

Investigation of cyclic behavior and performance of steel beam to a reinforced concrete column with double-skin steel tubular

Mehdi Shahabi Alamdari¹, Ahmad Maleki^{2*}, Abdorahim Jalali³

1- Ph.D. Candidate, Department of Civil Engineering, Maragheh branch, Islamic Azad University, Maragheh, Iran.

2- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Maragheh branch, Islamic Azad University, Maragheh, Iran.

3- Assistant Professor, Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

ABSTRACT

In this study, the seismic behavior and energy-dissipation of steel beam to reinforced concrete column connection with double-skin steel tubular are investigated using numerical methods. This system improves the hysteresis behavior and performance of traditional steel beams to reinforced concrete column connection. To evaluate the steel beam's hysteresis behavior and energy absorption to reinforced concrete column connection with double-skin steel tubular system, parametric studies were performed. Parametric studies have been performed applying the nonlinear finite element (MFE) procedure to investigate the improved models. The parametric studies comprise examining the parameters of thickness and cross-section shape of an inner tube. Also, the accuracy of finite element models was evaluated by comparing test results that showed the good accuracy of finite element models in predicting the specimens' hysteresis behavior and failure modes. The results indicated that the thickness of the inner tube of improved models has a considerable influence on determining the ultimate capacity, performance, and energy dissipation. Also, the results show that the details of the construction of the internal tube were a considerable effect on the performance and hysteresis behavior of steel beam to reinforced concrete column connection with double-skin steel tubular.

ARTICLE INFO

Receive Date: 28 January 2022

Revise Date: 22 November 2022

Accept Date: 16 February 2022

Keywords:

Steel beam

Reinforced concrete column

Double-skin steel tubular

Ultimate capacity

Finite element method

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2022.326058.2702>

*Corresponding author: Ahmad Maleki.

Email address: A.Maleki@iau-maragheh.ac.ir

بررسی رفتار چرخه ای و عملکرد اتصالات تیر فولادی به ستون بتنی مسلح با لوله فولادی دو پوسته

مهدی شهبابی علمداری^۱، احمد ملکی^{۲*}، عبدالرحیم جلالی^۳

۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، واحد مراغه، دانشگاه آزاد اسلامی، مراغه، ایران

۲- استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران، واحد مراغه، دانشگاه آزاد اسلامی، مراغه، ایران

۳- استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

چکیده

در این تحقیق رفتار لرزه‌ای و اتلاف انرژی اتصال تیر فولادی به ستون بتن مسلح با لوله‌های فولادی دو پوسته با استفاده از روش‌های عددی بررسی شده است. این سیستم رفتار هیستریزیس و عملکرد تیرهای فولادی سنتی به اتصال ستون بتن مسلح را بهبود می‌بخشد. برای ارزیابی رفتار هیستریزیس تیر فولادی و جذب انرژی به اتصال ستون بتن مسلح با سیستم لوله‌ای فولادی دو پوسته، مطالعات پارامتریک انجام شد. مطالعات پارامتری با استفاده از روش المان محدود غیرخطی برای بررسی مدل‌های بهبودیافته انجام شده است. مطالعات پارامتریک شامل بررسی پارامترهای ضخامت و شکل مقطع یک لوله داخلی است. همچنین، دقت مدل‌های اجزای محدود با مقایسه نتایج آزمون که دقت خوب مدل‌های اجزای محدود را در پیش‌بینی رفتار پسماند و حالت‌های شکست نمونه‌ها نشان می‌دهد، مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که ضخامت لوله داخلی مدل‌های بهبودیافته تأثیر قابل توجهی بر تعیین ظرفیت نهایی، عملکرد و اتلاف انرژی دارد. همچنین، نتایج نشان می‌دهد که جزئیات ساخت لوله داخلی تأثیر قابل توجهی بر عملکرد و رفتار پسماند اتصال تیر فولادی به ستون بتن مسلح با لوله‌های فولادی دو پوسته داشته است.

کلمات کلیدی: تیر فولادی، ستون بتن آرمه، لوله فولادی دو پوسته، ظرفیت نهایی، روش اجزای محدود.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	https://doi.org/10.22065/jsce.2022.326058.2702	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2022.326058.2702	۱۴۰۱/۰۹/۳۰	۱۴۰۰/۱۱/۲۷	۱۴۰۰/۱۱/۲۷	۱۴۰۰/۱۱/۰۸	۱۴۰۰/۰۹/۰۱
			احمد ملکی		*نویسنده مسئول:	
			A.Maleki@iau-maragheh.ac.ir		پست الکترونیکی:	

۱- مقدمه

استفاده از سیستم RCS در آمریکا و ژاپن از اواخر دهه ۱۹۷۰ و اوایل ۱۹۸۰ میلادی آغاز شده است. این سیستم در آمریکا به عنوان جایگزینی برای قاب خمشی فولادی در ساختمان‌های متوسط و بلند مرتبه بکار رفته است. در ساختمان‌های بلند مرتبه به دلیل اینکه سختی سازه، کنترل کننده طراحی است، استفاده از ستون بتنی با سختی بیشتر در مقایسه با ستون فولادی باعث اقتصادی شدن طرح می‌شود. در کشور ژاپن نیز نوعی از سیستم ترکیبی RCS به عنوان تبدیل سیستم قاب خمشی بتنی در ساختمان‌های کوتاه و اداری و در مناطق با لرزه‌خیزی بالا مورد استفاده قرار گرفته است. هدف اصلی در این سیستم دستیابی به مزیت استفاده از تیرهای فولادی با دهانه بلند در ساختمان‌های اداری و تجاری کوتاه بوده است. عمل ترکیب تیر فولادی با دال بتنی با استفاده از برش‌گیرها، باعث کاهش ارتفاع و وزن سقف و در نتیجه باعث کاهش بارهای مرده وارد بر فونداسیون و کاهش هزینه‌ها خواهد شد. خلاصه‌ای از تحقیقات صورت گرفته، به شرح زیر ارائه شده است [1,2].

اولین برنامه آزمایشگاهی در آمریکا توسط شیخ و همکاران در دانشگاه تگزاس انجام شد [3]. در این برنامه ۹ اتصال تیر فولادی به ستون بتنی در مقیاس ۲/۳ ساخته شده و تحت آزمایش با بارگذاری یکنواخت قرار گرفت. هدف از این مطالعه بررسی اثر صفحات فشاری اطراف ستون و ضخامت صفحه جان روی مقاومت اتصال مختلط و بررسی اثر توسعه صفحات فشاری اطراف ستون در محصور کردن بتن شرکت کننده در مکانیزم برشی مقاوم اتصال بود. تغییر شکل‌ها در ناحیه اتصال در طول مدت آزمایش ثبت شد. چرخش کل اتصال، از مجموع چرخشی برشی اتصال و چرخش جسم صلب تیر فولادی داخل اتصال تشکیل می‌شود. چرخش برشی اتصال مشابه اتصالات فولادی و بتنی است و چرخش جسم صلب، ناشی از خرد شدن بتن ناحیه مجاور بال تیر بر اثر تنش‌های زیاد فشاری است که منجر به ایجاد فاصله بین بال تیر فولادی و بتن اطراف آن می‌شود.

ویت و پارا به صورت آزمایشگاهی ۹ نمونه اتصال خارجی RCS با مقیاس ۳/۴ در دو گروه با نسبت عمق تیر به ستون ۰/۶ و ۱ را در دانشگاه میشیگان ساختند و این نمونه‌ها را تحت ۲۰ سیکل بارگذاری جانبی قراردادند. هدف از مطالعه این نمونه‌ها بررسی رفتار اتصال خارجی و تاثیر وجود خاموت‌های U شکل در ناحیه اتصال، تاثیر استفاده از کاور فولادی و FBP در افزایش مقاومت برشی و ظرفیت باربری اتصال، تاثیر استفاده از بتن حاوی الیاف فولادی و تاثیر نوارهای فولادی محصور کننده در بالا و پایین ناحیه اتصال و بررسی عملکرد این نوع سیستم ترکیبی در برابر بارهای رفت و برگشتی، بیان شده است. براساس نتایج آزمایشگاهی، اتصالات RCS برای استفاده در مناطق با لرزه‌خیزی بالا مناسب هستند. استفاده از ورق کاور فولادی و ورق‌های نواری سبب افزایش قابل توجه مقاومت و ظرفیت سختی باقیمانده در ناحیه اتصال می‌شود [4].

چنگ و چن به بررسی رفتار لرزه‌ای اتصالات RCS از نوع تیر پیوسته در دو حالت بدون دال و با دال در مرکز تحقیقات مهندسی زلزله تایوان پرداختند. در مجموع ۶ نمونه ساخته و تحت بارگذاری چرخه‌ای قرار گرفتند. پارامترهای مورد بررسی آنان شامل تاثیر حضور دال، آرایش مختلف خاموت، مقطع تیر و پروتکل بارگذاری است. همچنین برای بررسی رفتار بار-تغییر شکل از نرم افزار تحلیل غیرخطی DRAIN-2DX برای مدل سازی نمونه‌ها استفاده گردید. نتایج آزمایش نشان داد که سختی اولیه و مقاومت نهایی نمونه‌های دارای دال، بیشتر از نمونه‌های متناظر بدون دال است. آسیب دیدگی یکی از نمونه‌ها به دلیل تفاوت پروتکل بارگذاری از سایر نمونه‌ها کمتر است [5].

لی و همکاران به بررسی برخی از پارامترهای موثر بر روی عملکرد اتصال RCS با استفاده از نرم افزار آباکوس پرداختند. در مرحله صحت‌سنجی از دو نرم افزار ABAQUS و ANSYS جهت مدل سازی قاب دو دهانه یک طبقه استفاده شد و نتایج مدل سازی با نتایج آزمایشگاهی مقایسه گردید که نرم افزار ANSYS از دقت کافی برخوردار نبوده و استفاده از آن مردود گردید. در ادامه از همان روش مدل سازی برای شبیه سازی قاب کامپوزیتی دارای ستون‌های پرمقاومت محبوس شده توسط آرماتورهای دور پیچ مرکب پیوسته و تیرهای بتنی (CCSTRCS) استفاده گردید. برخی از پارامترهای مورد بررسی در مقاله Li و همکاران شامل: نسبت آرماتورهای پیوسته دور پیچ محصور کننده ستون، نسبت مقاومت آرماتور طولی و عرضی، مقاومت فشاری بتن و مقاومت تسلیم فولاد است [6].

فرهمنند آذر و همکاران عملکرد لرزه‌ای قاب‌های خمشی ویژه RCS را با استفاده از نرم‌افزار OpenSEES مورد ارزیابی قرار دادند. همچنین رفتار سه قاب بتن مسلح با سه قاب بتن مسلح دارای اتصال RCS مقایسه شده‌است و تاثیر تیر فولادی در ظرفیت باربری جانبی قاب از طریق جایگزینی تیرهای فولادی با تیرهای بتنی بررسی شده‌است. اتصال RCS مورد مطالعه، از نوع اتصال تیر پیوسته بوده و با استفاده از دستورالعمل ASCE به روز رسانی شده، طراحی شده و دارای خاموت U شکل در منطقه اتصال است و همچنین ورق‌های نواری فولادی در اطراف منطقه اتصال در بالا و پایین تیر فولادی نصب شده‌است. فرهمنند آذر و همکاران پس از انجام تحلیل پوش‌آور و مقایسه نتایج به این نتیجه رسیدند که قاب‌های RCS دارای ظرفیت باربری بیشتر و عملکرد مطلوب‌تری در مقایسه با قاب‌های خمشی بتن مسلح هستند. سختی اولیه در قاب‌های بتن مسلح بیشتر از قاب‌های RCS است اما ظرفیت نهایی باربری قاب‌های RCS به طور قابل توجهی بیشتر از قاب‌های بتن مسلح می‌باشد [2].

