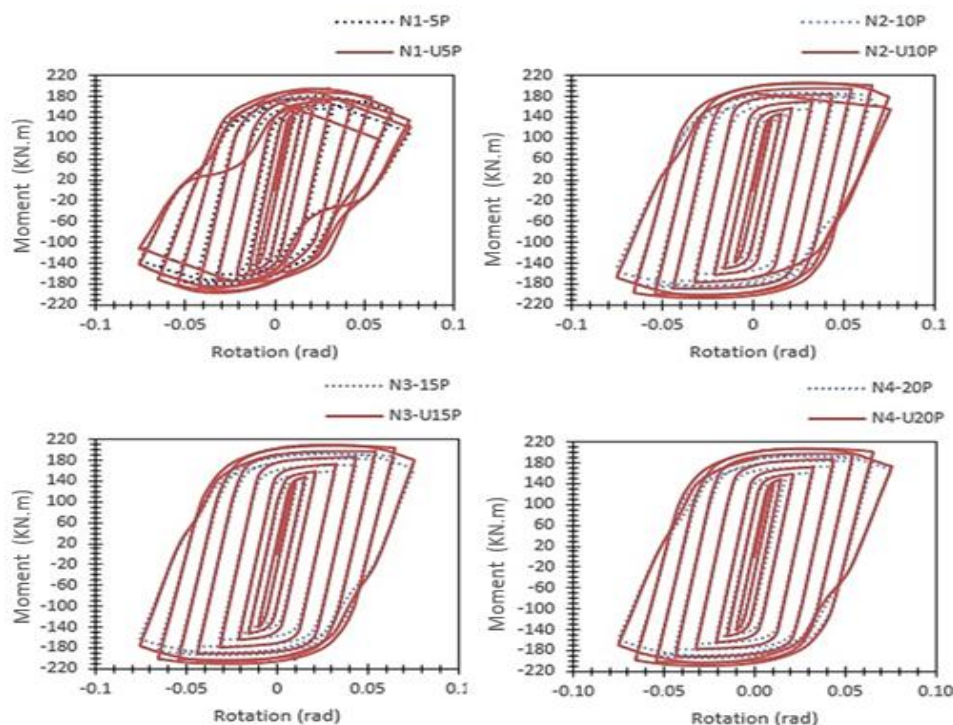
## ۵- استفاده از شبکه فولادی جداره داخلی نزدیک به ستون

قدم بعدی استفاده از سطح مقطع UCFT برای نمونه‌های ذکر شده می‌باشد. در نمونه‌ها از جداره فولادی داخلی به فاصله ۱۳/۵ میلیمتر از جداره خارجی، شبکه‌های فولادی ۲۵/۴ میلیمتر، قطر مفتول ۳ میلیمتر استفاده گردیده است. نتایج لنگر-دوران برای نمونه‌های N1-U5P، N2-U10P، N3-U15P و N4-U20P در مقایسه با نمونه‌های N1-5P، N2-10P، N3-15P و N4-20P بدون شبکه فولادی در نزدیکی جدار خارجی در شکل ۲۰ شان داده شده است. شکل ۲۱ نمودار لنگر حداکثر هر چرخه-دوران و شکل ۲۲ کانتر تنش برای این ۴ نمونه را نشان می‌دهد.

