

Numerical investigation of the beam-to-circular column connection using a new external stiffener

Shohreh Sohaei¹, Mehrzad TahamouliRoudsari^{2,3*}, Parham Memarzadeh⁴

1- Ph.D. Student, Department of Civil Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran

2- Associate Professor, Department of Civil Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran

3- Associate Professor, Department of Civil Engineering, Kermanshah Branch, Islamic Azad University, Kermanshah, Iran

4- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran

ABSTRACT

Continuity and doubler plates are used to strengthen the panel zone of rigid connections in steel structures. Unless columns are cut in every story of the building, it is not possible to connect these plates to rigid I-shaped beam-to-circular column connections. To overcome this problem, many researchers have employed external stiffeners. In 2019, a new detailing scheme was introduced for these connections using external stiffeners. Six full-scale experimental samples were built and tested under cyclic loading. Even though the efficiency of the new connection was established using laboratory tests, the study did not discuss the issues relating to the design process. In the present study, to formulate design criteria and relationships, numerical models have been constructed inside ABAQUS and verified using the experimental data. The results obtained from more than 60 finite element models have revealed that the proposed detailing scheme meets all of the code-specified criteria of rigid beam-column connections in special moment resisting frames. Further, based on the thickness of the channel profile and the stiffeners, the proposed detailing can be categorized as either rigid or semi-rigid. Finally, design criteria have been proposed and these connections can be considered as a suitable detailing for I-shape beam to tube column connections.

ARTICLE INFO

Receive Date: 02 May 2022

Revise Date: 28 July 2022

Accept Date: 04 August 2022

Keywords:

Special moment-resisting frame,
Rigid connection,
Circular column,
External stiffener,
Nonlinear finite element analysis

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2022.339870.2801>

*Corresponding author: Mehrzad TahamouliRoudsari.
Email address: tahamouli@iauksh.ac.ir

بررسی عددی اتصال تیر به ستون دایره‌ای با استفاده از نوع جدیدی از سخت‌کننده خارجی

شهره سہائی^۱، مہرزاد تحملی رودسری^{۲*}، پرهام معمارزادہ^۴

۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران.

۲- دانشیار، گروه مهندسی عمران، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران.

۳- دانشیار، گروه مهندسی عمران، واحد کرمانشاه، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمانشاه، ایران.

۴- استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران.

چکیده

برای تقویت چشمه اتصال در اتصالات صلب سازه‌های فولادی، از ورق‌های پیوستگی و ورق مضاعف استفاده می‌شود. امکان نصب این ورق‌ها در اتصال صلب تیر I شکل به ستون دایره‌ای وجود ندارد، مگر اینکه ستون در هر طبقه قطع گردد. برای رفع این مشکل بسیاری از محققین از سخت‌کننده‌های خارجی استفاده نموده‌اند. در سال ۲۰۱۹ دتایل جدیدی با استفاده از ناودانی سخت شده برای این اتصال ارائه شد. شش نمونه آزمایشگاهی مقیاس کامل ساخته و تحت اثر بارگذاری چرخه‌ای تست شد. در آن تحقیق گرچه کارایی اتصال جدید با انجام تست‌های آزمایشگاهی اثبات شد ولی برای طراحی این اتصالات بحثی نشد. در این مقاله برای ارائه ضوابط طراحی، مدل عددی در محیط نرم افزار المان محدود آباکوس ساخته و براساس نتایج آزمایشگاهی، راستی‌سنجی گردید. نتایج بیش از ۶۰ تحلیل المان محدود غیرخطی نشان داد که دتایل ارائه شده می‌تواند کلیه ضوابط آیین‌نامه‌ای را برای اتصال صلب تیر به ستون، در قاب خمشی ویژه برآورده نماید. ضمناً بر اساس ضخامت ناودانی و سخت‌کننده‌ها، دتایل پیشنهادی می‌تواند در گروه اتصالات صلب یا نیمه صلب قرار گیرد. نهایتاً ضوابطی برای طراحی این اتصالات ارائه شد و دتایل مورد نظر میتواند برای اتصال تیر I شکل به ستون دایره‌ای بکار گرفته شود.

کلمات کلیدی: قاب خمشی فولادی ویژه، اتصال صلب ستون دایره‌ای، سخت‌کننده خارجی، تحلیل المان محدود غیرخطی.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	https://doi.org/10.22065/jsce.2022.339870.2801	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2022.339870.2801	۱۴۰۲/۰۳/۳۱	۱۴۰۱/۰۵/۱۳	۱۴۰۱/۰۵/۱۳	۱۴۰۱/۰۵/۰۶	۱۴۰۱/۰۲/۱۲
مهرزاد تحملی رودسری tahamouli@iauksh.ac.ir				*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:		

۱- مقدمه

اتصالات در سازه‌های فولادی، خصوصاً قاب‌های خمشی از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند. ورود سازه به فاز پلاستیک در اثر تغییر شکل‌های بزرگ، اتلاف انرژی را در سازه افزایش می‌دهد. البته سازه باید بتواند با حفظ یکپارچگی، قابلیت پذیرش این تغییر شکل‌های زیاد را داشته باشد. در این راستا قاب‌های خمشی ویژه باید طوری طراحی شوند که مفاصل پلاستیک در دو انتهای تیر، ولی خارج از ناحیه اتصال تشکیل شوند. در هر صورت تشکیل مفصل پلاستیک در اثر تغییر شکل‌های زیاد در قاب، باعث ایجاد لنگر و برش بزرگی در اتصالات می‌گردد. اتصالات صلب باید برای این برش‌ها و لنگرهای تشدید یافته طراحی گردند. پس از زلزله نورث ریج ۱۹۹۴ اتصالات صلب تیر به ستون مورد توجه بیشتری قرار گرفتند. تعدادی از اتصالات نیز به عنوان اتصالات صلب از پیش تأیید شده معرفی شدند که برای ستون‌های مربعی یا I شکل کاربرد دارند [1]. در این زمینه دتایل‌های جدیدی، مانند اتصال تیر با مقطع کاهش یافته نیز ارائه گردید که هدف آنها کاهش ریسک گسیختگی در اتصال بود [2, 3].

در ستون‌های دایره‌ای فولادی، اجرای اتصال صلب متعارف به علت وضعیت خاص هندسی، بسیار دشوار است. زیرا در اتصال صلب مستقیم تیر I شکل به ستون دایره‌ای، باید بال تیر بصورت منحنی بریده شود و اجرای مناسب این نوع برش، و همزمان استفاده از جوش نفوذی کامل، مشکل است. همچنین امکان ایجاد اتصال صلب فلنجی تیر به ستون دایره‌ای به کمک پیچ و مهره، به علت عدم دسترسی برای پیش‌تنیده کردن پیچ‌ها، وجود ندارد. در اتصالات صلب برای بالا بردن مقاومت چشمه اتصال، در بسیاری از موارد از ورق‌های پیوستگی و مضاعف استفاده می‌شود. از آنجا که امکان نصب ورق‌های پیوستگی یا مضاعف در چشمه اتصال ستون دایره‌ای وجود ندارد، این مورد یکی از نقاط ضعف این نوع ستون محسوب می‌گردد. تغییر شکل زیاد در محل اتصال بال تیر به ستون به علت عدم نصب ورق‌های پیوستگی، با افزایش تمرکز تنش، شکست در جوش بال تیر به ستون را در پی خواهد داشت. در این زمینه تحقیقات زیادی انجام شده است که در ادامه به برخی از آنها اشاره می‌شود.

در رابطه با اتصال تیر فولادی و ستون دایره‌ای یا مربعی پر شده با بتن تحقیقات متعددی انجام شده است [4-11]. در بسیاری از تست‌ها مشاهده شد جوش متصل‌کننده بال تیر به ستون، در صورت عدم استفاده از ورق پیوستگی یا سخت‌کننده خارجی، در معرض پارگی قرار می‌گیرد. دلیل آن، ترد بودن جوش و حساسیت آن به تغییر شکل است. این پدیده که در بارگذاری چرخه‌ای تشدید می‌شود، باعث افت زودرس نمودار هیستریزس شده و رفتار کلی اتصال را تحت تأثیر قرار می‌دهد. محققین جهت رفع این مشکل و افزایش شکل‌پذیری و اتلاف انرژی، از سخت‌کننده‌های خارجی و داخلی مختلفی در ناحیه اتصال استفاده کردند [12-15]. اتصالات بررسی شده در ستون دایره‌ای پر شده با بتن نشان داد مقاومت نهایی با وجود بتن، افزایش و ظرفیت تسلیم و بار نهایی با افزایش طول ورق اتصال افزایش می‌یابد [16]. در مدل ارائه شده اتصال در ستون مربعی پر شده با بتن ضوابط لازم آیین‌نامه برآورده شد [17]. در اکثر موارد این اتصالات جدید، مقاومت و شکل‌پذیری خوبی را تحت اثر بارگذاری چرخه‌ای نشان می‌دهند، ولی به علت پیچیده بودن هندسه، از نظر اجرایی مناسب نیستند.