حبشی‌زاده و همکاران به بررسی تاثیر رفتار اتصال RCS بر روی رفتار کلی قاب‌ها با استفاده از نرم‌افزار OpenSEES پرداختند. در تحقیق آن‌ها ۴ قاب منظم سه و پنج و ده و پانزده طبقه با سه دهانه ۷ متری و به ارتفاع طبقه ۴/۲ متری برای منطقه با لرزه‌خیزی بالا براساس آیین‌نامه IBC 2006 و با استفاده از برنامه ETABS طراحی گردید. و سپس در نرم‌افزار OpenSEES با اضافه شدن مدل‌سازی اتصال، ارزیابی لرزه‌ای با استفاده از تحلیل پوش‌آور انجام گرفت. به منظور بررسی اثرات تغییرشکل‌های اتصال بر رفتار لرزه‌ای قاب‌ها، مدل‌سازی بدون استفاده از اتصالات RCS نیز انجام گردید. با بررسی نمودارهای ظرفیت، این نتیجه حاصل شد که قاب‌های RCS با در نظر گرفتن مدل اتصال، دارای ظرفیت جانبی بالاتری نسبت به قاب‌های RCS بدون مدل‌سازی اتصالات بوده و با افزایش تعداد طبقات، اختلاف بین ظرفیت نیز بیشتر می‌شود و قاب‌های بدون مدل اتصالات، در انتقال از قسمت الاستیک به غیرالاستیک، دارای منحنی تیزتری بوده و سختی اولیه آن‌ها نیز بیشتر است. تغییرشکل‌های مربوط به رفتار اتصال، باعث کاهش دوران‌های پلاستیک و افزایش تغییرمکان نسبی طبقات شده که اثرات آن قابل ملاحظه بوده و نقش مهمی در رفتار قاب دارد. این موضوع بیانگر انعطاف‌پذیری و شکل‌پذیری اتصالات RCS نسبت به اتصالات معمولی است [7].

علیزاده و همکاران به بررسی عملکرد اشکال مختلف اتصال RCS (اتصال داخلی، خارجی، گوشه و T شکل) با استفاده از نرم‌افزار المان محدود ABAQUS پرداختند. در تحقیق علیزاده و همکاران، بر روی نمونه‌ها تحلیل پوش‌آور انجام شده و از بررسی نمودارهای نیرو-تغییرمکان این نتیجه حاصل شد که سختی اتصال T شکل به دلیل عدم وجود ستون در بالای تیر فولادی، ۳۰٪ کاهش یافته‌است و نسبت مقاومت برشی جان تیر فولادی در اتصالات گوشه و خارجی به اتصالات داخلی به ترتیب برابر با ۷۳٪ و ۸۱٪ محاسبه شده‌است [8]. علیزاده و همکاران به بررسی آزمایشگاهی عملکرد اتصال RCS با استفاده از بتن خودمتراکم پرداختند. در مطالعات آزمایشگاهی آن‌ها دو نمونه اتصال داخلی RCS از نوع تیر پیوسته با مقیاس ۳/۴ ساخته شد. نمونه اول براساس دستورالعمل ASCE و جزئیات رایج در اتصال RCS طراحی شده است. منظور از جزئیات رایج، استفاده از ورق نواری فولادی در بالا و پایین ناحیه اتصال، صفحه تکیه‌گاه جانبی (FBP) هم عرض با بال تیر فولادی و خاموت‌های L شکل عبور کرده از جان تیر فولادی است. در نمونه دوم جزئیات اضافی اتصال پیشنهادی شامل صفحه تکیه‌گاه عریض‌تر از بال تیر فولادی (WFBP)، صفحه تکیه‌گاه اضافی (ABP) در مقایسه با نمونه اول است. در هر دو نمونه به منظور تقویت جان تیر فولادی در ناحیه اتصال، ورق دابل فولادی جوش شده و در هر دو نمونه از بتن خودمتراکم به منظور تسهیل در بتن‌ریزی استفاده شده‌است. نمونه‌ها تحت بارگذاری چرخه‌ای قرار گرفتند که الگوی بارگذاری آن‌ها شامل ۲۸ چرخه است و هر چرخه به منظور ارزیابی کاهش مقاومت و سختی، دو مرتبه تکرار شده‌است. براساس نتایج آزمایشگاهی و مقایسه عملکرد دو نمونه، مشاهده می‌شود که استفاده از صفحه تکیه‌گاه اضافی (ABP) مقاومت برشی و باربری اتصال را افزایش می‌دهد و سب می‌شود که تسلیم‌شدگی جان تیر فولادی در دریافت بالاتری اتفاق بیافتد [9].

میرقادری و همکاران یک اتصال خمشی جدید RCS بین تیر فولادی پیوسته و ستون بتن مسلح را پیشنهاد می‌دهند. در مقاله آن‌ها دو تیر موازی از دو طرف ستون بتن مسلح عبور می‌کند. در نمونه اول بال‌های تیر ناودانی مستقیماً به ورق کاور جوش زده می‌شود و در نمونه دوم تیرهای IPE بر روی قسمت بیرون‌زده کاور، قرار گرفته و سپس جوش زده می‌شوند. در ورق کاور اطراف ستون، برش‌گیرهایی برای جلوگیری از سرخوردن ورق کاور و افزایش درگیری بین سطح کاور و سطح ستون بتنی تعبیه شده‌است. یکی از موضوعات مهم مورد

بررسی در این مقاله، بررسی مکانیسم انتقال نیرو و روش طراحی است. مدل‌های پیشنهادی مقاله به مقیاس ۳/۴ در آزمایشگاه ساخته شده و تحت بارگذاری چرخه‌ای قرار گرفتند. علاوه بر این به منظور بررسی رفتار برش‌گیرهای مدفون در بتن و تعیین ظرفیت برشی آن‌ها، دو نمونه آزمایشگاهی تحت بار فشاری جانبی مونوتونیک قرار گرفتند. در این نمونه‌ها چون از ورق کاور در اطراف ناحیه اتصال، جهت محصوریت بتن ناحیه اتصال استفاده شده، از بکار بردن خاموت در این ناحیه صرف‌نظر شده است. برای اعمال شرایط مرزی در انتهای ستون، تکیه‌گاه مفصلی و در انتهای تیرها، تکیه‌گاه غلطکی قرار گرفته است و برای جلوگیری از کمانش تیرها، دو تکیه‌گاه جانبی در طرفین ستون در فاصله‌ای معین نصب شده است. جابجایی چرخه‌ای برحسب زاویه دریافت و هر چرخه دوبار تکرار شده است. پس از اتمام آزمایش، نتایج به این شرح است که در هر دو نمونه تسلیم‌شدگی در انتهای تیرها و در فاصله اندکی از ستون‌ها اتفاق می‌افتد زیرا نمونه‌ها براساس معیار ستون قوی-تیر ضعیف طراحی شده‌اند. حلقه‌های هیستریزس، پایداری رفتار و ظرفیت اتلاف انرژی خوبی را نشان می‌دهند. اتصالات پیشنهاد شده، شرایط لازم مقررات لرزه‌ای AISC، برای پذیرفته شدن به عنوان اتصال کاملاً گیردار را فراهم کردند. برش‌گیرهای مورد استفاده، برای محدود کردن تغییرمکان نسبی در سطح تماس مشترک بتن و فولاد ضروری هستند. این اتصال RCS دارای مزیت‌هایی از قبیل مقاومت بیشتر در برابر بارهای وزنی و لرزه‌ای به دلیل پیوستگی تیرها، ظرفیت دوران پلاستیک بیشتر از طریق استفاده از دو تیر با عمق کمتر، افزایش ظرفیت ستون در منطقه اتصال و چیدمان مناسب آرماتورها است [10].

اقبالی و میرقادری اتصال RCS جدیدی را طراحی و مورد آزمایش قرار دادند. در تحقیق آن‌ها دو نمونه آزمایشگاهی اتصال RCS پیشنهادی، با مقیاس ۳/۴ ساخته شد. در یکی از نمونه‌ها از تیر فولادی ناودانی و در نمونه دوم از تیر فولادی IPE استفاده شده است. در هر دو نمونه، تیرهای فولادی از طریق یک ورقه میانی که در داخل ستون بتن مسلح مدفون شده، به ستون بتنی متصل می‌شوند. به دلیل استفاده از ورقه‌های فولادی به عنوان کاور در اطراف ناحیه اتصال برای محصورسازی ستون بتنی، از بکار بردن خاموت در ناحیه اتصال چشم‌پوشی شده است. برای جلوگیری از سرخوردن و افزایش درگیری فولاد و بتن، برش‌گیرهایی در سطح داخلی کاور و ورقه میانی نصب شده است. در طراحی اجزای تیر و ستون، معیار ستون قوی-تیر ضعیف رعایت شده است تا مفاصل پلاستیک بر روی تیر ایجاد شود. همچنین در این تحقیق مکانیسم‌های انتقال نیرو مورد بررسی و بحث قرار گرفته است. نمونه‌های آزمایشگاهی تحت بارگذاری چرخه‌ای قرار گرفتند و ناحیه اتصال در مدت بارگذاری بدون آسیب باقی ماند و فقط ترک‌های اندکی در ستون بتنی ظاهر گردید. نمودار هیستریزس هر دو نمونه نشان‌دهنده رفتار پایدار و ظرفیت اتلاف انرژی مناسبی است و ارزیابی اتصال براساس مقررات AISC نشان می‌دهد که اتصال پیشنهاد شده اقبالی و میرقادری می‌تواند به عنوان یک اتصال کاملاً گیردار طبقه‌بندی شود [11].

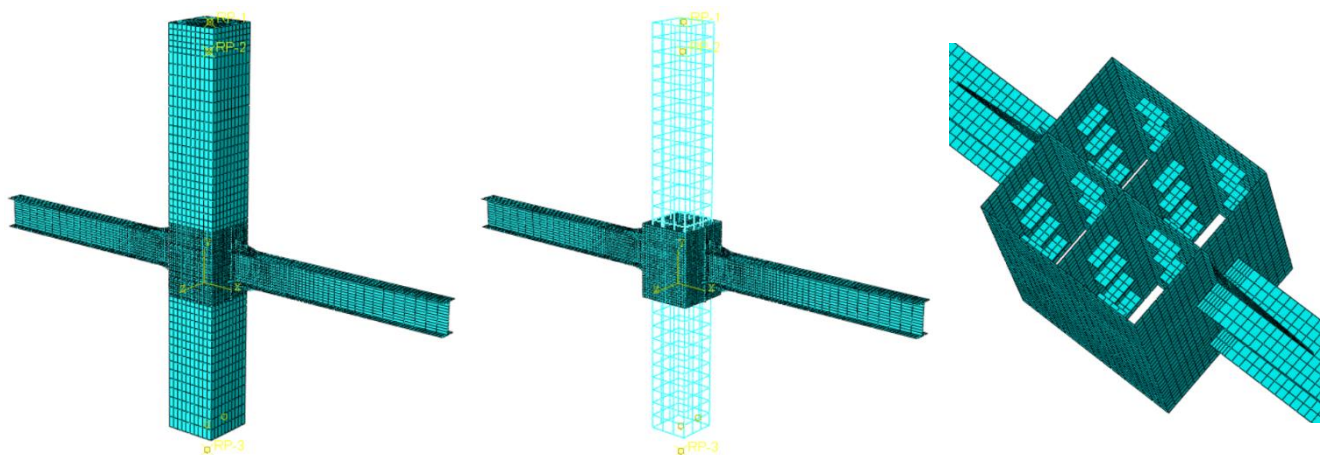
در این تحقیق رفتار چرخه‌ای و اتلاف انرژی اتصال تیر فولادی به ستون بتن مسلح با لوله‌های فولادی دو پوسته با روش المان محدود بررسی شده است. اتصال تیر فولادی به ستون بتن مسلح با لوله‌های فولادی دو پوسته با استفاده از روش المان محدود غیرخطی با استفاده از نرم افزار ABAQUS گسترش یافته است. این مطالعه به منظور بررسی تأثیر ضخامت و شکل مقطع لوله داخلی متفاوت بر رفتار چرخه‌ای و عملکرد مدل‌های بهبودیافته انجام شده است. هدف مطالعات پارامتریک بررسی و ارزیابی سختی اولیه، نیروی تسلیم و اتلاف انرژی تیر فولادی به اتصال ستون بتن مسلح با لوله‌های فولادی دو پوسته است.