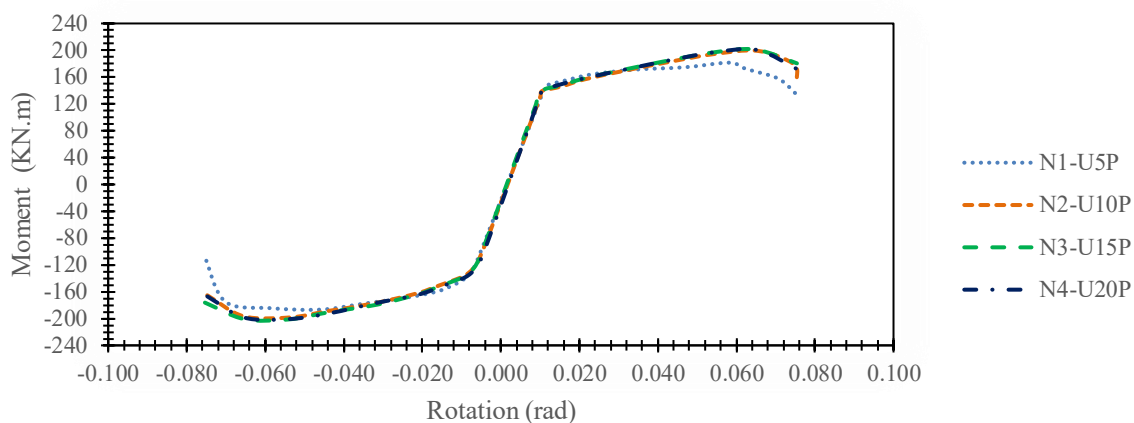
همانگونه که در شکل ۲۲ مشاهده می‌شود بیشترین تنش ایجاد شده در بال‌های تیر می‌باشد که باعث کمانش موضعی در قسمت‌هایی از بال و جان تیر شده است. در هیچ قسمت از جان ستون در ناحیه چشمه اتصال مقدار تنش از حد تسلیم فراتر نرفته است. با توجه به نمودار لنگر-دوران نمونه‌ها مشاهده می‌شود که رفتار آن‌ها پایدار و یکنواخت بوده و از میزان جذب انرژی، مقاومت و سختی بیشتری در مقایسه نمونه‌ها با نمونه بدون شبکه فولادی در جدار خارجی برخوردار است. مقادیر لنگر بیشینه  $M_{max}$ ، دوران بیشینه  $R_{max}$ ، سطح زیر منحنی لنگر دوران S و سختی دورانی K نمونه‌ها در جدول ۵ آورده شده است.

جدول ۵ لنگر بیشینه، دوران، سطح زیر منحنی لنگر دوران و سختی

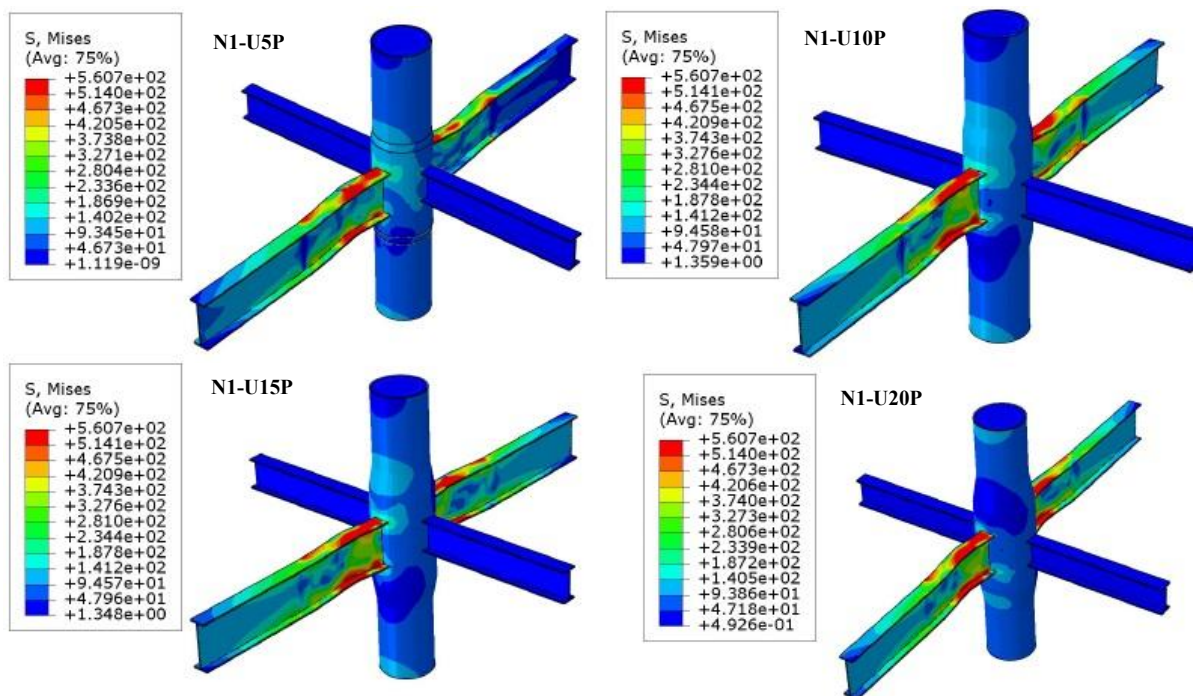
	N1-U5P	N2-U10P	N3-U15P	N4-U20P
$M_{max}$ (KN.m)	۱۸۱/۵۲	۱۹۹/۱۰	۲۰۱/۱۰	۲۰۲/۵۲
$R_{max}$ (rad)	۰/۰۵۸	۰/۰۶۶	۰/۰۶۵	۰/۰۶۵
S(KN.m.rad)	۲۱۳/۸۲	۲۲۰/۴۷	۲۲۰/۹۵	۲۲۰/۹۸
K(KN.m/rad)	۱۲۴۵/۵۷	۱۲۵۴۸/۱۷	۱۲۹۰۸/۳۹	۱۳۰۵۳/۴۷