تحقیقات مشابهی نیز در زمینه اتصالات ستون‌های مستطیلی پر نشده با بتن انجام شد [18-22]. این تحقیقات نیز نشان داد که در صورت عدم استفاده از ورق‌های پیوستگی، امکان شکست در جوش اتصال بال تیر به ستون بیشتر است. انواع مختلفی از سخت‌کننده‌های داخلی یا خارجی پیشنهاد شدند که توانستند باعث ارتقاء عملکرد اتصال شوند. بنابراین ممکن است که از نظر ضوابط آیین‌نامه‌ای مورد تأیید باشند ولی بازهم اکثر آنها اقتصادی، و از نظر اجرایی مناسب و ساده نیستند. استفاده از سخت‌کننده‌های خارجی نسبت به سخت‌کننده‌های داخلی در این نوع اتصالات ارجحیت دارند. زیرا بدون نیاز به دسترسی به داخل ستون، یا ایجاد برش در ستون، امکان اجرای اتصال را فراهم می‌کنند. اتصالاتی مانند کان‌یکس‌ال یا یقه‌ای^۲ نمونه‌ای از این نوع سخت‌کننده‌های خارجی هستند که مورد توجه محققین قرار گرفتند. عملکرد لرزه‌ای این اتصالات با مدل‌های عددی و آزمایشگاهی مختلف مورد تأیید قرار گرفت [23-25]. بررسی عددی اتصال یقه‌ای در ستون

1 CONXL

2 Collar

مربعی پر نشده با بتن نشان داد که این اتصال می‌تواند آستانه دوران مورد نظر آیین‌نامه را برآورده کند [26]. تحقیقات نشان داد وجود سخت‌کننده می‌تواند علاوه بر افزایش ظرفیت اتصال، از شکست ترد جلوگیری کند. ظرفیت نهایی و دوران ناحیه اتصال به ضخامت سخت‌کننده در ناحیه اتصال بستگی دارد. وجود سخت‌کننده در ناحیه اتصال می‌تواند به طور موثری به انتقال بارها کمک کند. همچنین وجود سخت‌کننده به طور قابل ملاحظه‌ای می‌تواند اتلاف انرژی و شکل‌پذیری ناحیه اتصال را بالا ببرد [27-29]. البته جزئیات اجرایی اتصالات ارائه شده در این سه تحقیق پیچیده بود، به نحوی که استفاده از آنها در عمل بسیار محدود است.

تحملی رودسری و همکاران در سال ۲۰۱۹ و ۲۰۲۰ دتایل جدیدی را برای اتصال تیر I شکل به ستون دایره‌ای پر شده/نشده با بتن ارائه نمودند [30-31]. آنها در هر کدام از دو مقاله، ۶ نمونه آزمایشگاهی ساختند. نمونه اول اتصال مستقیم تیر به ستون بود و در نمونه‌های بعدی از رابط ناودانی سخت نشده/سخت شده استفاده شده بود. نتایج نشان داد که نمونه‌های دارای رابط ناودانی سخت شده، در حالتی که سخت‌کننده‌ها در راستای بال تیر قرار می‌گیرند، عملکرد بسیار مناسبی دارند. این نوع از اتصالات تمام ضوابط آیین‌نامه را برای اتصال صلب تیر به ستون در قاب خمشی ویژه برآورده می‌نمایند. گرچه کارایی اتصال با انجام تست‌های آزمایشگاهی اثبات شد ولی تحلیل عددی انجام نشد و ضوابط طراحی خاصی ارائه نگشت.

به علت شکل هندسی ستون دایره‌ای، اتصال صلب مستقیم تیر I شکل به ستون، با جوش نفوذی کامل دشوار است. همچنین عدم امکان نصب ورق‌های پیوستگی در برابر بال‌های تیر در محل اتصال به ستون، باعث پارگی ستون یا شکست در جوش می‌شود و مقاومت در چشمه اتصال به شدت کاهش می‌یابد. دتایل جدید ارائه شده توسط تحمیلی و همکاران [30] برای اتصال صلب تیر I شکل به ستون دایره‌ای علاوه بر عملکرد لرزه‌ای مناسب، از نظر اجرایی نیز ساده و مقرون به صرفه است. این دتایل جدید، استفاده از ناودانی سخت شده، به عنوان یک سخت‌کننده خارجی است که می‌تواند جهت اتصال صلب یا نیمه صلب به کار رود.

هدف اصلی این مقاله ارزیابی عددی و ارائه ضوابط طراحی برای اتصال صلب تیر I شکل به ستون دایره‌ای، ارائه شده توسط تحمیلی رودسری و همکاران است. ابتدا نتایج آزمایشگاهی توسط نرم افزار المان محدود آباکوس مدل‌سازی و صحت سنجی شدند. با تغییر سایز تیر و ستون در مدل عددی و انجام ده‌ها تحلیل المان محدود غیرخطی، حداقل ابعاد و ضخامت لازم برای ناودانی سخت شده ارائه شد. در ادامه سختی اتصال جدید براساس ضوابط آیین‌نامه آمریکا^۳ برای قرارگیری در مجموعه اتصالات صلب با نیمه صلب ارزیابی شد. نتایج تحلیل‌های عددی نشان داد که با تغییر ضخامت ناودانی و سخت‌کننده‌ها، این اتصال می‌تواند در گروه اتصالات صلب یا نیمه صلب قرار گیرد. بنابراین استفاده از این دتایل مناسب و ساده برای اتصال صلب یا نیمه صلب تیر I شکل به ستون دایره‌ای، در نواحی لرزه خیز با خطر نسبی بالا پیشنهاد می‌گردد.

۲- کار تحقیقی تحمیلی رودسری و همکاران

شش نمونه آزمایشگاهی مقیاس کامل ساخته شد و نمونه‌ها تحت اثر بارگذاری چرخه‌ای طبق پروتکل پیشنهادی آیین‌نامه فما ۳۵۰^۴ قرار گرفتند [32]. برای تیر از پروفیل IPE180 و برای ستون از لوله نورد شده با قطر خارجی ۲۱۹/۵۴ میلی‌متر و ضخامت ۸/۱۸ میلی‌متر استفاده شد. در نمونه اول اتصال صلب تیر به ستون، به صورت مستقیم اجرا شد (نمونه DC). در نمونه CC برای اتصال تیر به ستون از یک رابط ناودانی سخت‌نشده و برای بقیه نمونه‌ها از رابط ناودانی سخت‌شده استفاده شد (CSC-I-IV). تیر به جان ناودانی، و بال‌های ناودانی به ستون متصل شدند. بهترین عملکرد مربوط به نمونه CSC-I بود که دتایل آن در شکل ۱ ملاحظه می‌گردد. شکل ۱-الف نمونه آزمایشگاهی واقعی را نشان می‌دهد. شکل ۱-ب تصویر از بالا و شکل ۱-پ تصویر از روبروی نمونه آزمایشگاهی است. شکل ۱-ت نیز تصویر جانبی سخت‌کننده است که ابعاد و جزئیات آن مشخص می‌باشد.

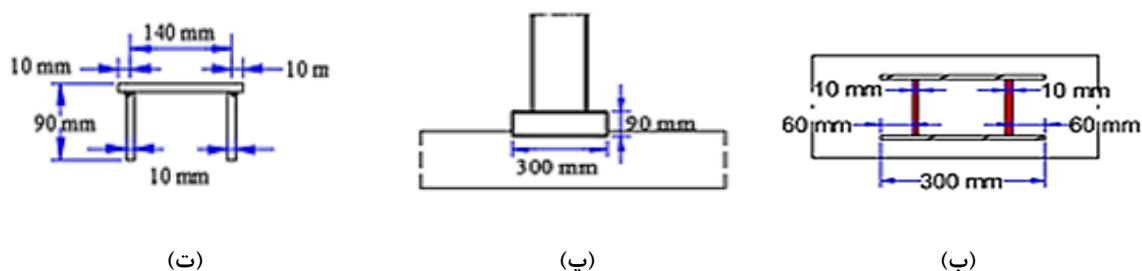
³ AISC

⁴ FEMA350

نمونه‌ها به کمک دو صفحه و توسط هشت پیچ با قطر ۲۴ میلیمتر و مقاومت تسلیم اسمی ۶۴۰ Mpa به تکیه‌گاه متصل شدند. نمونه‌ها توسط مهارهای جانبی محصور شدند تا از تغییر شکل‌ها و حرکات خارج از صفحه جلوگیری به عمل آید. بارگذاری تا جایی ادامه یافت که شکست بطور واضحی در نمونه‌ها مشاهده شود و نمودار هیستریزیس افت کند.



(الف)



(ت)

(پ)

(ب)

شکل ۱: (الف) نمونه آزمایشگاهی - جزئیات برای نمونه CSC-I (ب) نمای بالا از تیر، اتصال و بخشی از ستون (پ) نمای روبرو (ت) نمای جانبی فقط از سخت‌کننده

در نمونه DC در اولین سیکل از دررفت ۴ درصد پارگی و گسیختگی موضعی در ستون، در محل اتصال به بال تیر ایجاد شد که باعث افت نمودار هیستریزیس گردید. براساس جدول ۱ در مرجع تحملی رودسری و همکاران و استفاده از میانگین تنش تسلیم بال و جان، لنگر پلاستیک در تیر ۵۱/۶ kN.m بدست می‌آید. بنابراین مود شکست ایجاد شده در نمونه، مود نامطلوبی است و مفصل پلاستیک در تیر تشکیل نشده است.

در نمونه CSC-I تا دررفت ۵ درصد هیچ شکست یا ترک خاصی در نمونه مشاهده نشد. در سیکل دوم از دررفت ۶ درصد اولین نشانه‌ها از کمناش موضعی در بال تیر مشاهده شد و در ادامه به جان تیر توسعه یافت. ظرفیت نهایی اتصال ۶۷/۲۷ kN.m و در دررفت ۷ درصد است. پایداری نمودار هیستریزیس، مقاومت نهایی و مود شکست در این نمونه بسیار مناسب است. ایجاد کمناش موضعی در بال تیر به علت ورود بال به فاز غیرخطی و تشکیل مفصل پلاستیک در تیر است. لنگر نهایی نمونه نیز از لنگر پلاستیک تیر بیشتر است، که موید تشکیل مفصل پلاستیک در تیر است. این عملکرد مناسب را می‌توان به وجود ناودانی سخت شده نسبت داد که نیاز به ورق‌های پیوستگی و ورق مضاعف را در چشمه اتصال رفع کرده است.