۲- روش عددی

در این بخش، نرم افزار اجزای محدود آباکوس [12] و روش عددی مدل‌های المان محدود غیر خطی برای پیش‌بینی رفتار چرخه‌ای اتصالات تیر فولادی به ستون بتنی مسلح توسعه داده است. برای شبیه‌سازی عددی رفتار چرخه‌ای تیر فولادی به اتصال ستون بتن مسلح، از نمونه‌های تجربی TPI اقبالی و میرقادری [11] برای مدل‌سازی المان محدود استفاده شد. در زیربخش‌های بعدی جزئیات مدل‌های اجزای محدود شامل مشخصات مصالح، بارگذاری و شرایط تکیه‌گاهی، ناکاملی اولیه و جزئیات مش‌بندی و همچنین روش به کار برده شده برای تحلیل ارائه شده است.

۲-۱- مش‌بندی، نوع المان و نوع تحلیل

در مدل سازی المان محدود اتصالات تیر فولادی به ستون بتنی مسلح، برای ستون بتونی، تیر، ورق های فولادی و میلگردهای تقویت‌کننده استفاده شد. از عناصر شش ضلعی هشت گره‌ای پیوسته یا جامد (DR3C8) با سه درجه آزادی انتقالی و سه درجه آزادی دورانی در هر گره برای مدل سازی ستون بتونی استفاده شد [13,14]. برای مدل سازی تیر و ورق‌های فولادی از عناصر ۴ گره پیوسته (S4R) دارای سه درجه آزادی انتقالی و سه درجه آزادی دورانی در هر گره استفاده شد. عناصر تیرشکل ۲ گره (B31) دارای سه درجه آزادی انتقالی و سه درجه آزادی دورانی در هر گره برای مدل سازی میلگردهای تقویت‌کننده استفاده شد. هر عنصر دارای سه درجه آزادی حرکت در محورهای U1، U2 و U3 و سه درجه آزادی دوران در محورهای UR1، UR2 و UR3 است. این عنصر برای آنالیزهای خطی، غیرخطی، پیچیده، تماسی و پلاستیکی مرتبط با تغییر شکل‌های بزرگ مناسب است. در مطالعه حاضر، آنالیز حساسیت مش‌بندی برای تعیین مش مناسب مورد بررسی قرار گرفت [15-17]. مش‌بندی بهینه در مدل‌ها در ابعاد 25×25 میلی‌متر برای همه‌ی مدل‌های اجزای محدود در نظر گرفته شد هندسه و مش‌بندی مدل‌های المان محدود نمونه‌های آزمایشگاهی اقبالی و میرقادری [11] در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱: هندسه و مش‌بندی مدل‌های اجزای محدود.

تحلیل شبه‌اشتاتیکی غیرخطی برای تحلیل مدل‌ها استفاده شده است. در مدل‌سازی رفتار هندسی غیرخطی، سخت‌شدگی کرنشی و تغییرشکل‌های بزرگ المان‌ها محاسبه شده است [18]. با توجه به مناسب بودن روش حل صریح برای تجزیه و تحلیل‌های شبه‌اشتاتیک غیرخطی، این روش برای تجزیه و تحلیل غیرخطی اتصالات تیر فولادی به ستون بتنی مسلح که تحت بارگذاری چرخه‌ای قرار دارند، استفاده شد.

۲-۲- مدل‌ها و مشخصات مصالح

۲-۲-۱- فولادی

از مدل انعطاف‌پذیری ترکیبی سخت شدن ایزوتروپیک و حرکتی برای مدل‌سازی رفتار غیرخطی مصالح فولادی استفاده شده است. برای مدل‌سازی مصالح فولادی با استفاده از مدل Ramberg-Osgood، به دست آمده توسط الچالکانی و همکاران [19] استفاده شده است. در تجزیه و تحلیل المان محدود، مصالح فولاد تا زمانی که به تنش تسلیم نرسند، مواد الاستیک در نظر گرفته می‌شوند. بعد از آن مرحله، مصالح به صورت پلاستیک شبیه سازی می‌شوند. مدول الاستیک برابر با 200000 مگاپاسکال است و نسبت پواسون 0.3 در نظر گرفته شده است. خصوصیات مکانیکی مواد فولادی حاصل از آزمایشات تست کشش اقبالی و میرقادری [11] در جدول ۱ ارائه شده است. تنش تسلیم و مقاومت نهایی فولاد در تجزیه و تحلیل از مراجع [11] برای مدل سازی المان محدود اقبالی و استفاده شده است.

جدول ۱: خصوصیات مصالح فولاد نمونه آزمایشگاهی

تنش تسلیم (MPa)	مقاومت کششی (MPa)	اعضا	نمونه آزمایشگاهی
329	474	بال تیر	اقبالی و میرقادری [11]
243	448	جان تیر	
309	414	ورق پوششی (۱۲ میلیمتر)	
256	446	ورق فولادی (۲۰ میلیمتر)	
544	678	آرماتور طولی با قطر ۱۸ میلیمتر	
426	660	آرماتور عرضی با قطر ۱۰ میلیمتر	

۲-۲-۲- بتن

برای ارزیابی توزیع تنش و انتشار ترک در عناصر بتنی، سه مدل ترک در نرم افزار ABAQUS وجود دارد: ترک خوردگی شکننده، ترک خوردگی آغشته به بتن، و خاصیت پلاستیکی آسیب دیده بتن. در مطالعه حاضر، از مدل انعطاف پذیری آسیب دیده بتن (CDP) برای بتن مدل سازی المان محدود استفاده شده است. این خصوصیات رفتاری می تواند خصارت های فشاری و کششی غیرخطی عناصر بتنی تحت بارگذاری یکنواخت و دینامیکی را در نظر بگیرد [20]. این مدل بر اساس رفتار سخت شدن و نرم شدن مواد شکننده مانند بتن ساخته شده است. در مدل سازی المان محدود، از مدل مندر و همکاران [21] برای رابطه تنش- کرنش مورد استفاده برای ناحیه فشاری مصالح بتن استفاده شده است. روابط معادلات رفتاری بتن به شرح زیر است:

$$\sigma = \frac{f'_{cc} x r}{r - 1 + x^r} \quad (1)$$

$$x = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{cc}} \quad (2)$$

$$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_c \left(1 + 5 \left(\frac{f'_{cc}}{f'_c} - 1 \right) \right) \quad (3)$$

که f'_{cc} و ε_{cc} به ترتیب مقاومت فشاری و کرنش بتن محصور مربوطه هستند. f'_c و ε_c به ترتیب م مقاومت فشاری و کرنش معادل بتن هستند. که در آن ε_c به طور کلی بین ۰,۰۰۲ تا ۰,۰۰۳ قرار دارد [24].

$$E_{sec} = \frac{f'_{cc}}{\varepsilon_{cc}} \quad (4)$$

$$r = \frac{E_c - E_{sec}}{E_c} \quad (5)$$

مدول الاستیسیته بتن توسط آیین نامه بتن امریکا [25] به شرح زیر توصیه می شود:

$$E_c = 4700 \sqrt{f'_c} \quad (6)$$

مقاومت فشاری بتن مطابق با مرجع [11] برابر با ۴۲ مگاپاسکال در تجزیه و تحلیل مدل های المان مورد استفاده قرار گرفته است. چگالی و نسبت پواسون ماده بتن به ترتیب ۲۴۰۰ کیلوگرم در متر مکعب و ۰,۲ فرض شده است. در مدل ماده سازنده CDP رفتار کششی بتن پس از شکست کششی را در نظر می گیرد. مقاومت کششی بتن ۱۰ درصد مقاومت فشاری تک محوری بتن فرض شده است.

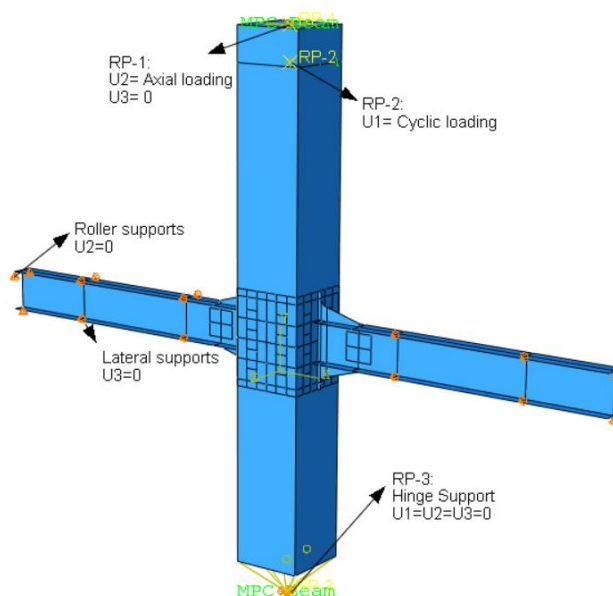
پارامترهای پلاستیک شامل زاویه اتساع (ψ)، فاکتور شکل برای سطح عملکرد (K_c)، ضریب تنش دو محوری عملکرد تابع (f_{bo}/f_c)، پارامتر ویسکوزیته (μ) و خارج از مرکز پتانسیل پلاستیک (e) در جدول ۲ ارائه شده است [27].

جدول ۲: مقادیر پارامترهای پلاستیک مورد استفاده در مدل سازی بتن

dilation angle (ψ)	K_c	(f_{bo}/f_c)	e	μ
21°	0.667	1.16	0.1	0.0002

۲-۳- شرایط مرزی و بارگذاری

در مدل المان محدود، شرایط مرزی و بارگذاری در نظر گرفته شده براساس پیکربندی تنظیم نمونه‌های آزمایش است [11]. با توجه به تنظیمات آزمون [11]، از تکیه‌گاه مفصلی در پایه ستون استفاده شده است و از تکیه‌گاه‌های جانبی برای جلوگیری از تغییر شکل‌های خارج از صفحه مدل‌ها و همچنین بارگذاری شامل، بارگذاری چرخه‌ای در بالای ستون در مدل المان محدود استفاده شده است (شکل ۲). تکیه دو انتهای تیر بصورت تکیه گاه مفصلی غلطکی است تا امکان دوران آزاد و امکان جابجایی تیر در راستای اعمال بار جانبی مهیا باشد. تکیه گاه انتهای ستون بصورت تکیه گاه مفصلی ثابت در نظر گرفته شده است. بارگذاری در دو مرحله انجام گرفته است. ابتدا بار محوری ۵۰۰ کیلو نیوتون به قسمت فوقانی ستون اعمال گردید سپس تغییر مکان جانبی بالای ستون به صورت بارگذاری چرخه‌ای اعمال گردید. پروتکل بارگذاری چرخه‌ای بر اساس نمونه‌های آزمایش [11] و نوع بارگذاری به صورت کنترل تغییر مکان به مدل‌های المان محدود اعمال شده است.