شکل ۲۰- نتایج لنگر-دوران برای نمونه‌های با ستون ارتقا یافته در مقایسه نمونه با ستون‌های فولادی پر شده با بتن شده متوال



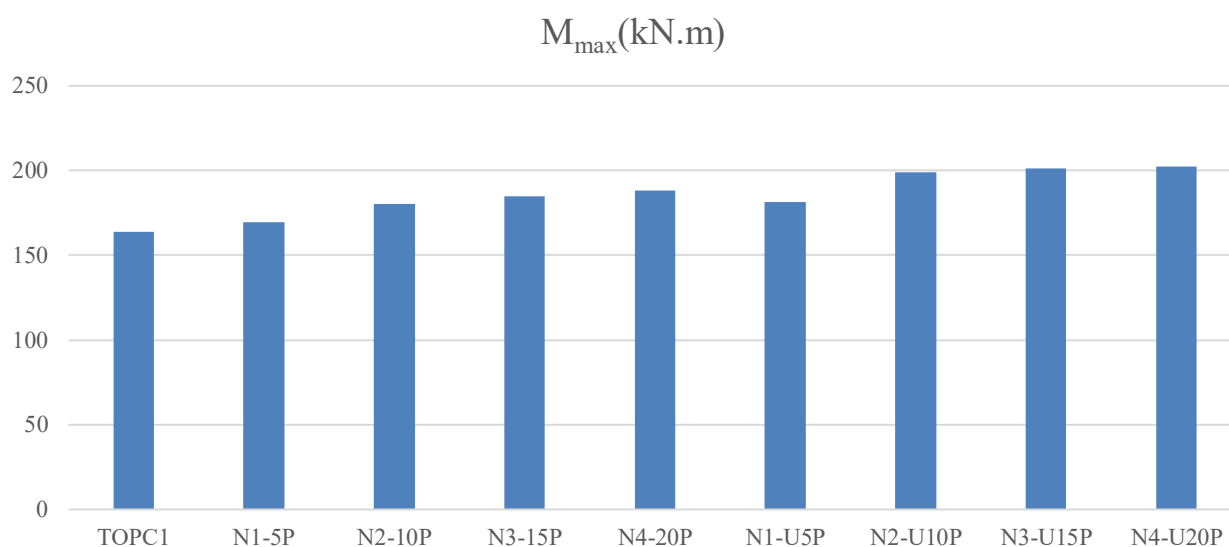
شکل ۲۱- نمودار لنگر حداکثر هر چرخه-دوران هر چرخه نمونه‌های N1-U5P، N2-U10P، N3-U15P و N4-U20P