در مرجع تحملی رودسری و همکاران [30] جهت مقایسه دقیق تر رفتار نمونه‌های آزمایشگاهی، اتلاف انرژی، سختی مؤثر و شکل پذیری آنها محاسبه و مقایسه گردید. با ترسیم نمودار اسکلت^۵ و برازش نمودار دوخطی معادل بر آن، می‌توان سختی مؤثر، مقاومت نهایی و شکل‌پذیری نمونه‌ها را محاسبه نمود. نمودار دوخطی براساس قانون انرژی معادل، بر نمودار اسکلت برازش داده شد [33]. از نمودارهای دوخطی معادل به سادگی می‌توان لنگر تسلیم (M_y)، دررفت تسلیم (θ_y)، لنگر نهایی (M_u) و دررفت نهایی (θ_u) را قرائت نمود. در اینصورت سختی مؤثر (K_e) و شکل‌پذیری (μ) بصورت زیر بدست می‌آیند:

$$K_e = M_y / \theta_y \quad (1)$$

$$\mu = \theta_u / \theta_y \quad (2)$$

پارامترهای لرزه‌ای دو نمونه آزمایشگاهی محاسبه و در جدول ۲ از مرجع تحملی رودسری و همکاران [30] ارائه شده‌اند. نکته مهم این است که دتایل پیشنهادی در نمونه CSC-I، توانسته است بدون استفاده از ورق پیوستگی یا مضاعف، مفصل پلاستیک را در تیر ایجاد نماید، که مود شکست مطلوب در آیین‌نامه‌هاست.

۳- تحلیل‌های عددی

جهت بررسی دقیق‌تر اتصال صلب تیر I شکل به ستون دایره‌ای و ارائه ضوابط طراحی، از مدل‌های عددی استفاده می‌شود. بنابراین ابتدا نمونه آزمایشگاهی CSC-I، با نرم افزار المان محدود آباکوس مدل‌سازی می‌گردد. سپس با تغییر سایز ستون، تیر و نوع سخت کننده داخل ناودانی، ده‌ها مدل عددی ساخته شده و ارزیابی دقیق‌تر اتصال براساس مدل عددی کالیبره شده انجام خواهد شد.

۳-۱- صحت سنجی مدل عددی

جزئیات مدل عددی در شکل ۲ ملاحظه می‌گردد. این مدل دقیقاً طبق هندسه، شرایط تکیه‌گاهی و بارگذاری نمونه آزمایشگاهی ساخته شد. تیر، ستون، ناودانی و ورق‌ها با المان چهار ضلعی^۶ مدل شدند. این المان در هر گره دارای شش درجه آزادی بوده و توانایی در نظر گرفتن رفتار غیر خطی مصالح و تغییر شکل‌های بزرگ را دارد. در نمونه آزمایشگاهی، دو طرف ستون توسط پلیت و پیچ به تکیه‌گاه نسبتاً صلبی متصل شده بود. از آنجا که به پلیت‌ها و پیچ‌ها آسیبی وارد نشد و هیچ جابجایی در آنها مشاهده نگردید، در مدل عددی از مدل‌سازی آنها صرف‌نظر شد. بنابراین ستون با طول ۲۰۰۰ میلیمتر مدل‌سازی شد و دو انتهای ستون به صورت گیردار مدل گردید.

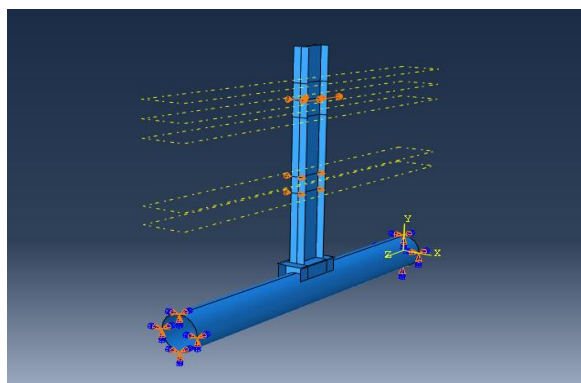
تیر با طول واقعی نمونه آزمایشگاهی مدل شد و بارگذاری چرخه‌ای نیز در محل آکس جک، به تیر اعمال شد (شکل ۲-ب). مش-بندی در کل مدل بصورت چهارضلعی^۷ و با ابعاد ۲ سانتیمتر در نظر گرفته شد (شکل ۲-پ). برای انتخاب ابعاد مش‌بندی، تحلیل حساسیت

⁵ Backbone

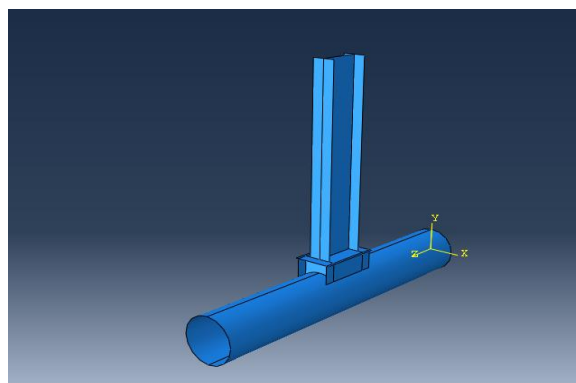
⁶ S4R (Four-node reduced integration shell elements)

⁷ Quad-Dominated-Free-Medial axis

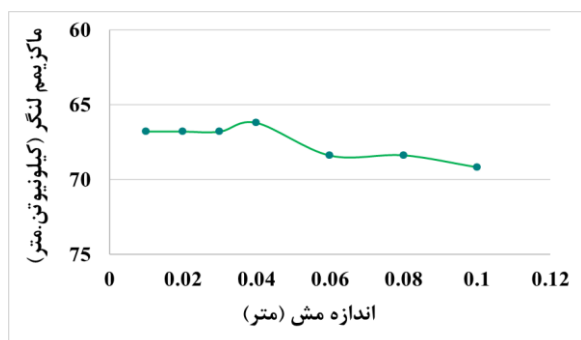
انجام گردید. اندازه مش‌ها ۱، ۲، ۳، ۴، ۶، ۸ و ۱۰ سانتیمتر انتخاب شدند و هر بار لنگر ماکزیمم اتصال در مدل عددی محاسبه شد. همان طور که نتایج نشان می‌دهد (شکل ۲-ت)، با انتخاب سایز مش برابر ۳ سانتیمتر یا کمتر، تغییری در نتیجه مشاهده نمی‌شود. سازه‌ی مهار جانبی در مدل عددی وارد نشد ولی در محل مهارهای جانبی، از حرکت جانبی تیر جلوگیری شد. چون در حین آزمایش در نمونه CSC-I، شکست و ترک قابل توجهی در جوش‌ها مشاهده نگردید، در مدل عددی از مدلسازی جوش نیز صرف نظر شد و قطعات به هم بسته شدند. به منظور در نظر گرفتن رفتار غیر خطی مصالح، از معیار پلاستیک ون میسز و رفتار تنش کرنش بدست آمده از تست‌های کشش در آزمایشگاه استفاده شد (جدول ۱ از مرجع تحملی رودسری و همکاران [30]). برای سخت شونده‌گی مصالح، از مدل ترکیبی^۸ استفاده شد زیرا تطابق بهتری با نتایج آزمایشگاهی در بارگذاری و بار برداری و مدلسازی رفتار چرخه‌ای دارد [34]. تغییر مکان طبق پروتکل پیشنهادی آیین‌نامه فم ۳۵۰ اعمال شد و تحلیل استاتیکی چرخه‌ای، با در نظر گرفتن غیرخطی هندسی انجام شد. نتایج لنگر-دریفت برای مدل عددی و آزمایشگاهی در شکل ۳ مقایسه شده‌اند. شکل ۴ نیز وضعیت نمونه را در انتهای دریفت ۷ درصد در مدل عددی و آزمایشگاهی مقایسه می‌کند. در عین حال که تیر دچار کمانش شده و مفصل پلاستیک در آن تشکیل شده است، در ستون هیچ خسارتی دیده نمی‌شود (شکل ۴-الف). مشاهده می‌شود که مدل عددی، تطابق بسیار خوبی از لحاظ مقادیر لنگر، سختی و تغییر شکل ایجاد شده با نتایج آزمایشگاهی دارد. بنابراین می‌توان به مدل عددی و نتایج بدست آمده از آن اعتماد کرد و به بررسی دقیق‌تر رفتار این نوع اتصال پرداخت.



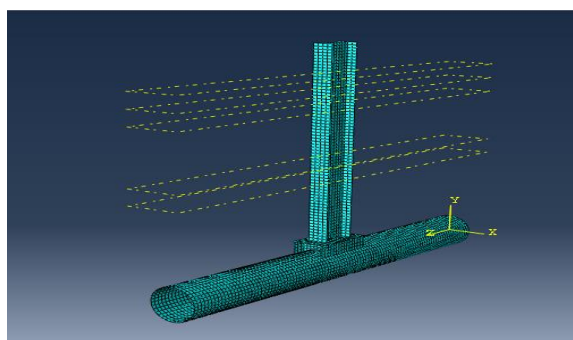
(ب)



(الف)

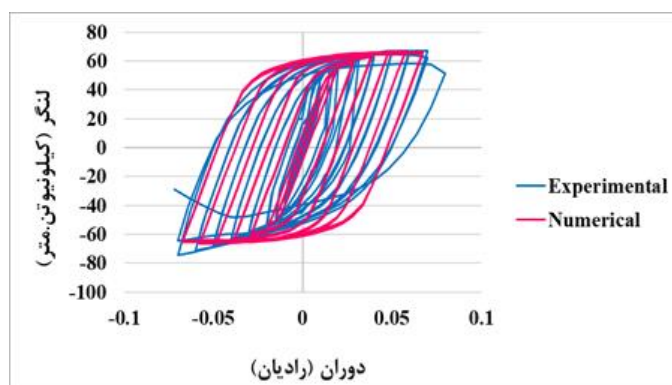


(ت)



(پ)

شکل ۲: مدل عددی برای نمونه S1 الف) شکل کلی نمونه ب) شرایط مرزی و بارگذاری پ) مش بندی ت) تحلیل حساسیت مش بندی