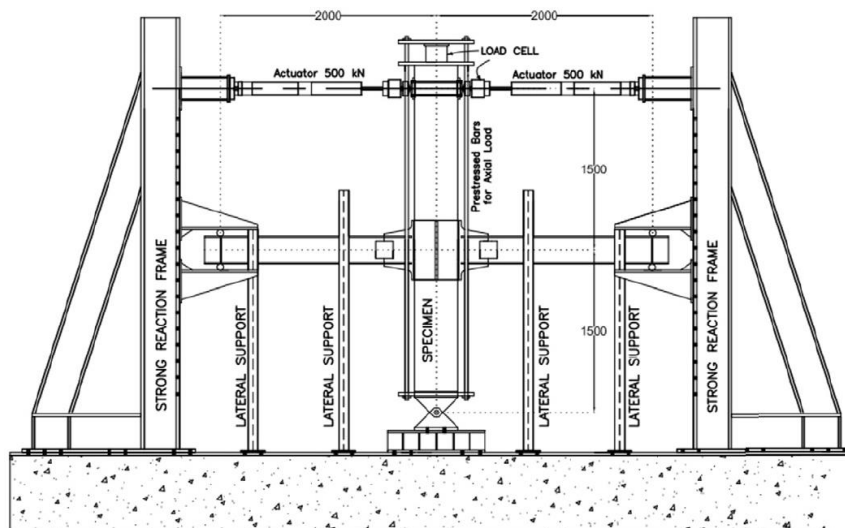


شکل ۲: شرایط مرزی و بارگذاری مدل اجزای محدود اقبالی و میرقادری [11]

۳- اعتبارسنجی مدل اجزای محدود

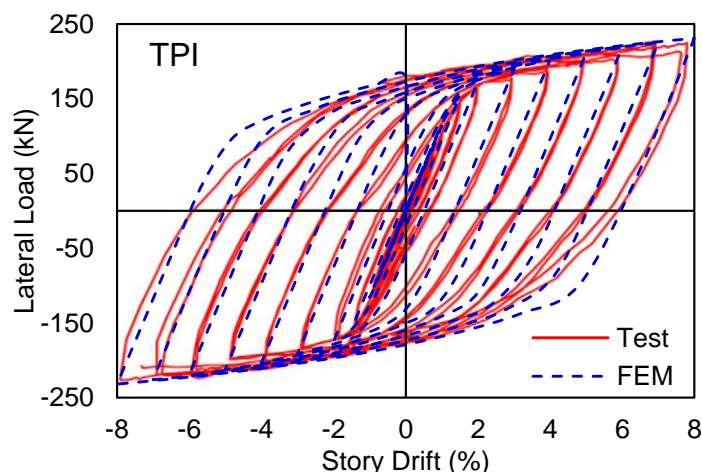
در این بخش نتایج مدل اجزای محدود با نتایج آزمایشگاهی اقبالی و میرقادری [11] اعتبارسنجی شده است. بنابراین، مقایسه‌ای بین منحنی‌های هیستریزس و حالت‌های خرابی پیش‌بینی‌های عددی با نتایج کارهای آزمایشگاهی گزارش شده توسط اقبالی و میرقادری [11] صورت گرفته است. شکل کلی نمونه مورد آزمایش و اجزای تشکیل دهنده آن در شکل ۳ نشان داده شده است. نمونه مورد آزمایش، از ستون بتن مسلح به ابعاد ۴۰ در ۴۰ سانتی متر دارای ۱۲ آرماتور ۱۸ و تیر مقطع I شکل به ابعاد بال ۱۵ در ۳۰ و جان ۱۰ در ۲۳۰

میلیمتر ساخته شده است. ارتفاع ستون از محل اعمال بار جانبی تا پای ستون برابر ۳ متر و طول تیر در حد فاصل دو تکیه گاه غلطکی برابر ۴ متر است. اتصال تیرهای فولادی به ستون بتن مسلح توسط ورق میانگذر صلیبی شکل به ضخامت ۲۰ میلیمتر صورت گرفته است. برای اتصال تیر به ورق میانگذر، جان تیر حذف گردیده و در بال های تیر شکافی برای قرار گرفتن ورق میانگذر ایجاد شده است. ناحیه اتصال توسط ورق های پوششی (کاور فولادی به ضخامت ۱۲ میلیمتر و ارتفاع ۵۵۰ میلیمتر) محاط شده است. برای انتقال نیروهای برشی در سطح تماس فولاد و بتن، افزایش مشارکت ورق میانگذر در مکانسیم انتقال نیرو و جلوگیری از لغزش کاور فولادی از برشگیر های صلب در کاور فولادی و ورق میانگذر استفاده شده است. به دلیل تامین محصورشدگی ناحیه اتصال توسط کاور فولادی، ناحیه اتصال خاموت گذاری نشده است.

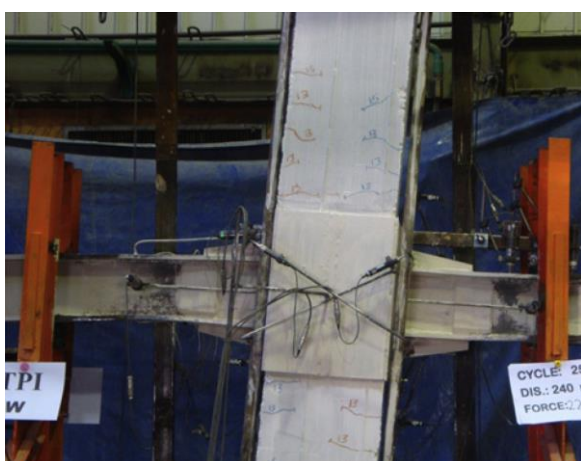


شکل ۳: مشخصات هندسی و تنظیمات آزمایش.

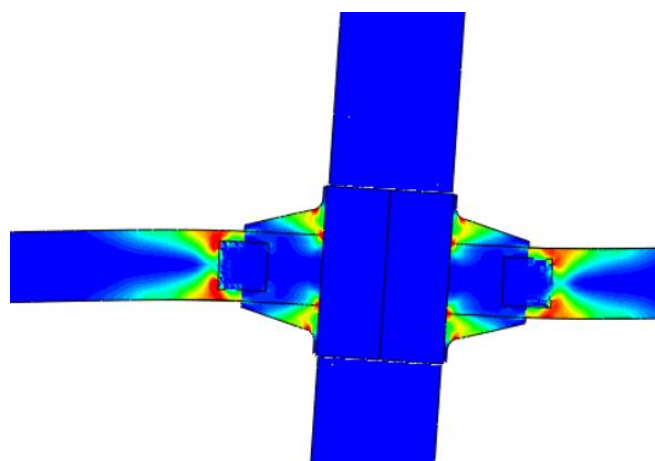
مدل المان محدود تحت بارگذاری چرخه‌ای بر اساس پروتکل بارگذاری نمونه آزمایشگاهی اقبالی و میرقادری [11] مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است، نتایج منحنی هیستریزس نیرو-جابجایی آن در شکل ۴ نشان داده شده است. شکل ۴ دقت و سازگاری مدل المان محدود را نشان می‌دهد. مشاهده شده است که مدل های اجزای محدود رفتارهای چرخه‌ای نمونه های آزمایش را با موفقیت به دست آورده اند. علاوه بر این، مشخص شده است که شبیه سازی المان محدود در پیش‌بینی سختی و مقاومت نمونه‌ها و همچنین پدیده پینچینگ تحت بارگذاری چرخه‌ای کاملاً موفق بوده است. با توجه به نتایج شکل ۴، اختلافاتی در منطقه شروع تسلیم‌شدگی بین مدل المان محدود و نتایج آزمون مشاهده می‌شود. این اختلاف می‌تواند به دلیل شرایط آزمایشگاهی، جک بارگیری، لرزش تیر پایین عمیق و اتصالات پیچ و مهره باشد که در مدل سازی در نظر گرفته نشده است. شکل ۵ حالت‌های خرابی مدل المان محدود و نمونه‌های آزمایش را مقایسه می‌کند [11]. کرنش پلاستیکی معادل برای ارزیابی مناطق خرابی در مدل های اجزای محدود استفاده شد. شکل ۵ مناطق خرابی نمونه آزمایش شده توسط اقبالی و میرقادری [11] را نشان می‌دهد. نمودارهای کانتور کرنش پلاستیکی معادل مدل‌های اجزای محدود برای مقایسه با نمونه‌های آزمایش در شکل ۵ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۵، نتایج مدل المان محدود توافق خوبی با نمونه آزمایشگاهی اتصالات تیر فولادی به ستون بتنی مسلح دارد.



شکل ۴: مقایسه‌ی منحنی بار-جابجایی نمونه آزمایشگاهی و مدل عددی.



آزمایشگاهی



المان محدود

شکل ۵: مقایسه حالت خرابی نمونه آزمایشگاهی و مدل عددی.

۴- مطالعه‌ی پارامتریک

پس از تایید مدل المان محدود، رفتار چرخه ای، مقاومت برشی ناحیه پانل و رفتار اتصالات تیر فولادی به ستون بتن مسلح با لوله فولادی دو پوسته انجام می شود. در مطالعات پارامتری، رفتار چرخه ای و جذب انرژی اتصالات تیر فولادی به ستون بتن مسلح با لوله فولادی دو پوسته بررسی شده است. برای مطالعات پارامتریک، سه استراتژی برای لوله‌های فولادی دو پوسته انتخاب و با روش اجزای محدود مدل‌سازی شده است. مدل‌های اجزای محدود مطالعات پارامتریک بر اساس نمونه آزمایشگاهی اقبالی و میرقادری [11] توسعه داده شده‌اند.