شکل ۲۲- کانتور تنش نمونه‌های N1-U5P، N2-U10P، N3-U15P و N4-U20P

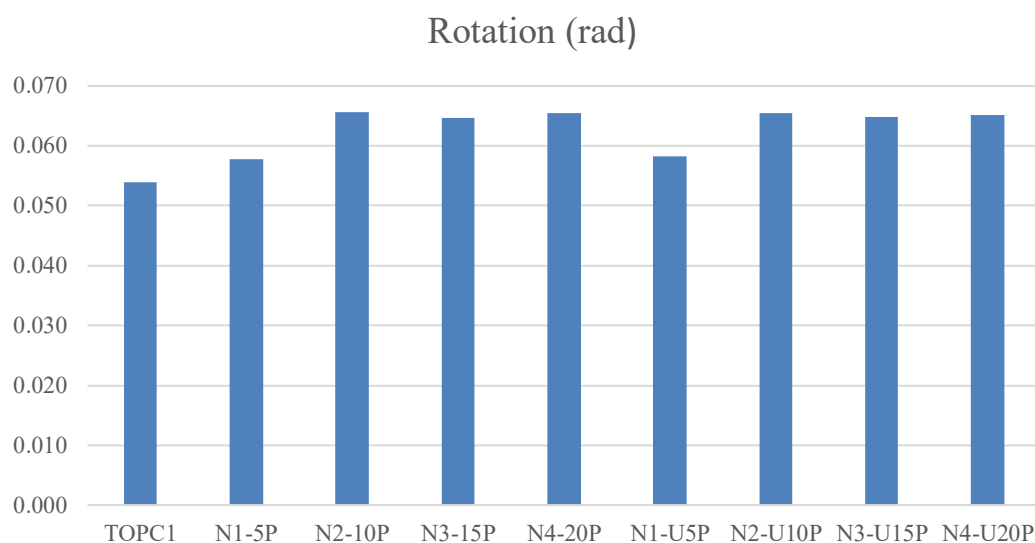
## ۶- بررسی کلی نتایج

به منظور بررسی بهتر مقادیر به دست آمده از تحلیل عددی نتایج در نمودارهای میله‌ای مقایسه گردیده است. شکل ۲۳ نمودار میله‌ای برای ۸ نمونه عددی را نشان داده که مشاهده می‌شود با افزایش سطح مقطع در ناحیه اتصال، میزان لنگر حداکثر نسبت به نمونه بدون افزایش سطح مقطع (TOPC1)، افزایش یافته است. به هنگام استفاده از ستون با مقطع ارتقا یافته نسبت به ستون بدون شبکه فولادی نیز با افزایش لنگر حداکثر همراه بوده است. افزایش مقاومت اتصال تحت بار رفت و برگشتی به ترتیب برای نمونه‌های N1-5P، N2-10P، N3-15P و N4-20P برابر ۳/۴۵، ۱۰/۲۵، ۱۲/۹ و ۱۴/۸۸ درصد افزایش نسبت به نمونه (TOPC1) می‌باشد. افزایش مقاومت برای نمونه‌های N1-U5P، N2-U10P، N3-U15P و N4-U20P به ترتیب برابر ۷/۲۳، ۱۰/۳۶، ۸/۸۶ و ۷/۷۴ درصدی نسبت به نمونه بدون شبکه فولادی نزدیک به جداره است.



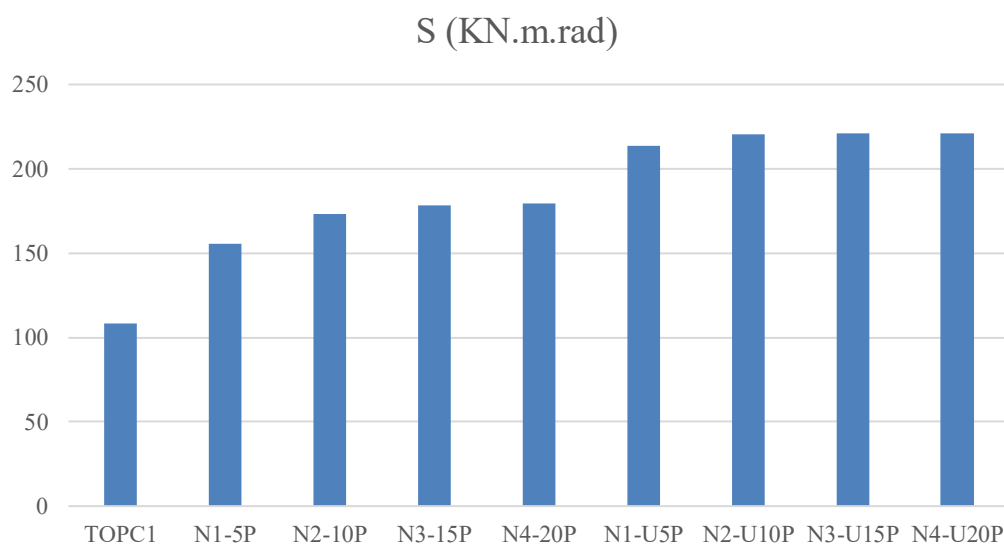
شکل ۲۳ نمودار میله‌ای لنگر بیشینه برای نمونه‌های عددی

شکل ۲۴ به صورت نمودار میله‌ای مقدار دوران متناظر با لنگر بیشینه را نشان می‌دهد. همانگونه که ملاحظه می‌گردد با افزایش سطح مقطع به میزان ۱۰ درصد روند صعودی و از این مقدار به بعد کاهش یافته و تقریباً ثابت مانده است. شاهد افزایش میزان دوران در نقطه نظیر حداکثر لنگر می‌باشیم. این افزایش تا ۱۰ درصد افزایش در مقطع صعودی و از این مقدار به بعد نزولی می‌باشد که میزان افزایش در دوران حداکثر برای نمونه‌های N1-5P، N2-10P، N3-15P و N4-20P نسبت به نمونه صحت سنجی شده به ترتیب برابر ۷/۰۹، ۲۱/۶۰، ۱۹/۷۹ و ۲۱/۳۱ درصد می‌باشد. لازم به توضیح می‌باشد چون ناحیه اتصال تقویت شده و مقطع تیر ثابت است و تغییر شکل نهایی سیستم شامل تغییر شکل ستون، گره اتصال و تیر می‌باشد با تقویت ناحیه اتصال سهم جذب بار توسط تیر افزایش یافته و مفصل پلاستیک در آن سریعتر رخ می‌دهد. بنابراین مناسب‌ترین مقدار برای افزایش سطح مقطع در ناحیه اتصال ۱۰ درصد توصیه می‌گردد. استفاده از مقطع ارتقاء یافته بر روی پارامتر دوران در نقطه نظیر حداکثر لنگر، نسبت به ستون بدون شبکه فولادی نزدیک جداره شاهد تغییرات چشمگیری نمی‌باشد.