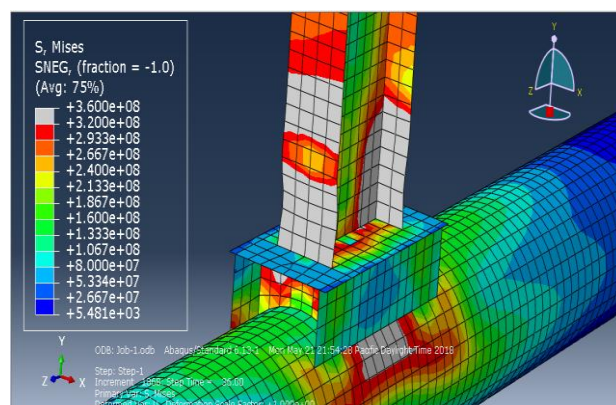
شکل ۳: مقایسه نمودار لنگر-دریفت مدل عددی و آزمایشگاهی در نمونه S1



(ب)



(الف)



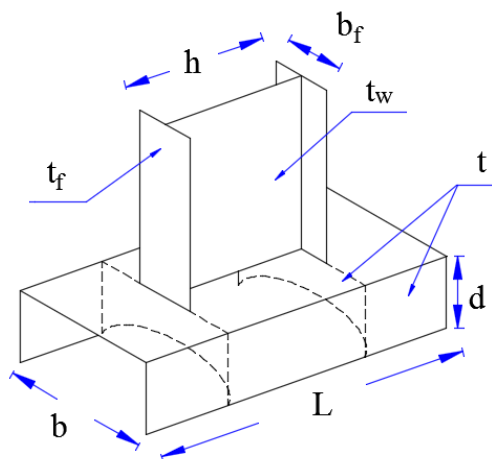
(ب)

شکل ۴- وضعیت نمونه CSC-I در انتهای دریفت ۷ درصد در الف) نمونه آزمایشگاهی اتصال ب) تیر در اتصال پ) مدل عددی

۳-۲- توسعه مدل عددی

برای توسعه مدل عددی از ۵ سایز مختلف تیر از IPE180 تا IPE330 استفاده شد. ابعاد ستون طوری انتخاب شد که نسبت اساس مقطع ستون به تیر، بین ۲ تا ۲/۵ برابر باشد تا خسارتی در ستون ایجاد نشود. در تمام مدل‌های عددی، طول تیر ۷ برابر ارتفاع مقطع تیر انتخاب شد و بار جانبی به انتهای تیر اعمال گردید. در این وضعیت باید ابعاد ناودانی سخت شده را طوری انتخاب نمود که تضمین

کننده تشکیل مفصل پلاستیک در تیر باشد. پارامترهای هندسی اتصال در مدل عددی، در شکل ۵ ارائه شده‌اند. در تمام مدل‌ها عمق ناودانی، b طوری انتخاب شد که نسبت b_f/b ثابت و حدود $0/65$ باشد. عرض بال ناودانی d ، به اندازه عرض بال تیر b_f ، و طول ناودانی، L نیز به اندازه 120 میلی‌متر بزرگتر از عمق تیر، h انتخاب شد. بنابراین هندسه ناودانی سخت شده ثابت و مشخص است و تنها پارامتری که باید تعیین گردد، ضخامت ناودانی و سخت‌کننده‌ها است که یکسان فرض شده اند (t) .



شکل ۵: پارامترهای ناودانی سخت شده در مدل عددی

مقادیر انتخاب شده برای پارامترهای مختلف در تحلیل‌های عددی، در جدول ۱ ارائه شده‌اند. در این جدول، D_c و t_c به ترتیب قطر خارجی و ضخامت ستون، h عمق تیر، t_w ضخامت جان تیر، b_f عرض بال تیر، t_f ضخامت بال تیر، b عمق ناودانی، L طول ناودانی، d عرض بال ناودانی و t ضخامت ناودانی و سخت‌کننده‌ها می‌باشد.

جدول ۱: مقادیر انتخاب شده برای پارامترهای مختلف بر حسب میلی‌متر در مدل‌های M1 الی M5

نمونه	D_c	t_c	Beam Profile IPE	h	t_w	b_f	t_f	b	L	d
M1	۲۱۹/۵۴	۸/۱۸	۱۸۰	۱۸۰	۵/۳	۹۱	۸	۱۴۰	۳۰۰	۹۰
M2	۲۷۳	۱۰	۲۲۰	۲۲۰	۵/۹	۱۱۰	۹/۲	۱۷۰	۳۴۰	۱۱۰
M3	۳۲۳/۹	۱۲/۵	۲۷۰	۲۷۰	۶/۶	۱۳۵	۱۰/۲	۲۱۰	۳۹۰	۱۳۵
M4	۳۵۵/۶	۱۶	۳۰۰	۳۰۰	۷/۱	۱۵۰	۱۰/۷	۲۳۵	۴۲۰	۱۵۰
M5	۴۰۶/۴	۱۶	۳۳۰	۳۳۰	۷/۵	۱۶۰	۱۱/۵	۲۵۰	۴۵۰	۱۶۰

برای هر کدام از مدل‌های M1 الی M5، تحلیل برای ۴ ضخامت مختلف انجام شد. این ضخامت‌ها در جدول ۲ مشاهده می‌شوند. به عنوان مثال برای مدل M1، ضخامت ناودانی و سخت‌کننده برابر ۶، ۸، ۱۰ و ۱۲ میلی‌متر در نظر گرفته شد. در مجموع ۲۰ تحلیل المان محدود غیر خطی در حالت استاتیکی طبق بارگذاری چرخه‌ای انجام گرفت و نمودار لنگر-دوران برای تمام آنها ترسیم شد. اگر ضخامت

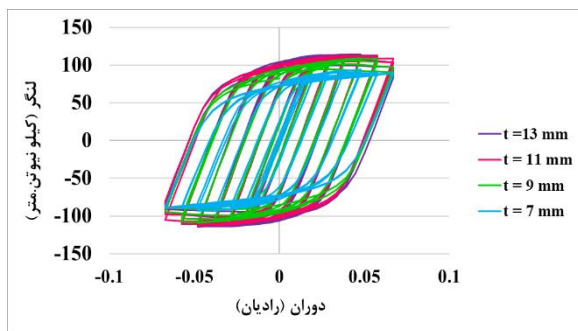
ناودانی و سخت کننده‌ها کم باشند، مقاومت نهایی سیستم کاهش می‌یابد و مفصل پلاستیک در تیر تشکیل نخواهد شد. با افزایش ضخامت ناودانی و سخت کننده‌ها، مقاومت نهایی افزایش می‌یابد و مفصل پلاستیک در تیر تشکیل می‌گردد. افزایش بیشتر ضخامت ناودانی و سخت کننده‌ها، باعث افزایش مقاومت نهایی نخواهد شد، زیرا تشکیل مفصل پلاستیک در تیر، کنترل کننده ظرفیت نهایی سیستم است.

جدول ۲: ضخامت ناودانی و سخت کننده‌ها در مدل‌های عددی M1 الی M5 (mm)

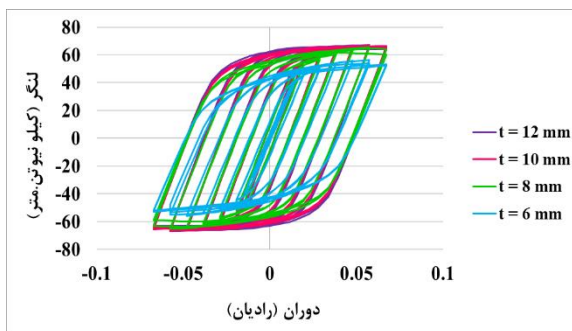
Model	t ₁	t ₂	t ₃	t ₄
M1-۱~۴	۶	۸	۱۰	۱۲
M2-۱~۴	۷	۹	۱۱	۱۳
M3-۱~۴	۸	۱۰	۱۲	۱۴
M4-۱~۴	۸/۵	۱۰/۵	۱۲/۵	۱۴/۵
M5-۱~۴	۹/۵	۱۱/۵	۱۳/۵	۱۵/۵

نتایج در شکل ۶ مشاهده می‌شوند. با افزایش ضخامت در مدل M1 از ۶ تا ۱۰ میلیمتر، مقاومت نهایی افزایش یافت. ولی با افزایش ضخامت از ۱۰ به ۱۲ میلیمتر تغییری در مقاومت نهایی حاصل نشد. بنابراین ضخامت ۱۰ میلیمتر برای ناودانی و سخت کننده‌ها، حداقل مقدار قابل قبول است و برابر همان مقداری است که برای تست‌های آزمایشگاهی فرض شده بود. این ضخامت برای مدل M2 برابر ۱۱ میلیمتر، برای مدل M3 برابر ۱۲ میلیمتر، برای مدل M4 برابر ۱۲/۵ میلیمتر و برای مدل M5 برابر با ۱۳/۵ میلیمتر می‌باشد. نتایج تحلیل‌ها نشان می‌دهد که اگر ضخامت ناودانی و سخت کننده‌ها، ۲ میلیمتر بیشتر از ضخامت بال تیر باشد، کفایت می‌کند. بنابراین برای مقاصد طراحی جهت اطمینان از تشکیل مفصل پلاستیک در تیر، رابطه زیر برای ضخامت ناودانی و سخت کننده‌های آن پیشنهاد می‌گردد:

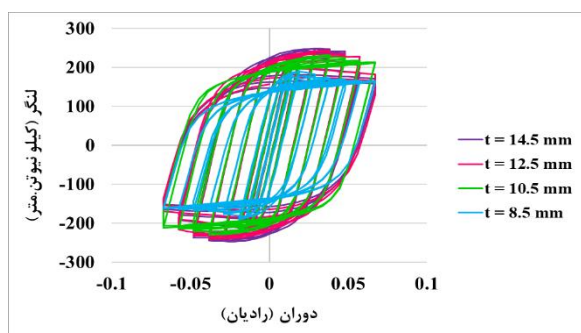
$$t = t_f + 2mm \quad (3)$$



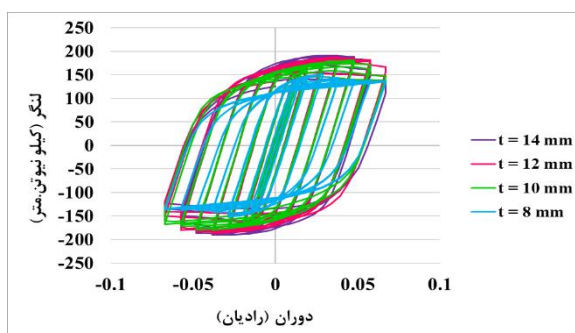
(ب)