۴-۱- جزئیات مدل‌های پارامتریک

جزئیات و پیکربندی اتصال تیر فولادی به ستون بتن مسلح مورد استفاده در این مطالعه در شکل ۶ نشان داده شده است. همانطور که در شکل ۶ نشان داده شده است، در مطالعات عددی، همه زیر مجموعه‌های اتصال از طریق یک صفحه عبوری هستند و نیمی از طول تیر از دو طرف و طول کل ستون را شامل می شوند. مدل‌های المان محدود از تیر به طول ۴ متر و ارتفاع ستون ۳ متر ساخته شد. پیکربندی راه اندازی شرایط مرزی و بارگذاری مدل‌های المان محدود در شکل ۲ نشان داده شده است. مطابق شکل ۲، برای شرایط مرزی

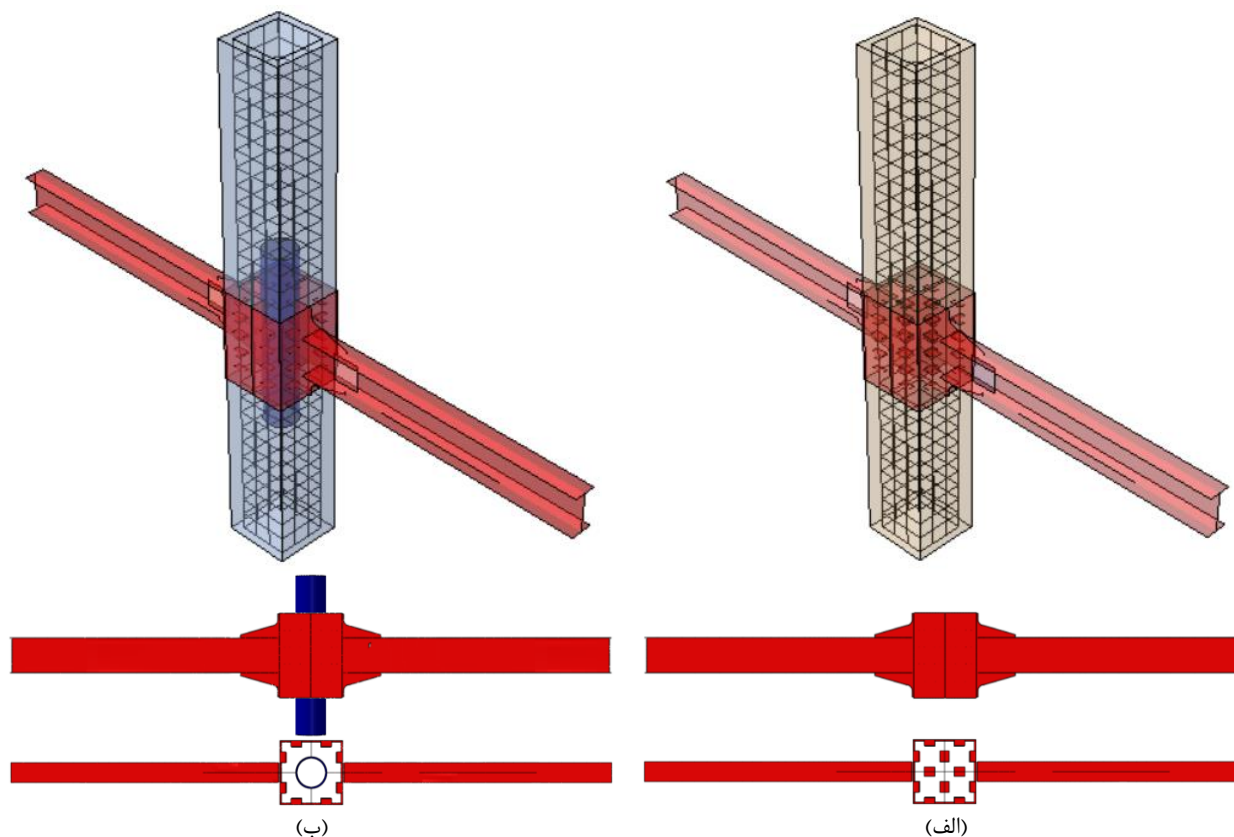
از تکیه گاه مفصلی ثابت در پایه ستون، تکیه گاه غلتکی در انتهای تیر و تکیه گاه جانبی استفاده شده است. همچنین، از بارگذاری چرخه‌ای و محوری در بالای ستون در مدل المان محدود استفاده شد. در همه مدل‌ها مقطع ستون بتنی 400×400 میلی‌متر با 12 میلگردهای فولادی $\Phi 18$ مسلح شده‌اند. تیر شامل یک مقطع I در کل مدل با ابعاد بال و جان به ترتیب 130×15 میلی‌متر و 230×10 میلی‌متر می‌باشد. مدل‌ها پارامتریک و استراتژی‌های عبارتند از:

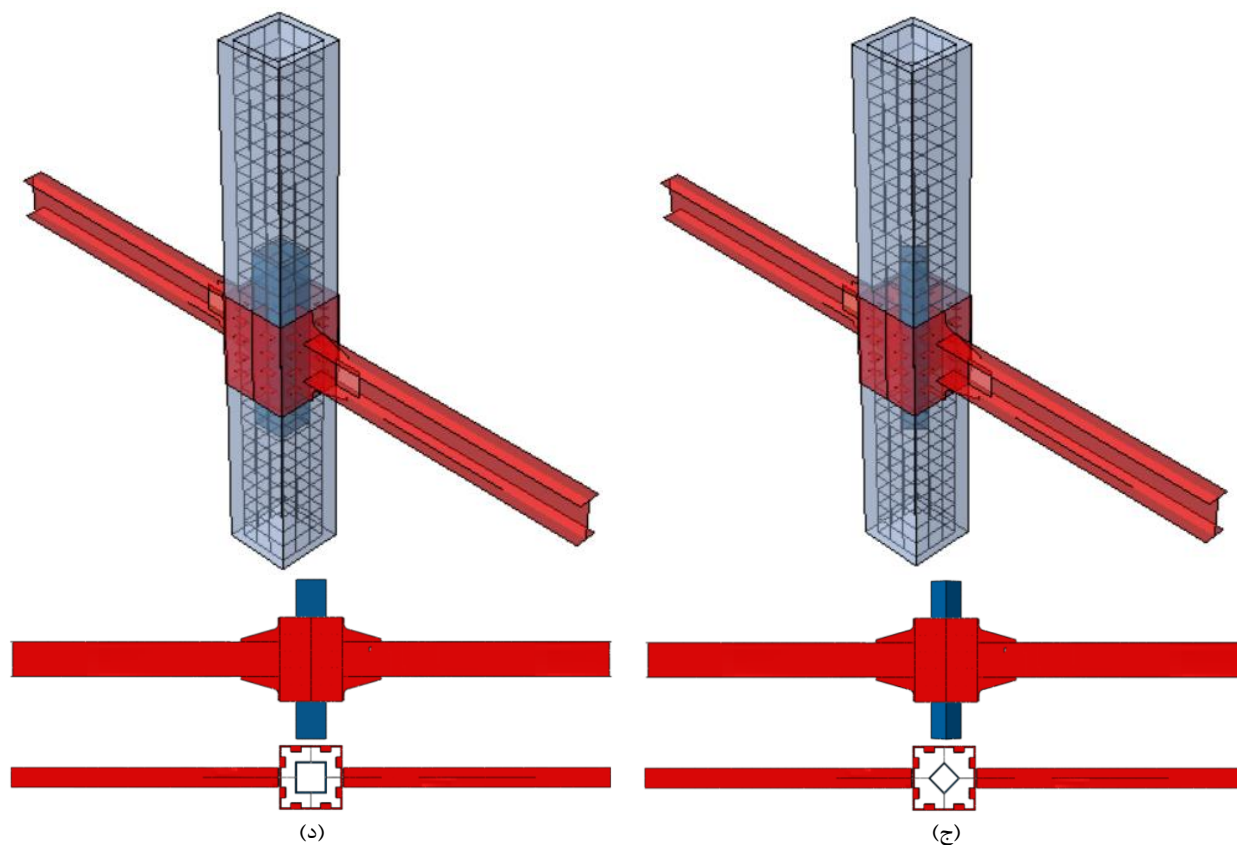
(i) اتصال تیر فولادی به ستون بتنی از طریق یک صفحه عبوری (TP): این مدل همان نمونه اعتبارسنجی اقبالی و میرقادری [11] است و به عنوان مدل پایه انتخاب شده است که در شکل ۶ (الف) نشان داده شده است.

(ii) اتصال تیر فولادی به ستون بتنی با لوله فولادی دو پوسته و لوله داخلی دایره ای (DSTC): این مدل دو لوله فولادی در ناحیه پانل برای اتصال تیر به ستون است و از یک لوله داخلی دایره‌ای استفاده شده است، که در شکل ۶ (ب) نشان داده شده است.

(iii) اتصال تیر فولادی به ستون بتنی با لوله فولادی دو پوسته و لوله داخلی لوزی (DSTR): این مدل دو لوله فولادی در ناحیه پانل برای اتصال تیر به ستون است و لوله داخلی به شکل لوزی استفاده می‌شود، که در شکل ۶ (ج) نشان داده شده است.

(IV) اتصال تیر فولادی به ستون بتنی با لوله فولادی دو پوسته و لوله داخلی مربعی (DSTS): این مدل دو لوله فولادی در ناحیه پانل برای اتصال تیر به ستون است و از یک لوله داخلی با مقطع مربع استفاده شده است، که در شکل ۶ (د) نشان داده شده است.





شکل ۶: هندسه و مشخصات هندسی مدل‌های مطالعه پارامتری.

هندسه و جزئیات ابعاد مدل‌های پارامتریک در جدول ۳ ارائه شده است. طبق جدول ۳، پارامترهای مورد بررسی در این تحقیق شامل ضخامت لوله داخلی (t_i) و هندسه لوله داخلی می‌باشد. طول لوله داخلی (L) که در شکل ۶ نشان داده شده است، ۸۰۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. ضخامت لوله داخلی (t_i) ۶، ۹، ۱۲، ۱۵، ۱۸، و ۲۴ میلی‌متر در نظر گرفته شده است (جدول ۳). همچنین ضخامت لوله داخلی و خارجی برای مطالعات پارامتریک به گونه‌ای انتخاب شده است که نسبت t_i/t_o ، ۰،۷۵، ۱،۰۰، ۱،۲۵، ۱،۵۰ و ۲،۰۰ باشد. نام و جزئیات ابعاد مدل‌های پارامتریک در جدول ۳ ارائه شده است. برای نامگذاری مدل‌ها از مخفف (DSTR، DSTC، یا DSTS) t_i/t_o استفاده شده است.

جدول ۳: پارامترهای هندسی و نتایج مدل‌های پارامتری

Model	External tube	Internal tube	$\frac{t_i}{t_o}$	Stiffness (kN/mm)	Max. Load (kN)	Max. Dissipated energy
	$B_e \times L_e \times t_e$	$B_i \times L_i \times t_i$ or $D_i \times t_i$				
TP		-	-	3.91	231.03	470.08
DSTC -0.50		200 × 6	0.50	3.91	232.23	473.48
DSTC -0.75		200 × 9	0.75	4.01	237.07	482.37
DSTC -1.00		200 × 12	1.00	4.10	241.95	492.29
DSTC -1.25		200 × 15	1.25	4.15	244.86	498.22
DSTC -1.50		200 × 18	1.50	4.28	252.48	513.73
DSTC -2.00		200 × 24	2.00	4.44	262.38	533.86
DSTR -0.50		200 × 200 × 6	0.50	3.91	231.05	470.12
DSTR -0.75		200 × 200 × 9	0.75	4.07	240.34	489.02
DSTR -1.00	400 × 400 × 12	200 × 200 × 12	1.00	4.19	247.34	503.26
DSTR -1.25		200 × 200 × 15	1.25	4.27	252.20	513.16
DSTR -1.50		200 × 200 × 18	1.50	4.43	261.72	532.53
DSTT -2.00		200 × 200 × 24	2.00	4.55	268.56	546.45
DSTS -0.50		200 × 200 × 6	0.50	3.95	233.34	474.78
DSTS -0.75		200 × 200 × 9	0.75	3.98	234.72	477.59
DSTS -1.00		200 × 200 × 12	1.00	4.06	239.55	487.42
DSTS -1.25		200 × 200 × 15	1.25	4.20	247.80	504.20
DSTS -1.50		200 × 200 × 18	1.50	4.44	262.38	533.86
DSTS -2.00		200 × 200 × 24	2.00	5.01	296.04	602.36