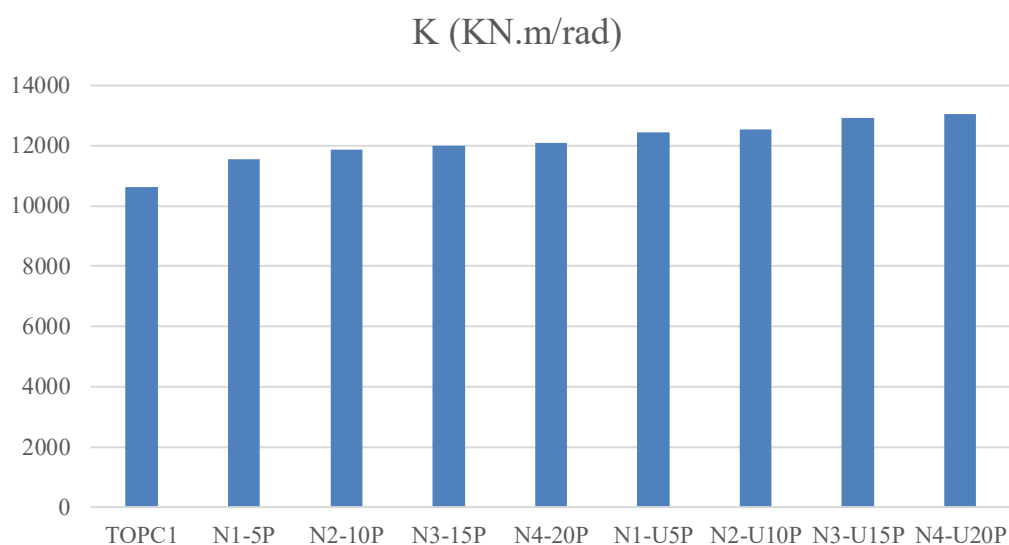
شکل ۲۴ نمودار میله‌ای دوران متناظر با لنگر بیشینه برای نمونه‌های عددی

شکل ۲۵ نمودار میله‌ای سطح زیر منحنی لنگر-دوران برای ۸ نمونه عددی رانشان می‌دهد همانگونه که ملاحظه می‌گردد با افزایش سطح مقطع در ناحیه اتصال، سطح زیر منحنی لنگر-دوران افزایش یافته به عبارتی دیگر میزان انرژی مستهلک شده افزایش یافته است. همچنین استفاده از ستون با سطح مقطع ارتقا یافته نسبت به ستون بدون شبکه فولادی نزدیک به جداره از جذب انرژی بالاتری برخوردار می‌باشد. نمونه‌های N1-5P, N2-10P, N3-15P, N4-20P در مقایسه با نمونه صحت سنجی دچار لاغر شدگی کمتری شده است. به عبارتی افزایش سطح زیر منحنی لنگر-دوران ۴۴/۰۴، ۶۰/۳۹، ۶۵/۰۴ و ۶۶/۳۴ درصد نسبت به نمونه TOC1 می‌باشد. سطح زیر منحنی لنگر-دوران برای نمونه‌های N1-U5P, N2-U10P, N3-U15P و N4-U20P در مقایسه با نمونه بدون شبکه فولادی در نزدیکی جداره افزایش ۳۷/۳۹، ۲۷/۲۳، ۲۳/۹۱ و ۲۲/۹۶ درصدی را داشته است.