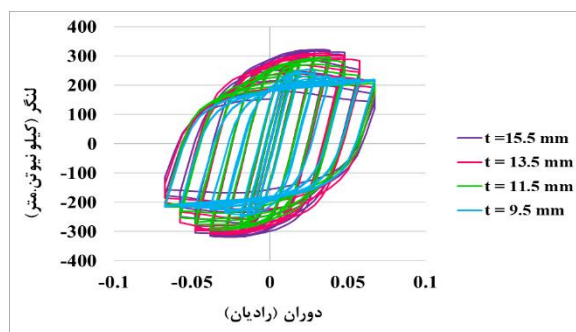
(الف)



(ت)



(پ)

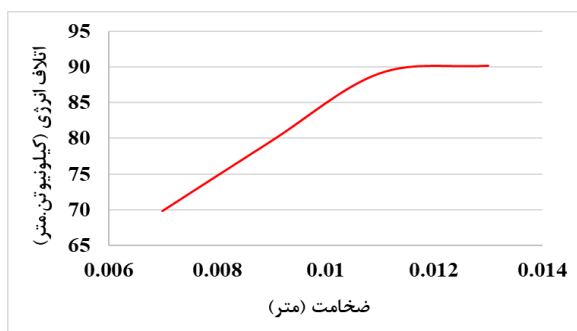


(ث)

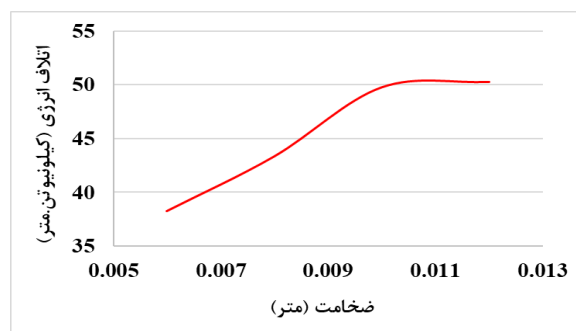
شکل ۶: نمودار هیستریزیس برای مدل‌های (الف) M1 (ب) M2 (پ) M3 (ت) M4 (ث) M5

علاوه بر اینکه از روی نمودار هیستریزیس می‌توان حداقل ضخامت لازم برای سخت‌کننده را بدست آورد، به کمک محاسبه اتلاف انرژی تجمعی و مقاومت نهایی نیز می‌توان، به نحو دقیق‌تری به این نتیجه دست یافت. بنابراین اتلاف انرژی تجمعی و مقاومت نهایی (لنگر ماکزیمم) برای هر مدل عددی بدست آمد. نمودار مربوط به اتلاف انرژی تجمعی و مقاومت نهایی نسبت به ضخامت ناودانی سخت شده ترسیم شد (شکل‌های ۷ و ۸). انتظار این است که ابتدا با افزایش ضخامت ناودانی سخت شده، اتلاف انرژی و مقاومت نهایی افزایش یابند. نهایتاً اگر ضخامت ناودانی سخت شده از مقدار خاصی بیشتر شود، ظرفیت تیر حاکم بر رفتار سیستم می‌شود و افزایش ضخامت ناودانی سخت شده تاثیری بر اتلاف انرژی و مقاومت نهایی نخواهد داشت. اشکال ۷ و ۸ درک بهتری را از رابطه ۳ ارائه میکنند.

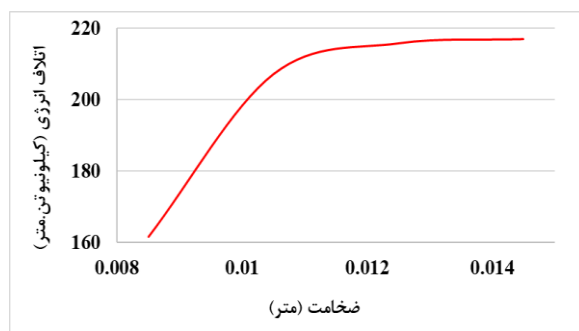
نکته قابل توجه این است که سخت کننده‌ها علاوه بر اینکه به بال و جان ناودانی با جوش گوشه متصل می‌گردند، باید به ستون نیز جوش شوند. اگر بتوان به جای استفاده از سخت کننده هلالی، از سخت کننده مستطیلی استفاده نمود، به نحوی که از ستون فاصله داشته باشد و به آن متصل نگردد، از نقطه نظر اجرایی بسیار ساده تر خواهد بود. این دتایل در بخش بعدی بصورت عددی ارزیابی می‌گردد.



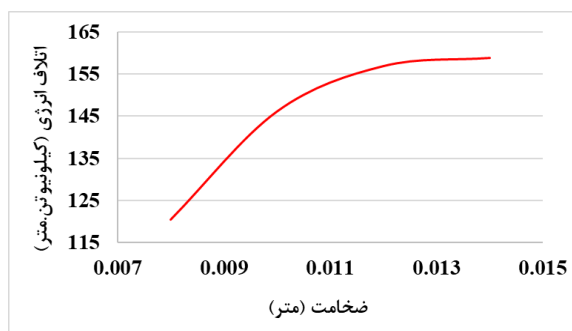
(ب)



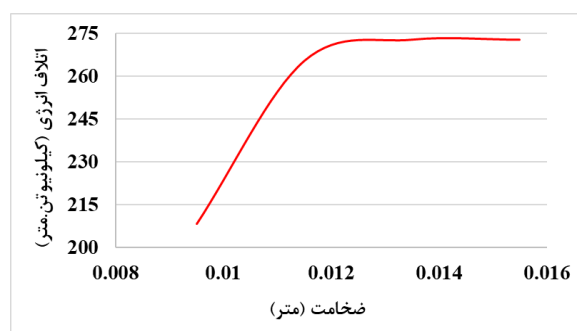
(الف)



(ت)

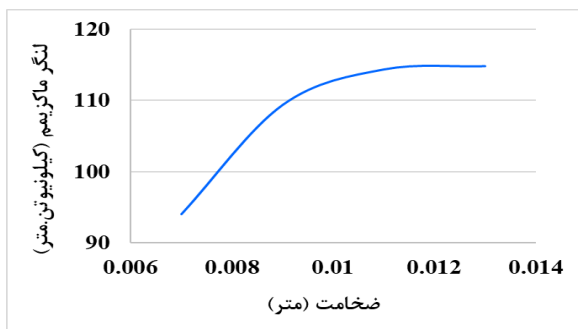


(پ)

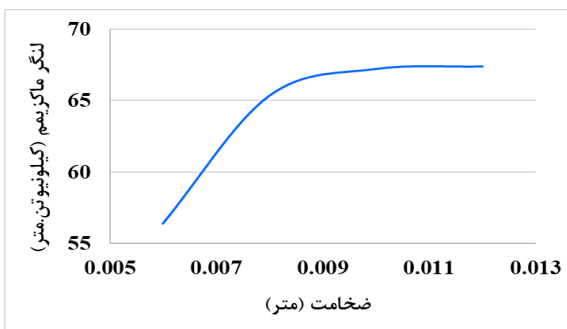


(ث)

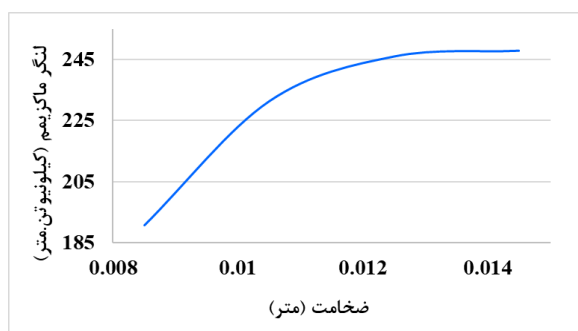
شکل ۷: اتلاف انرژی تجمعی نسبت به ضخامت برای سخت کننده هلالی در مدل‌های (الف) M1 (ب) M2 (پ) M3 (ت) M4 (ث) M5



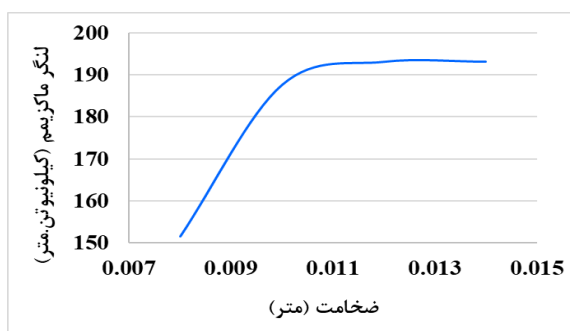
(ب)



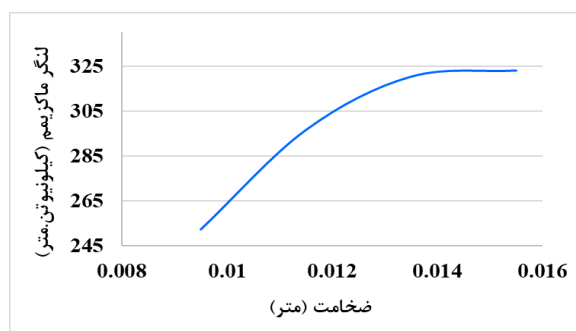
(الف)



(ت)



(پ)

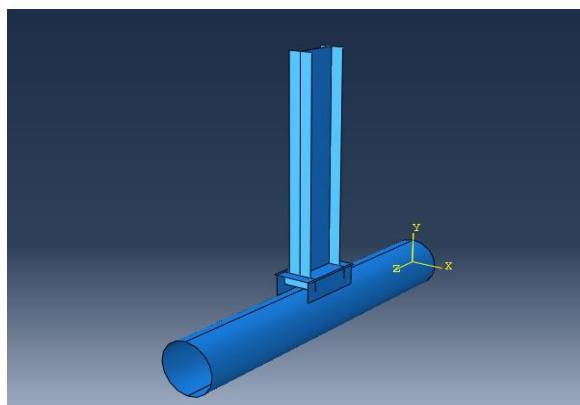


(ث)