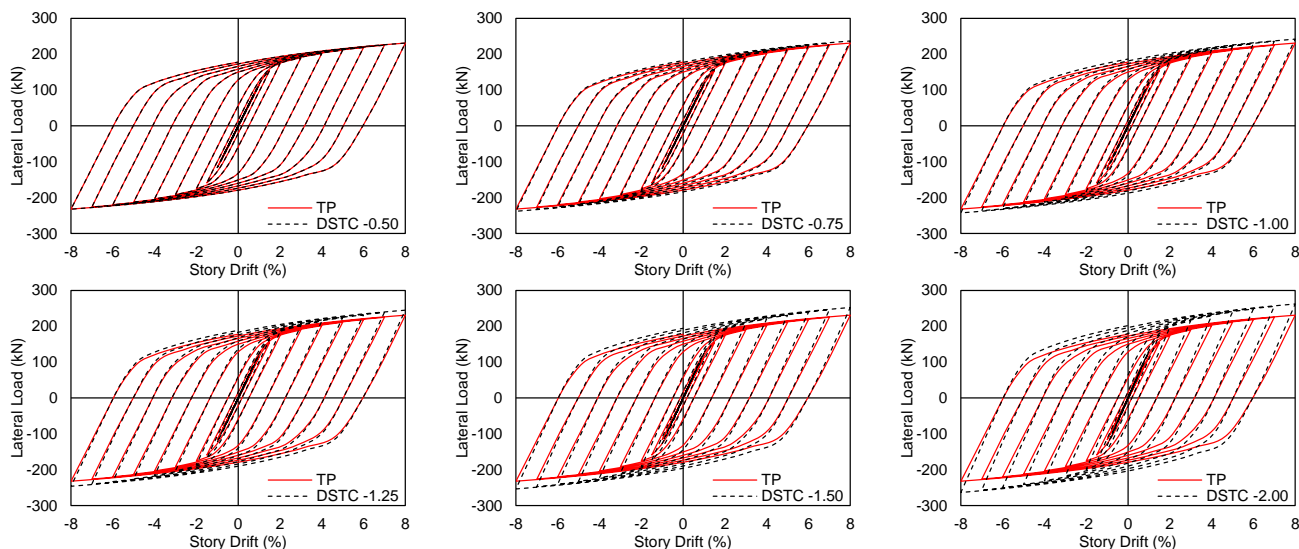
۴-۲- نتایج مدل‌های پارامتریک

نتایج مدل‌های مطالعه پارامتری تحت بارگذاری چرخه ای در جدول ۳ ارائه شده است. نتایج شامل سختی الاستیک، نیروی نهایی و اتلاف انرژی کل است. انرژی تلف شده بر اساس سطح محصور شده در داخل حلقه‌های هیستریزیس محاسبه شده است. انرژی کل اتلاف شده برابر است با مجموع کل سطوح داخل حلقه‌های هیستریزیس منحنی بار-جابجایی است. در ادامه، نتایج مورد بحث قرار گرفته و استراتژی‌های در نظر گرفته شده با مدل اصلی مقایسه می‌شوند.

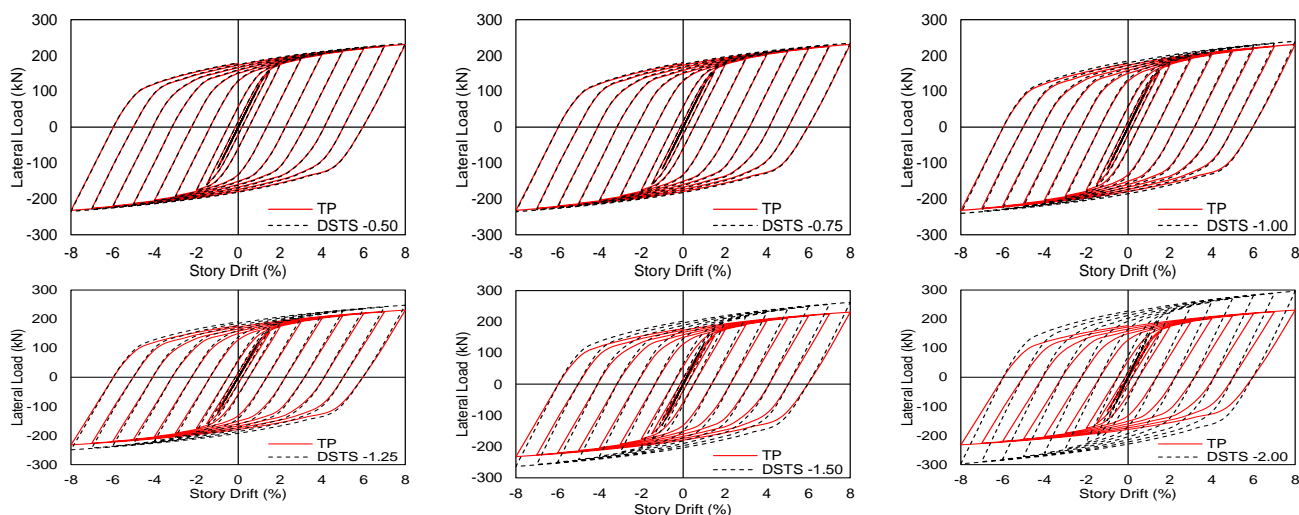
۵- نتایج و بحث

۵-۱- رفتار چرخه ای و یکنواخت مدل‌ها

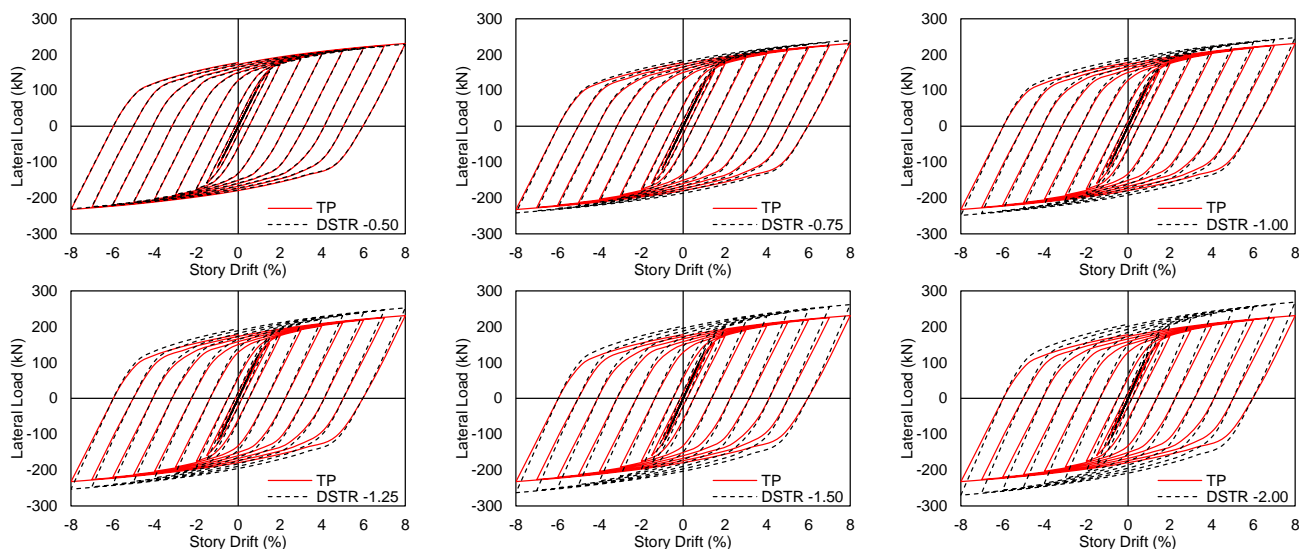
در شکل ۷-۹، منحنی‌های بار-جابجایی پسماند مدل‌های FE نشان داده شده است. مدل‌های بهبود یافته با مدل پایه (یعنی اتصال تیر فولادی به ستون RC از طریق یک صفحه عبوری (TP)) در شکل ۷-۹ و پسماند برای مقایسه منحنی‌های پسماند مدل پایه و مدل‌های بهبود یافته نشان داده شده‌اند. شکل ۱۰ مقایسه بین منحنی پوششی مدل‌های پارامتری را نشان می‌دهد. با مقایسه منحنی‌های پسماند و پوشش مدل‌های پارامتری در شکل ۱۰، برای $t_i/t_o \leq 1$ در مدل‌های بهبود یافته DSTC، DSTS، و DSTR، رفتار چرخه‌ای مشابه مدل TP است. تغییرات قابل توجهی در ظرفیت آنها مشاهده نشده است. همچنین با مقایسه منحنی‌های پسماند و پوشش مدل‌های پارامتریک در شکل ۱۰، مقادیر t_i/t_o در مدل‌های بهبود یافته DSTC، DSTS، و DSTR مشاهده می‌شود که ظرفیت آنها به طور متوسط ۲،۲ درصد افزایش می‌یابد. همچنین در این مدل‌های بهبود یافته با افزایش (افزایش ضخامت لوله داخلی)، ظرفیت نهایی، سفتی در حین بارگیری و تخلیه و سطح محصور در حلقه هیستریزیس افزایش می‌یابد (شکل ۷-۱۰). با توجه به انجیر ۸ و ۱۰ (ب)، مدل بهبود یافته DSTS رفتار متفاوتی را در رابطه با سایر مدل‌های ارائه شده نشان می‌دهد. این تفاوت در رفتار به دلیل عملکرد و مکانیسم تسلیم مدل پیشنهادی است. در مدل بهبود یافته، برای $t_i/t_o > 1$ ، ظرفیت نهایی به طور کلی با افزایش پارامتر t_i/t_o افزایش می‌یابد.



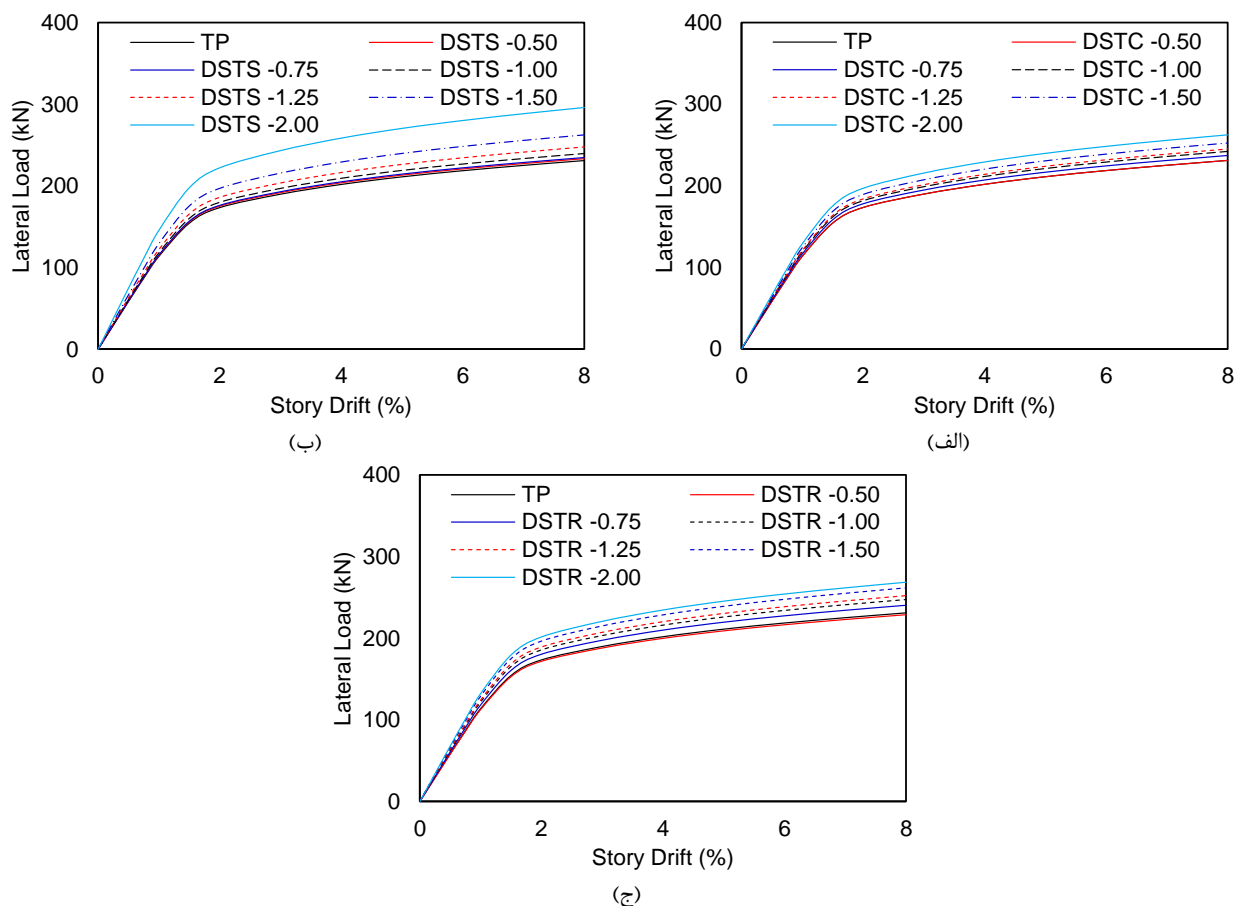
شکل ۷: نمودار هیستریزس نیرو-جابجایی مدل‌های پارامتریک DSTC