شکل ۲۵ نمودار میله‌ای سطح زیر منحنی لنگر-دوران برای نمونه‌های عددی

شکل ۲۶ نمودار میله‌ای سختی دوران برای ۸ نمونه عددی را نشان می‌دهد. همانگونه که مشاهده می‌شود با افزایش سطح مقطع در ناحیه اتصال شاهد افزایش سختی و همچنین با استفاده از ستون با مقطع ارتقا یافته نیز سختی دورانی افزایش یافته است. نمونه‌های N1-5P ، N2-10P ، N3-15P و N4-20P از سختی بیشتری در مقایسه با نمونه صحت سنجی شده دارا می‌باشد که افزایش سختی دورانی به ترتیب برابر با ۸/۷۲، ۱۱/۶۷، ۱۳/۰۱ و ۱۳/۹۴ درصد است. نمونه‌های N1-U5P ، N2-U10P ، N3-U15P و N4-U20P از سختی بیشتری در مقایسه با نمونه با سطح مقطع بدون شبکه فولادی در نزدیکی جداره دارا می‌باشد. که افزایش سختی دورانی به ترتیب برابر با ۷/۹۴، ۵/۸۵، ۷/۶۰ و ۷/۹۲ درصد است.



شکل ۲۶ نمودار میله‌ای سختی دوران برای نمونه‌های عددی

## ۷- نتیجه گیری

در این تحقیق به بررسی رفتار در اثر افزایش سطح مقطع ستون و معرفی نوع جدیدی از اتصال تیر فولادی به ستون‌های پر شده با بتن پرداخته شد که میزان سطح مقطع ستون در ناحیه اتصال و همچنین در ستون فولادی از مقطع جدید ارتقا یافته (UCFT) استفاده گردیده است. هدف اصلی از این نوع اتصال جدید افزایش سطح مقطع در ناحیه اتصال به منظور کاهش تمرکز تنش، افزایش فاصله محل تشکیل مفصل پلاستیک از بر ستون، توزیع مناسب تنش در هسته بتنی همچنین افزایش سطح مقطع تماس بتن و فولاد در ناحیه اتصال می‌باشد که بعد از انجام مدلسازی عددی نتایج به شرح زیر می‌باشد.

- ۱- افزایش سطح مقطع ستون در ناحیه اتصال باعث افزایش مقاومت خمشی ناحیه اتصال نسبت به مقاطع بدون افزایش سطح مقطع شده است.
- ۲- افزایش سطح مقطع ستون در ناحیه اتصال باعث افزایش جذب انرژی به عبارتی سطح زیر منحنی لنگر-دوران نسبت به مقاطع بدون افزایش سطح مقطع شده است.
- ۳- افزایش سطح مقطع در ناحیه اتصال باعث افزایش سختی اتصال شده است.
- ۴- استفاده از مقطع افزایش یافته در ناحیه اتصال می‌تواند شکل‌پذیری اتصال را افزایش دهد.
- ۵- استفاده از مقطع ارتقاء یافته با مقطع افزایش یافته ستون در ناحیه اتصال نسبت به ستون با مقطع معمولی، باعث افزایش مقاومت خمشی می‌گردد.
- ۶- اتصال تیر به ستون با مقطع افزایش یافته و ستون ارتقاء یافته نسبت به ستون بدون شبکه فولادی نزدیک به جداره دارای سختی بیشتری است.
- ۷- استفاده از مقطع ارتقاء یافته با مقطع افزایش یافته ستون در ناحیه اتصال نسبت به ستون با مقطع بدون شبکه فولادی نزدیک به ستون، باعث افزایش جذب انرژی می‌گردد.

به طور کلی می‌توان گفت که اتصال جدید مطرح شده از عملکرد بهبود یافته‌ای برخوردار است. با توجه به میزان دوران‌ها از نظر شکل‌پذیری با افزایش ۱۰ درصد در سطح مقطع در ناحیه اتصال با استفاده از مقطع ارتقا یافته توصیه می‌گردد. در این صورت فاصله مفصل پلاستیک تشکیل یافته در تیر از بر ستون به میزان ملموسی افزایش می‌یابد که در راستای هدف تحقیق، عدم ایجاد خرابی در ستون‌ها نقش عمده‌ای را ایفا می‌کند. افزایش سطح مقطع در ناحیه اتصال توانسته ظرفیت نهایی، جذب انرژی و سختی اتصال را بهبود بخشد و به طور کلی باعث تقویت عملکرد چشمه اتصال گردد. استفاده از مقطع ارتقا یافته نیز تاثیرات مثبتی در رفتار اتصال داشته است. بدیهی است که انجام مطالعات عددی و علی‌الخصوص آزمایشگاهی و دخیل نمودن اثر جمع شدگی بتن در ناحیه اتصال می‌تواند کمک شایانی به ادامه این موضوع و ارائه روابط ریاضی دقیقی منجر شود.