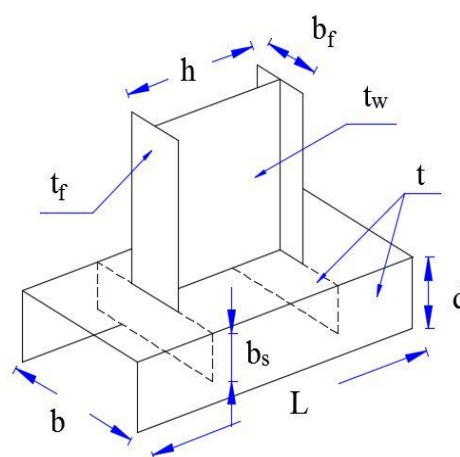
شکل ۸: مقاومت نهایی نسبت به ضخامت برای سخت‌کننده هلالی در مدل‌های (الف) M1 (ب) M2 (پ) M3 (ت) M4 (ث) M5

۳-۳- رابطه ناودانی با سخت‌کننده مستطیلی غیرمتصل به ستون

شکل ۹ پارامترهای رابطه ناودانی با سخت‌کننده مستطیلی و مدل عددی آنرا نشان می‌دهد. مشابه بخش قبل، از ۵ سایز مختلف تیر از IPE180 تا IPE330 استفاده شد. هندسه، ابعاد و مشخصات مدل‌های M6 الی M10 درست مانند مدل‌های M1 الی M5 انتخاب شدند. با این تفاوت که در آنها از سخت‌کننده مستطیلی با ارتفاع b_s و غیر متصل به ستون استفاده شد. ارتفاع سخت‌کننده برابر $0.55 \times$ عرض بال ناودانی (d) انتخاب شد. مشخصات کامل مدل‌های M6 الی M10 در جدول ۳ ارائه شده است.



(ب)



(الف)

شکل ۹: رابط ناودانی با سخت کننده مستطیلی (الف) معرفی پارامترها (ب) مدل عددی

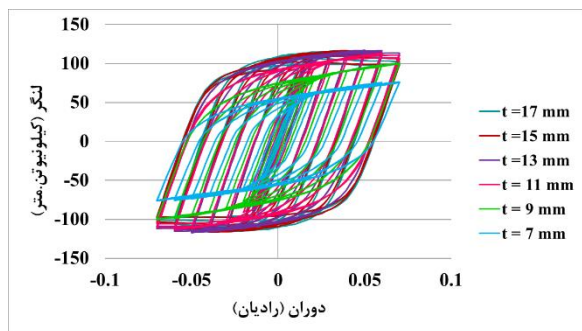
جدول ۳: ابعاد انتخاب شده برای پارامترهای مختلف در مدل عددی رابط ناودانی با سخت کننده مستطیلی

نمونه	D_c	t_c	IPE	h	t_w	b_f	t_f	b	b_s	L	d
M6	۲۱۹/۵۴	۸/۱۸	۱۸۰	۱۸۰	۵/۳	۹۱	۸	۱۴۰	۵۰	۳۰۰	۹۰
M7	۲۷۳	۱۰	۲۲۰	۲۲۰	۵/۹	۱۱۰	۹/۲	۱۷۰	۶۰	۳۴۰	۱۱۰
M8	۳۲۳/۹	۱۲/۵	۲۷۰	۲۷۰	۶/۶	۱۳۵	۱۰/۲	۲۱۰	۷۵	۳۹۰	۱۳۵
M9	۳۵۵/۶	۱۶	۳۰۰	۳۰۰	۷/۱	۱۵۰	۱۰/۷	۲۳۵	۸۵	۴۲۰	۱۵۰
M10	۴۰۶/۴	۱۶	۳۳۰	۳۳۰	۷/۵	۱۶۰	۱۱/۵	۲۵۰	۹۰	۴۵۰	۱۶۰

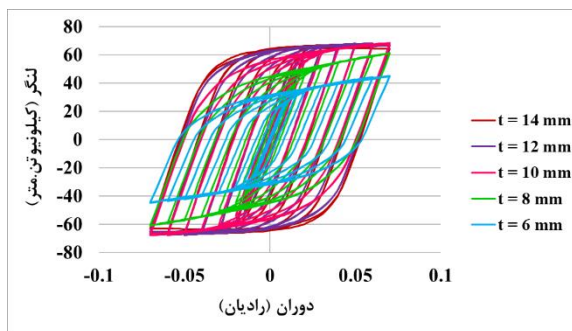
برای هر کدام از مدل‌های M6 الی M10، تحلیل برای ضخامت‌های مختلف انجام شد. این ضخامت‌ها در جدول ۴ مشاهده می‌شوند. در مجموع ۲۹ تحلیل المان محدود غیر خطی انجام و نمودار لنگر-دوران برای تمام آنها ترسیم شد (شکل ۱۰).

جدول ۴: ضخامت ناودانی و سخت کننده مستطیلی در مدل‌های عددی M6 الی M10 (mm)

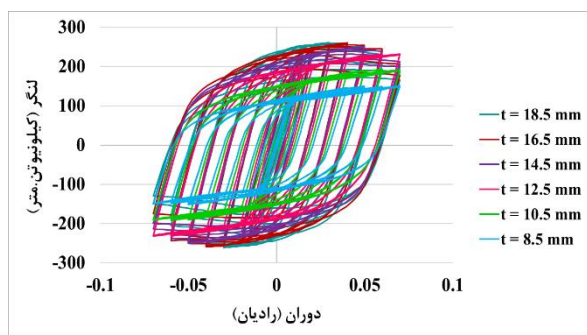
نمونه	t_1	t_2	t_3	t_4	t_5	t_6
M6-۱~۵	۶	۸	۱۰	۱۲	۱۴	-
M7-۱~۶	۷	۹	۱۱	۱۳	۱۵	۱۷
M8-۱~۶	۸	۱۰	۱۲	۱۴	۱۶	۱۸
M9-۱~۶	۸/۵	۱۰/۵	۱۲/۵	۱۴/۵	۱۶/۵	۱۸/۵
M10-۱~۶	۹/۵	۱۱/۵	۱۳/۵	۱۵/۵	۱۷/۵	۱۹/۵



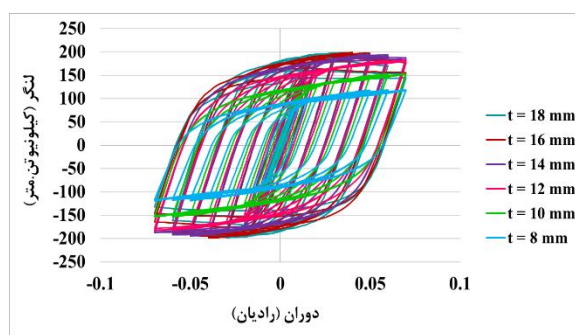
(ب)



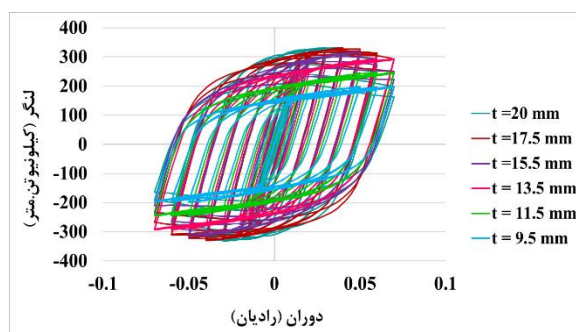
(الف)



(ت)



(پ)



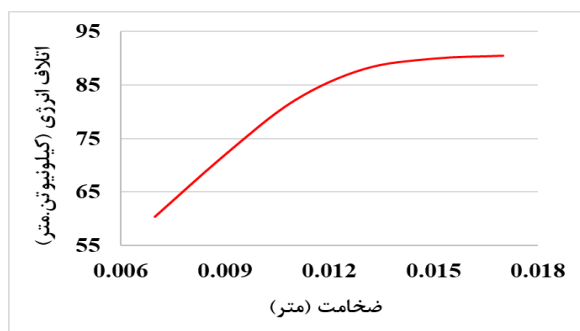
(ث)

شکل ۱۰: نمودار هیستریزیس برای مدل‌های (الف) M6 (ب) M7 (پ) M8 (ت) M9 (ث) M10

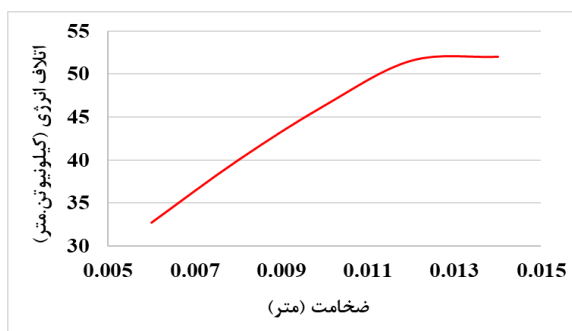
بر اساس شکل ۱۰، ضخامت مناسب برای مدل M6 برابر ۱۲ میلی‌متر، برای مدل M7 برابر ۱۵ میلی‌متر، برای مدل M8 برابر ۱۶ میلی‌متر، برای مدل M9 برابر با ۱۶/۵ میلی‌متر و برای مدل M10 برابر ۱۷/۵ میلی‌متر می‌باشد. بنابراین اگر ضخامت ناودانی و سخت‌کننده‌های مستطیلی، ۶ میلی‌متر بیشتر از ضخامت بال تیر باشند، کفایت می‌کند. برای مقاصد طراحی و جهت اطمینان از تشکیل مفصل پلاستیک در تیر، رابطه زیر برای ضخامت ناودانی و سخت‌کننده‌های مستطیلی غیرمتصل به ستون پیشنهاد می‌گردد:

$$t = t_f + 6 \text{ mm} \quad (۴)$$

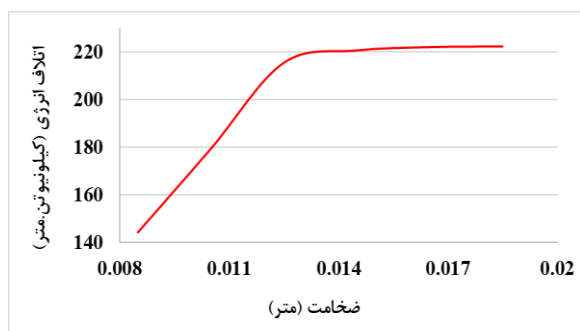
در این راستا به کمک محاسبه اتلاف انرژی تجمعی و مقاومت نهایی نیز می‌توان به حداقل ضخامت لازم برای سخت‌کننده دست یافت. همانطور که اشکال ۱۱ و ۱۲ به خوبی نشان می‌دهند با افزایش ضخامت ناودانی سخت شده، مقدار اتلاف انرژی و مقاومت نهایی ابتدا افزایش می‌یابند. ولی نهایتاً این پارامترها ثابت مانده و حداقل ضخامت لازم برای سخت‌کننده بدست می‌آید.