شکل ۸: نمودار هیستریزس نیرو-جابجایی مدل‌های پارامتریک DSTS



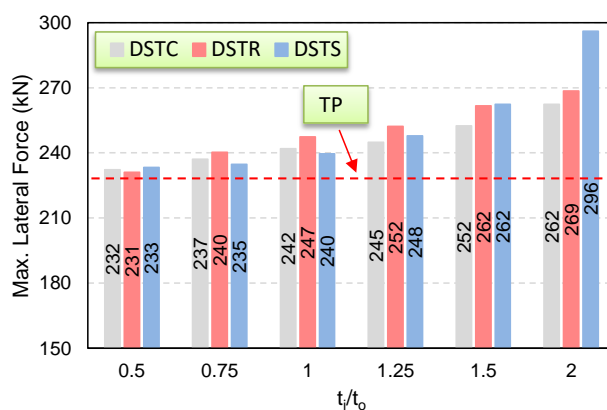
شکل ۹: نمودار هیستریزس نیرو-جابجایی مدل‌های پارامتریک DSTR



شکل ۱۰: نمودار نیرو-جابجایی مدل‌های پارامتریک: الف) DSTC، ب) DSTS و ج) DSTR.

۵-۲- حداکثر نیروی جانبی

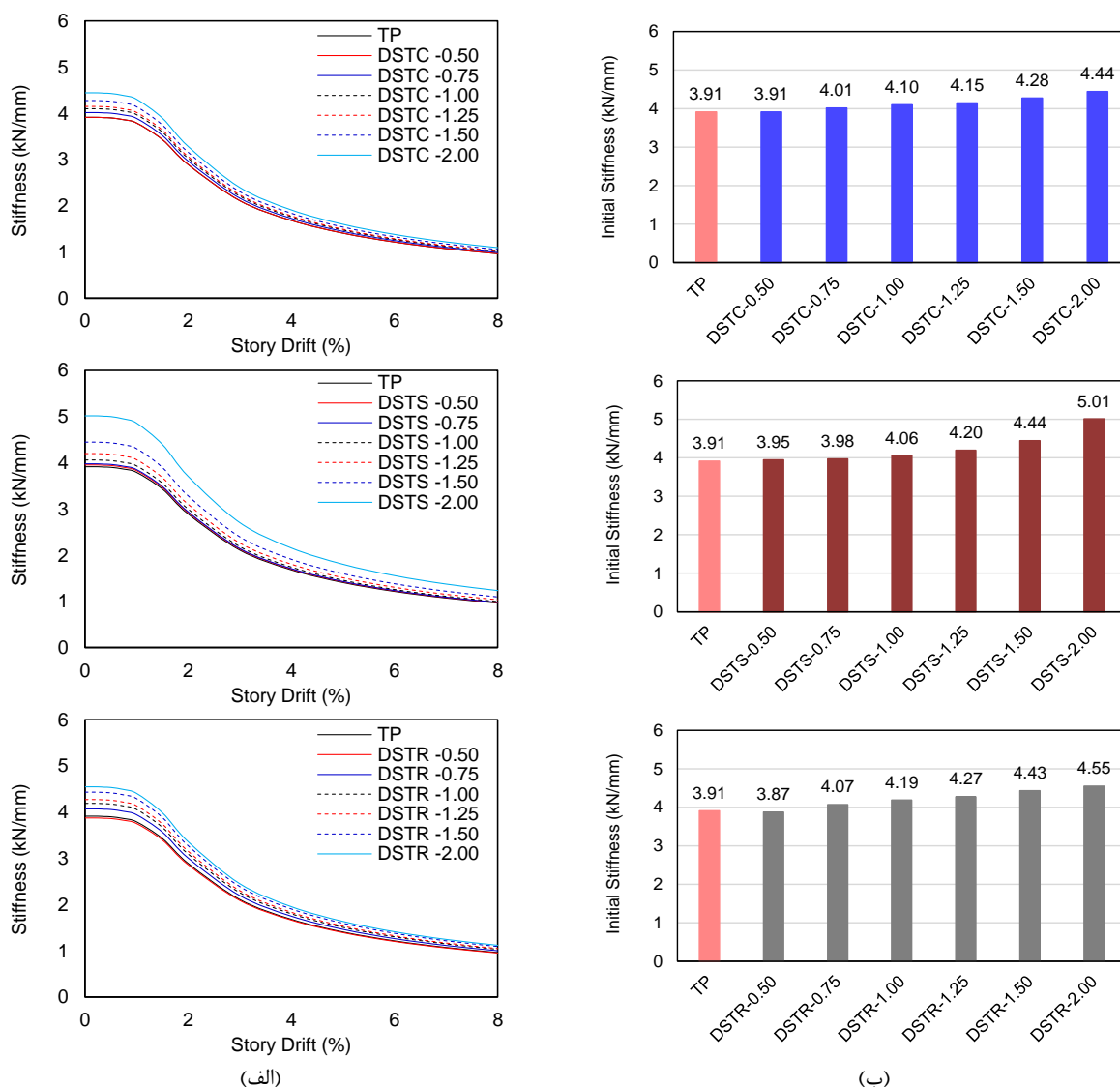
شکل ۱۱ نمودارهای میله ای نیروی جانبی نهایی مدل‌های پارامتری را نشان می‌دهد. طبق جدول ۳، برای مدل‌های DSTC، DSTS و DSTR با $t_i/t_o = 2$ ، نیروی جانبی نهایی به ترتیب ۲۶۲، ۲۶۹ و ۲۹۶ کیلو نیوتن بود که ۱۱٫۹٪، ۱۴٫۰٪ و ۲۲٫۰٪ افزایش را نسبت به TP نشان می‌دهد. مدل مقایسه بین مدل‌های بهبود یافته و مدل پایه (TP) نشان داد که نیروی جانبی نهایی توسط مدل DSTS نیروی جانبی نهایی بیشتری نسبت به مدل‌های دیگر دارد.



شکل ۱۱: حداکثر نیروی برشی مدل‌های المان محدود.

۵-۳- سختی

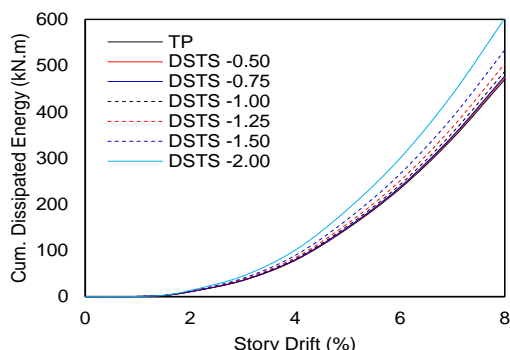
سختی اولیه یکی از اساسی ترین پارامترها در طراحی سازه ها می باشد. سکانت سختی برای توصیف کاهش سختی نمونه ها، همانطور که در شکل ۱۲ نشان داده شده است، اعمال می شود. سکانت سختی مربوط به گرادیان خطی است که از مبدأ (۰, ۰) و نقطه i -th (δ_i , P_i) روی منحنی پاکت. شکل ۱۲(الف) کاهش سختی را با افزایش جابجایی در نمونه ها نشان می دهد. سختی اولیه مدل های FE در شکل ۱۲(ب) نشان داده شده است. شکل ۱۲ مقایسه بین کاهش سختی و سختی اولیه مدل های پارامتری را نشان می دهد. با مقایسه کاهش سختی و سختی اولیه مدل های پارامتری در شکل ۱۰، برای مقادیر $t_i/t_0 \leq 1$ در مدل های بهبودیافته DSTC، DSTS و DSTR، رفتار مشابه مدل TP است و معنی داری مشاهده نشده است. تغییرات در کاهش سختی و سختی اولیه. همچنین، در این مدل های بهبود یافته، با افزایش t_i/t_0 (افزایش ضخامت لوله داخلی)، سختی اولیه نیز افزایش می یابد (شکل ۱۲(ب)).



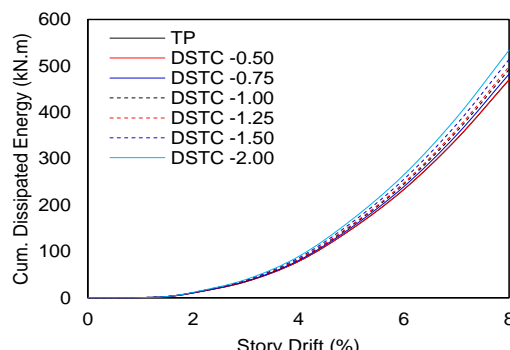
شکل ۱۲: الف) تغییرات سختی مدل های المان محدود و ب) سختی اولیه مدل های المان محدود.