- [2] Abedi, K., Ferdousi, A., & Afshin, H. (2008). A novel steel section for concrete-filled tubular columns. *Thin-Walled Structures*, 46(3), 310–319. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2007.07.019>
- [3] Abedi, K., Nabati, A., Afshin, H., & Ferdousi, A. (2015). Investigation into behavior of CFT circular columns under long-term axial and cyclic loadings. *Asian Journal of Civil Engineering*, 16(3), 322–346.
- [4] Zhu, H., Stephens, M. T., Roeder, C. W., & Lehman, D. E. (2017). Inelastic response prediction of CFST columns and connections subjected to lateral loading. *Journal of Constructional Steel Research*, 132, 130. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2017.01.016>
- [5] Wang, J., Li, Q., & Wei, G. (2020). Seismic performance analysis of steel beam to cfst column connection with ductility and energy dissipation components. *Journal of Vibroengineering*, 22(1), 131–141. <https://doi.org/10.21595/jve.2019.20803>
- [6] Lai, Z., Fischer, E. C., & Varma, A. H. (2019). Database and Review of Beam-to-Column Connections for Seismic Design of Composite Special Moment Frames. *Journal of Structural Engineering*, 145(5), 1–13. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)st.1943-541x.0002295](https://doi.org/10.1061/(asce)st.1943-541x.0002295)
- [7] Xu, L., Pan, J., Cai, J., Wu, D., & Li, Y. (2019). Mechanical behavior of flat CFST column to steel beam joints under reversed cyclic loading. *Engineering Structures*, 198(March). <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109540>
- [8] Guo, L., Wang, J., Wang, W., & Wang, C. (2020). Cyclic tests and analyses of extended endplate composite connections to CFDST columns. *Journal of Constructional Steel Research*, 167, 105937. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2020.105937>
- [9] Guo, L., Wang, J., Wu, S., & Zhong, L. (2019). Experimental investigation and analytical modelling of blind bolted flush or extended end plate connections to circular CFDST columns. *Engineering Structures*, 192(November 2018), 233–253. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.04.053>
- [10] Mou, B., Liu, X., Wang, F., & Xiao, H. (2022). Cyclic testing on prefabricated joints for steel beam to concrete-filled steel tubular column. *Journal of Constructional Steel Research*, 194, 107345. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2022.107345>
- [11] Mou, B., Li, X., Bai, Y., He, B., & Patel, V. I. (2018). Numerical evaluation on shear behavior of irregular steel beam-to-CFST column connections. *Journal of Constructional Steel Research*, 148, 422–435. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2018.06.002>
- [12] Tahir, M. M., Mohammadhosseini, H., Ngian, S. P., & Effendi, M. K. (2018). I-beam to square hollow column blind bolted moment connection: Experimental and numerical study. *Journal of Constructional Steel Research*, 148, 383–398. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2018.06.012>
- [13] Schneider, S. P., & Alostaz, Y. M. (1998). Experimental Behavior of Connections to Concrete-Filled Steel Tubes. *Journal of Constructional Steel Research*, 45(3), 321–352. [https://doi.org/10.1016/S0143-974X\(97\)00071-0](https://doi.org/10.1016/S0143-974X(97)00071-0)
- [14] Kang, C. H., Shin, K. J., Oh, Y. S., & Moon, T. S. (2001). Hysteresis behavior of CFT column to H-beam connections with external T-stiffeners and penetrated elements. *Engineering Structures*, 23(9), 1194–1201. [https://doi.org/10.1016/S0141-0296\(00\)00119-X](https://doi.org/10.1016/S0141-0296(00)00119-X)
- [15] Kang, L., Leon, R. T., & Lu, X. (2013). Analyses of Through-Diaphragm Connections to CFT Columns. In *Composite Construction in Steel and Concrete VII - Proceedings of the 2013 International Conference on Composite Construction in Steel and Concrete* (pp. 62–76). <https://doi.org/10.1061/9780784479735.006>
- [16] Qin, Y., Chen, Z., Bai, J., & Li, Z. (2016). Test of extended thick-walled through-diaphragm connection to thick-walled CFT column. *Steel and Composite Structures*, 20(1), 1–20. <https://doi.org/10.12989/scs.2016.20.1.001>