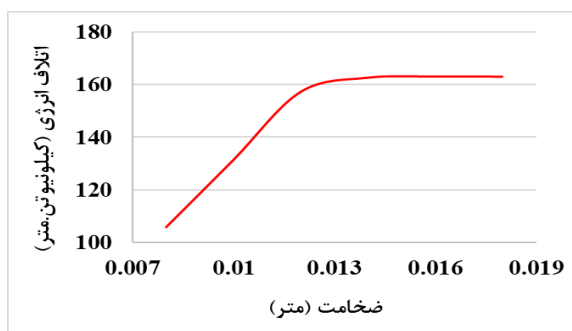
(ب)



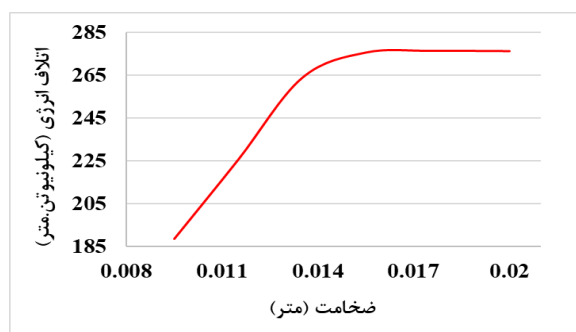
(الف)



(ت)

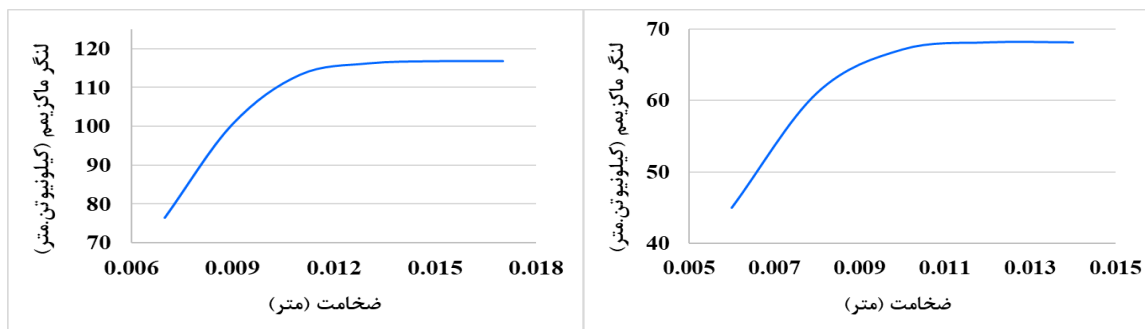


(پ)



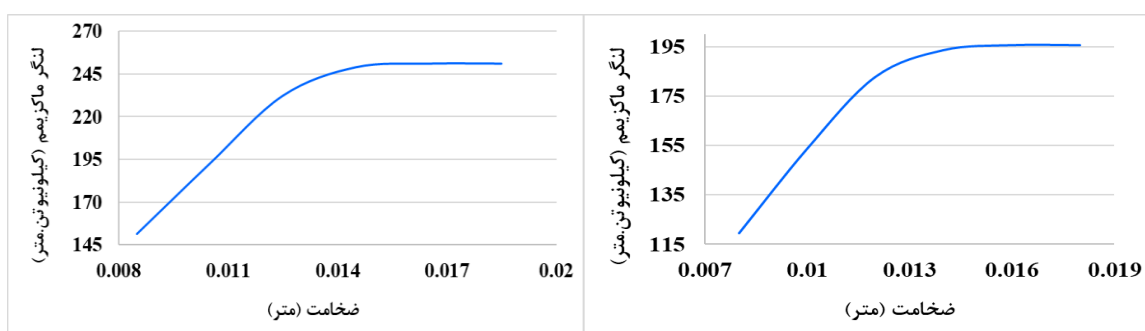
(ث)

شکل ۱۱: اتلاف انرژی تجمعی نسبت به ضخامت برای سخت‌کننده مستطیلی در مدل‌های (الف) M6 (ب) M7 (پ) M8 (ت) M9 (ث) M10



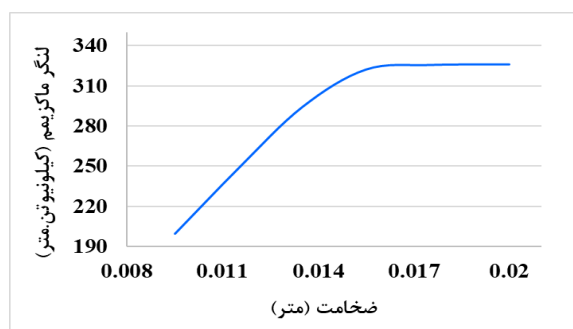
(ب)

(الف)



(ت)

(پ)



(ث)

شکل ۱۲: مقاومت نهایی نسبت به ضخامت برای سخت کننده مستطیلی در مدل های (الف) M6 (ب) M7 (پ) M8 (ت) M9 (ث) M10

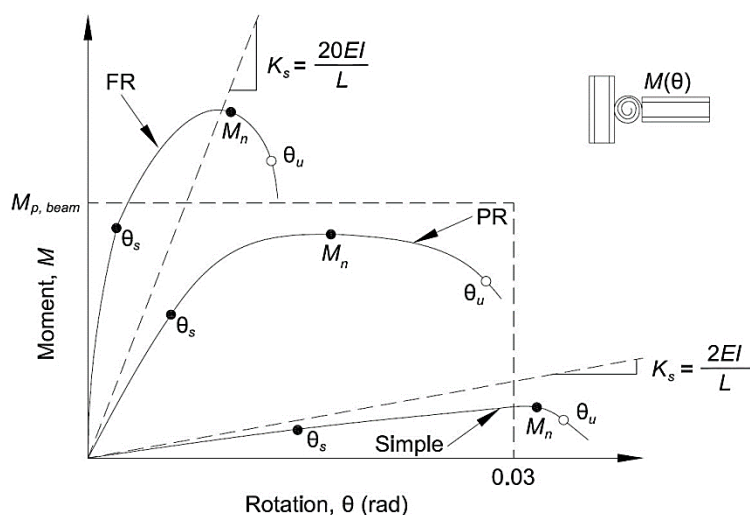
بنابراین به جای استفاده از سخت کننده هلالی در ستون، می توان از سخت کننده مستطیلی غیر متصل به ستون، با ضخامت بالاتر استفاده نمود که از نظر اجرایی بسیار ساده تر است. در هر دو نوع سخت کننده مفصل پلاستیک در تیر تشکیل و مود شکست مورد نظر آیین نامه ایجاد می گردد. البته در آیین نامه ها برای اتصال صلب، ضوابط دیگری نیز باید برقرار باشد که در بخش بعد مورد بررسی قرار می گیرند.

۴- بررسی ضوابط آیین نامه AISC برای اتصال صلب

اتصالات تیر به ستون طبق ضوابط آیین نامه AISC به سه دسته صلب، نیمه صلب و ساده تقسیم می‌شوند. برای دسته بندی اتصال، نمودار لنگر-دریفت آن ترسیم شده، سپس سختی سکانتی در لنگر سرویس بدست می‌آید [35]. براساس شکل ۱۳ می‌توان نوشت:

$$K_s = M_s / \theta_s \quad (۵)$$

که M_s و θ_s به ترتیب لنگر و دوران المان‌های اتصال در بار سرویس هستند. اگر E, L و I به ترتیب طول، مدول الاستیسیته و ممان اینرسی تیر باشند، کلاسیکندی اتصال با مقایسه K_s و EI/L انجام می‌شود. اگر $K_s < 2EI/L$ باشد، اتصال ساده تلقی شده و فرض می‌شود قادر به انتقال لنگر نیست. اگر $K_s \geq 20EI/L$ باشد، اتصال در گروه صلب قرار می‌گیرد و در غیر اینصورت نیمه صلب است. ظرفیت دورانی اتصال صلب در قاب خمشی ویژه باید در حدی باشد که بتواند دریفت برابر 0.04 رادیان را تحمل کند. ضمناً لنگر منتقل شده به ستون در این دریفت، باید حداقل برابر 0.8 لنگر پلاستیک تیر باشد [36]. تمام اتصالات ارائه شده در این مقاله، یعنی مدل‌های M1 الی M10، این دو ضابطه اخیر را برآورده می‌کنند. تنها موردی که باید برای آنها کنترل گردد، نسبت K_s به EI/L تیر است.