۵-۴- انرژی مستهلک شده

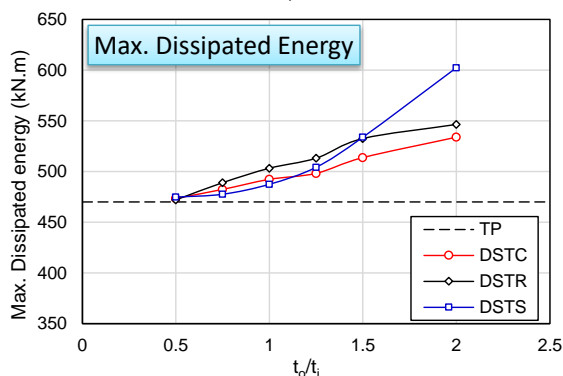
یکی از قابلیت های مهم سیستم های مقاوم در برابر لرزه، جذب مناسب انرژی آنها در ناحیه غیر کشسان است. این ویژگی دوام و پایداری حلقه های پسماند بار-جابجایی را نشان می دهد. انرژی جذب شده یا تلف شده یک سیستم تحت بارگذاری چرخه ای را می توان به عنوان ناحیه محصور بین حلقه های پسماند تعریف کرد که پاسخ بار-جابجایی یک سازه است. بنابراین انرژی تلف شده توسط سیستم سازه در هر زمان بارگذاری برابر است با مجموع انرژی انباشته تلف شده تا نقطه بارگذاری در چرخه های رفت و برگشتی حاصل از منحنی های پسماند بار-جابجایی. شکل ۱۳ منحنی انرژی تلف شده تجمعی را بر اساس رانش داستان و ظرفیت کل اتلاف انرژی مدل های عددی نشان می دهد. مدل ها شش چرخه بار اولیه (دریافت داستانی برابر با ۰.۸٪) را در فاز الاستیک و ظرفیت اتلاف انرژی بسیار کمی ارائه کردند. با مقایسه ظرفیت اتلاف انرژی کل مدل های پارامتریک در شکل ۱۳(د)، برای مقادیر $t_i/t_o \leq 1$ در مدل های بهبودیافته DSTS، DSTC و DSTR، ظرفیت اتلاف انرژی مشابه مدل TP است، و تغییرات قابل توجهی در ظرفیت اتلاف انرژی آنها مشاهده نشده است. همچنین در این مدل های بهبود یافته، برای $t_i/t_o > 1$ ، با افزایش t_i/t_o (افزایش ضخامت لوله داخلی)، کل انرژی تلف شده نیز افزایش می یابد (شکل ۱۳). طبق جدول ۳، برای مدل های DSTC، DSTR و DSTS با $t_i/t_o = 2$ ، ظرفیت تلف شده انرژی به ترتیب ۵۳۳، ۵۴۶ و ۶۰۲ کیلو نیوتن بر متر بود که ۱۱.۹، ۱۴.۲ و ۲۲.۱ درصد افزایش را نسبت به مدل TP همچنین برای مدل های DSTC و DSTR با $t_i/t_o = 0.50$ ، ظرفیت اتلاف انرژی به ترتیب ۴۷۰، ۴۷۲ و ۴۷۴ کیلو نیوتن بر متر بوده که نسبت به مدل TP 0.7، 0.5 و ۱ درصد افزایش نشان می دهد. مقایسه بین مدل های بهبود یافته و مدل پایه (TP) نشان داد که انرژی جذب شده توسط مدل DSTS با چرخه بار یکسان، اتلاف انرژی بیشتری را نسبت به مدل های دیگر ارائه می دهد. با توجه به اینکه اتلاف انرژی با ورود به ناحیه غیرخطی رخ می دهد، مطابق شکل ۱۳(د)، انرژی جذب شده بیشتری در مدل های DSTS می تواند به عملکرد لوله داخلی اختصاص داده شود. با توجه به نتایج، مدل DSTS با $t_i/t_o = 0.50$ ، 1.00، 0.75، 1.50، ۲.۰۰، ۱.۰، ۱.۶، ۳.۶، ۶.۸، ۱۱.۹ و ۲۲.۱٪ اتلاف انرژی بیشتری نسبت به مدل TP متناظر خود نشان داد است.



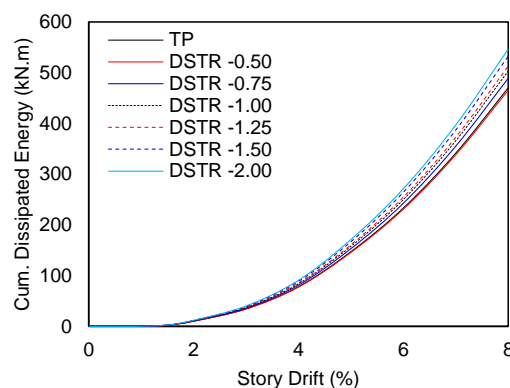
(ب)



(ف)



(د)



(ج)

شکل ۱۳: انرژی مستهلک شده تجمعی: الف) DSTC، ب) DSTS، ج) DSTR، و د) انرژی کل مستهلک شده مدل‌ها.

۶- نتیجه گیری

در این مطالعه، رفتار چرخه‌ای، عملکرد و اتلاف انرژی اتصال تیر فولادی به ستون بتن مسلح با لوله‌های فولادی دو پوسته با روش‌های عددی مورد بررسی قرار گرفت. در این مطالعه، روش‌های مختلفی برای بهبود رفتار چرخه‌ای و عملکرد اتصالات تیرهای فولادی به ستون بتن مسلح پیشنهاد شده‌است. رفتار چرخه‌ای اتصال تیر فولادی به ستون بتن مسلح با لوله فولادی دو پوسته با استفاده از روش المان محدود و با استفاده از نرم‌افزار آباکوس مورد بررسی قرار گرفت. مدل‌های المان محدود با جزئیات ساختاری مختلف برای مطالعات پارامتریک توسعه داده شدند. همچنین، مدل‌ها در برابر نتایج آزمون اعتبار سنجی شدند. در مدلسازی، رفتار غیرخطی هندسی و مواد در مطالعه در نظر گرفته شد. در مطالعات پارامتریک، تأثیر ضخامت و شکل مقطع لوله داخلی در مدل‌های بهبودیافته بررسی شد. نتایج مطالعات عددی شامل منحنی چرخه‌ای بار-جابجایی، سختی الاستیک، ظرفیت نهایی و اتلاف انرژی کل بود. نتایج نشان داد که ضخامت و شکل مقطع لوله داخلی در اتصال تیر فولادی به ستون بتن مسلح با لوله‌های فولادی دو پوسته تأثیر قابل توجهی در تعیین ظرفیت نهایی و اتلاف انرژی دارد. همچنین، نتایج نشان داد که جزئیات ساختاری لوله داخلی تأثیر قابل توجهی بر رفتار چرخه‌ای مدل‌ها دارد. با توجه به نتایج مطالعات پارامتریک، طراحی و عملکرد بهینه تنها در مدل‌های DSTC، DSTR و DSTS در محدوده $t_i/t_o > 1$ مشاهده شده است که اتلاف انرژی و ظرفیت نهایی را افزایش می‌دهد. همچنین، انتخاب ابعاد مناسب برای لوله داخلی، ظرفیت نهایی و اتلاف انرژی تیر فولادی به اتصال ستون بتن مسلح با لوله فولادی دو پوسته را افزایش می‌دهد.

مراجع

- [1] A. Karimian, A. Armaghani, A. Behraves, Performance of Low-yield Strength Plates in Beam-column Connections against Progressive Collapse, *KSCE J. Civ. Eng.* 23 (2019) 335–345. <https://doi.org/10.1007/s12205-018-0653-y>.
- [2] B. Farahmand Azar, H. Ghaffarzadeh, N. Talebian, Seismic performance of composite RCS special moment frames, *KSCE J. Civ. Eng.* 17 (2013) 450–457. <https://doi.org/10.1007/s12205-013-1431-5>.
- [3] T.M. Sheikh, G.G. Deierlein, J.A. Yura, J.O. Jirsa, Beam-Column Moment Connections for Composite Frames: Part 1, *J. Struct. Eng.* 115 (1989) 2858–2876. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1989\)115:11\(2858\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1989)115:11(2858)).
- [4] G. Parra-Montesinos, J.K. Wight, Seismic Response of Exterior RC Column-to-Steel Beam Connections, *J. Struct. Eng.* 126 (2000) 1113–1121. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9445\(2000\)126:10\(1113\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9445(2000)126:10(1113)).
- [5] C.T. Cheng, C.C. Chen, Seismic behavior of steel beam and reinforced concrete column connections, *J. Constr. Steel Res.* 61 (2005) 587–606. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2004.09.003>.
- [6] W. Li, Q.N. Li, W.S. Jiang, Parameter study on composite frames consisting of steel beams and reinforced concrete columns, *J. Constr. Steel Res.* 77 (2012) 145–162. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2012.04.007>.
- [7] M.H. Habashizadeh Asl, M.R. Chenaglou, K. Abedi, H. Afshin, 3D finite element modelling of composite connection of RCS frame subjected to cyclic loading, *Steel Compos. Struct.* 15 (2013) 281–298. <https://doi.org/10.12989/scs.2013.15.3.281>.
- [8] S. Alizadeh, N.K.A. Attari, M.T. Kazemi, The seismic performance of new detailing for RCS connections, *J. Constr. Steel Res.* 91 (2013) 76–88. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2013.08.010>.
- [9] S. Alizadeh, N.K.A. Attari, M.T. Kazemi, Experimental investigation of RCS connections performance using self-consolidated concrete, *J. Constr. Steel Res.* 114 (2015) 204–216. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2015.07.026>.
- [10] S.R. Mirghaderi, N. Bakhshayesh Eghbali, M.M. Ahmadi, Analytical investigation of a new through-column-type joint for reinforced concrete and steel frames, in: *Proc. 7th Int. Conf. Seismol. Earthq. Eng. Int. Inst. Earthq. Eng. Seismol. (IIEES)*, Tehran, Iran, 2015.
- [11] N. Bakhshayesh Eghbali, S.R. Mirghaderi, Experimental investigation of steel beam to RC column connection via a through-plate, *J. Constr. Steel Res.* 133 (2017) 125–140. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2017.02.007>.
- [12] ABAQUS-6.14, Standard user's manual. Hibbit, Karlsson and Sorensen, Inc., (2014).
- [13] T. Ghanbari-Ghazijahani, A. Nabati, M. Gorji Azandariani, N. Fanaie, Crushing of steel tubes with different infills under partial axial loading, *Thin-Walled Struct.* 149 (2020) 106614. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2020.106614>.
- [14] M. Gorji Azandariani, T. Ghanbari-Ghazijahani, A. Mohebkhah, M. Classen, Concrete- and timber-filled tubes under axial compression – Numerical and theoretical study, *J. Build. Eng.* 44 (2021) 103231. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.103231>.

- [15] M. Gorji Azandariani, M. Gholhaki, M.A. Kafi, Hysteresis finite element model for evaluation of cyclic behavior and performance of steel plate shear walls (SPSWs), *Structures*. 29 (2021) 30–47. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.11.009>.
- [16] M. Gorji Azandariani, M. Gholhaki, M.A. Kafi, T. Zirakian, Study of Effects of Beam-Column Connection and Column Rigidity on the Performance of SPSW System, *J. Build. Eng.* (2020) 101821. <https://doi.org/10.1016/j.job.2020.101821>.
- [17] M. Gorji Azandariani, M.A. Kafi, M. Gholhaki, Innovative hybrid linked-column steel plate shear wall (HLCS) system: Numerical and analytical approaches, *J. Build. Eng.* 43 (2021) 102844. <https://doi.org/10.1016/j.job.2021.102844>.
- [18] M. Gholhaki, B. Eshrafi, M. Gorji Azandariani, O. Rezaeifar, Seismic assessment of linked-column frame structural system considering soil-structure effects, *Structures*. 33 (2021) 2264–2272. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.06.005>.
- [19] M. Elchalakani, V.I. Patel, A. Karrech, M.F. Hassanein, S. Fawzia, B. Yang, Finite element simulation of circular short CFST columns under axial compression, *Structures*. 20 (2019) 607–619. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2019.06.004>.
- [20] M. Adibi, R. Talebkhaha, A. Yahyaabadib, Simulation of cyclic response of precast concrete beam-column joints, *Comput. Concr.* 24 (2019) 223–236. <https://doi.org/10.12989/cac.2019.24.3.223>.
- [21] J.B. Mander, M.J.N. Priestley, R. Park, Theoretical stress-strain model for confined concrete, *J. Struct. Eng.* 114 (1988) 1804–1826. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1988\)114:8\(1804\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1988)114:8(1804)).