- [17] Fanaie, N., & Moghadam, H. S. (2019). Experimental study of rigid connection of drilled beam to CFT column with external stiffeners. *Journal of Constructional Steel Research*, 153, 209–221. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2018.10.016>
- [18] 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. *Engineering Structures*, 131, 477–491. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.10.038>
- [19] Ahmadi, M. M., & Mirghaderi, S. R. (2019). Experimental studies on through-plate moment connection for beam to HSS/CFT column. *Journal of Constructional Steel Research*, 161, 154–170. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2019.06.010>
- [20] Yang, Y., Liu, X., Zhang, J., Liu, J., & Cheng, W. (2020). Behavior of large-scale connections between circular concrete-filled steel tubular columns and H-section steel beams. *Advances in Structural Engineering*, 23(2), 307–319. <https://doi.org/10.1177/1369433219870567>
- [21] Pachideh, G., Gholhaki, M., & Moshtagh, A. (2021). An Experimental Study on Cyclic Performance of the Geometrically Prismatic Concrete-Filled Double Skin Steel Tubular (CFDST) Columns. *Iranian Journal of Science and Technology - Transactions of Civil Engineering*, 45(2), 629–638. <https://doi.org/10.1007/s40996-020-00410-z>
- [22] Pachideh, G., Gholhaki, M., & Moshtagh, A. (2021). Impact of temperature rise on the seismic performance of concrete-filled double skin steel columns with prismatic geometry. *Journal of Testing and Evaluation*, 49(4), 20200037. <https://doi.org/10.1520/JTE20200037>
- [23] Ye, Q., Wang, Y., Wang, Z., Lin, Y., Shu, C., & Zhang, F. (2021). Experimental study of through diaphragm bolted joint between H-beam to CFST column. *Journal of Constructional Steel Research*, 182, 106647. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2021.106647>
- [24] Liu, H., Hao, J., Xue, Q., & Sun, X. (2021). Seismic performance of a wall-type concrete-filled steel tubular column with a double side-plate I-beam connection. *Thin-Walled Structures*, 159, 107175. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2020.107175>
- [25] Ansari, M., Jeddi, M. Z., Badaruzzaman, W. H. W., Tahir, M. M., Osman, S. A., & Hosseinpour, E. (2021). A numerical investigation on the through rib stiffener beam to concrete-filled steel tube column connections subjected to cyclic loading. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 24(3), 728–735. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2020.10.004>
- [26] Barghlame, H., Ferdousi, A., & Ghasemi, S. A. M. (2022). Investigation into the Behavior of Upgraded Concrete-filled Tubular Columns. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 20(10), 640–652. <https://doi.org/10.3151/jact.20.640>
- [27] Rafiei Tekieh, S. M., Zandi, A. P., & Pashaei, M. H. (2022). Numerical and experimental study of the BUEEP connection using an inner box. *Journal of Constructional Steel Research*, 193, 107264. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2022.107264>
- [28] Ali Razavi S, Haji Kandi A, Alimardani M, Jovaini E. Tube-in-tube rigid beam to CFT column connection in moment-resisting frames: An experimental study. *Soil Dyn Earthq Eng [Internet]*. 2023;171(October 2022):107901. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2023.107901>
- [29] Wang, Z., Feng, S., Zhou, X., Wen, T., Liu, Z., & Zhang, Q. (2024). Research on seismic performance of a novel SS-CFSST column to H-beam connection. *Journal of Constructional Steel Research*, 215, 108549. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2024.108549>
- [30] Zhang, N., Jiang, S., Chen, X., Bao, L., Zhou, F., Zhao, H., & Shi, G. (2024). Experimental study on seismic behaviour of thick-flange steel beam to square CFST column joints with internal diaphragms. *Engineering Structures*, 319, 118792. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2024.118792>
- [31] Faramarzzadeh, V., Ferdousi, A., & Zandi, Y. (2025). Cyclic Behavior of Concrete-Filled Double Steel Tubular Column with New Reinforced Circular Cross-Section. *Iranian Journal of Science and Technology - Transactions of Civil Engineering*. <https://doi.org/10.1007/s40996-025-01767-932>.
- [32] Guo J, Sun L, Zhao H, Hu X. Seismic Behavior of Composite Beam to Concrete-Filled Cold-Formed High-Strength Square Steel Tubular Column Joints with Different Connection Forms. *Buildings*. 2025;15(4):622.

[33] Wang, K., Li, Z., Rong, B., Zhang, R., Sun, Y., Zhang, W., & Wu, H. (2025). Experimental and numerical research on hysteretic behavior of bolted end-plate connections. *Structures*, 73, 108397. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.istruc.2025.108397>

[34] Shi, Y. L., Zheng, L., & Wang, W. Da. (2019). The influence of key component characteristic on the resistance to progressive collapse of composite joint with the concrete-filled steel tubular column and steel beam with through bolt-extended endplate. *Frontiers in Materials*, 6(April). <https://doi.org/10.3389/fmats.2019.00064>