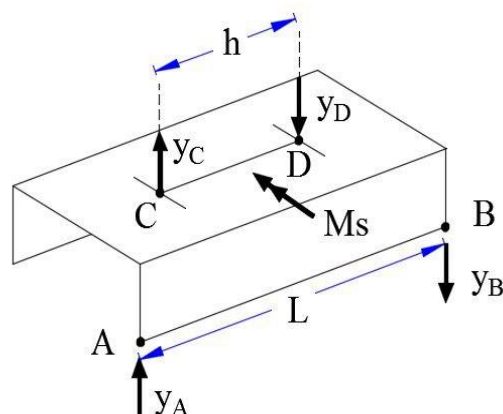
شکل ۱۳: کلاسیکندی اتصال برای اتصال صلب و نیمه صلب و ساده [30]

جهت کنترل نسبت $K_s L/EI$ از همان مدل‌های عددی M1 الی M10 استفاده شد، با این تفاوت که بارگذاری بصورت بار افزون بر انتهای تیر اعمال شد. مقدار لنگر در بار سرویس برابر $0.6 My$ فرض شد و مقدار K_s بر اساس روابط (۶)، (۷)، (۸)، شکل ۱۴ و معادله (۵) بدست آمد:

$$\theta_1 = \left| \frac{y_A + y_B}{L} \right| \quad (۶)$$

$$\theta_2 = \left| \frac{y_C + y_D}{h} \right| \quad (۷)$$

$$\theta_s = |\theta_1 - \theta_2| \quad (۸)$$



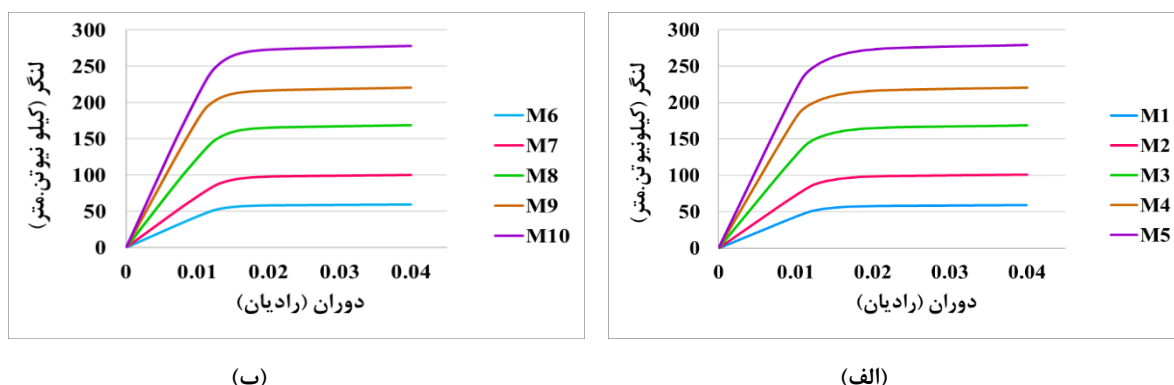
شکل ۱۴: معرفی پارامترهای مختلف برای محاسبه θ_s و K_s

قابل ذکر است که y_D و y_C ، y_B ، y_A تغییر مکان ایجاد شده در نقاط A، B، C و D در جهت محور y در لحظه اعمال لنگر سرویس هستند. تحلیل‌ها براساس ضخامت پیشنهاد شده برای هر مدل، طبق روابط ۳ و ۴ انجام شدند. ولی با آن ضخامت‌ها مقدار $K_s L/EI$ برای تمام مدل‌ها بین ۲ و ۲۰ قرار می‌گرفت. بنابراین اگر از روابط ۳ و ۴ استفاده گردد، گرچه مفصل پلاستیک در تیر تشکیل می‌شود، ولی اتصال در گروه نیمه صلب قرار می‌گیرد.

بر اساس سعی و خطا برای تمام مدل‌های M1 الی M10 ضخامت ناودانی و سخت‌کننده‌ها طوری تعیین شدند که نسبت $K_s L/EI \geq 20$ شود. نتایج در جدول ۵ ارائه شده‌اند. شکل ۱۵ نیز نمودار پوش را برای مدل M1 الی M10 نشان می‌دهد.

جدول ۵- حداقل ضخامت بدست آمده برای ناودانی و سخت‌کننده‌ها در مدل‌های M1 الی M10 جهت صلب شدن اتصال

نمونه	t (mm)	M_s (kN.m)	y_A mm	y_B mm	y_C mm	y_D mm	θ_1	θ_2	θ_s	K_s (kN.m)	EI/L (kN.m)	$K_s L/EI$
M1	۱۷	۲۹/۶	-۰/۲۸	۰/۲۸	-۰/۲۳	-۰/۲۳	۰/۰۰۱۹	۰/۰۰۲۷	۰/۰۰۰۸	۳۷۰۰۱	۱۸۳۶	۲۰/۲
M2	۱۸	۴۹/۶	-۰/۳۴	۰/۳۴	-۰/۲۹	-۰/۳۰	۰/۰۰۲۰	۰/۰۰۲۸	۰/۰۰۰۸	۶۴۵۵۴	۳۱۴۲	۲۰/۵
M3	۲۰	۸۷/۵	-۰/۳۵	۰/۳۵	-۰/۳۳	-۰/۳۴	۰/۰۰۱۸	۰/۰۰۲۶	۰/۰۰۰۸	۱۰۷۴۳۰	۵۳۵۷	۲۰/۱
M4	۲۱	۱۰۱/۶	-۰/۲۴	۰/۲۴	-۰/۲۷	-۰/۲۷	۰/۰۰۱۲	۰/۰۰۱۹	۰/۰۰۰۷	۱۴۱۱۱۱	۶۹۶۶	۲۰/۳
M5	۲۲	۱۲۳/۱	-۰/۳۱	۰/۳۰	-۰/۳۲	-۰/۳۳	۰/۰۰۱۴	۰/۰۰۲۰	۰/۰۰۰۷	۱۸۱۵۵۰	۸۹۱۲	۲۰/۴
M6	۲۳	۲۹/۳	-۰/۳۰	۰/۲۹	-۰/۲۳	-۰/۲۴	۰/۰۰۲۰	۰/۰۰۲۷	۰/۰۰۰۸	۳۸۶۸۱	۱۸۳۶	۲۱/۱
M7	۲۵	۵۱/۷	-۰/۳۸	۰/۳۷	-۰/۳۲	-۰/۳۲	۰/۰۰۲۲	۰/۰۰۳۰	۰/۰۰۰۸	۶۳۸۰۷	۳۱۴۲	۲۰/۳
M8	۳۰	۸۵/۸	-۰/۳۸	۰/۳۷	-۰/۳۵	-۰/۳۵	۰/۰۰۱۹	۰/۰۰۲۷	۰/۰۰۰۸	۱۱۰۲۶۷	۵۳۵۷	۲۰/۶
M9	۳۳	۱۰۰/۳	-۰/۲۶	۰/۲۶	-۰/۲۸	-۰/۲۸	۰/۰۰۱۲	۰/۰۰۱۹	۰/۰۰۰۷	۱۴۵۹۶۴	۶۹۶۶	۲۱/۰
M10	۳۵	۱۲۸/۹	-۰/۳۶	۰/۳۵	-۰/۳۶	-۰/۳۷	۰/۰۰۱۶	۰/۰۰۲۳	۰/۰۰۰۷	۱۸۵۴۴۵	۸۹۱۲	۲۰/۸



شکل ۱۵: نمودار پوش برای مدل‌های (الف) M1 الی M5 (ب) M6 الی M10

جدول ۵ حداقل ضخامت ناودانی و سخت‌کننده‌ها را به نحوی ارائه می‌کند که اتصال در گروه صلب قرار گیرد. بر این اساس حداقل ضخامت مورد نیاز برای ناودانی و سخت‌کننده‌ها در مدل‌های M1 الی M5 برابر است با:

$$t = 2t_f \quad (9)$$

حداقل ضخامت ناودانی و سخت‌کننده‌ها برای مدل‌های M6 الی M10 نیز بصورت زیر پیشنهاد می‌گردد:

$$t = 3t_f \quad (10)$$

بنابراین برای اتصال ناودانی سخت شده با سخت‌کننده هلالی متصل به ستون، اگر $t > t_f + 2 \text{ mm}$ باشد، تشکیل مفصل پلاستیک در تیر قطعی است. اگر $t_f + 2 \text{ mm} < t < 2t_f$ باشد، اتصال نیمه صلب و اگر $t > 2t_f$ باشد، اتصال صلب است. برای اتصال ناودانی سخت شده با سخت‌کننده مستطیلی غیر متصل به ستون نیز، اگر $t_f + 6 \text{ mm} < t < 3t_f$ باشد، مفصل پلاستیک در تیر تشکیل می‌گردد. اگر $t_f + 6 \text{ mm} < t < 3t_f$ باشد، اتصال نیمه صلب و اگر $t > 3t_f$ باشد، اتصال صلب است.

نکته قابل توجه این است که در ارزیابی‌های عددی انجام شده در این تحقیق از تیر با مقطع IPE استفاده شده است. بنابراین نمی‌توان ضوابط ضخامتی ارائه شده برای ناودانی و سخت‌کننده‌ها برای انواع دیگر تیر تعمیم داد. برای توسعه نتایج انجام تحقیقات بیشتر لازم خواهد بود.

۵- نتیجه گیری

در اتصالات صلب تیر I شکل به ستون دایره‌ای، به علت شکل هندسی خاص، امکان نصب ورق‌های پیوستگی و ورق مضاعف وجود ندارد. دتایل جدیدی برای اتصال صلب و نیمه صلب تیر I شکل به ستون دایره‌ای، با استفاده از ناودانی سخت‌شده توسط تحملی رودسری و همکاران در سال ۲۰۱۹ ارائه شد. در این راستا ۶ نمونه آزمایشگاهی مقیاس کامل شامل اتصال مستقیم تیر I شکل به ستون دایره‌ای، و اتصال با رابط ناودانی سخت نشده/شده تحت اثر بارگذاری چرخه‌ای تست شدند.

در این مقاله با صحت سنجی کار آزمایشگاهی، سعی شد تحلیل‌های عددی جامعی انجام شود. هدف از انجام این تحلیل‌ها تعیین ضخامت لازم برای ناودانی سخت شده بود، به نحوی که مفصل پلاستیک در تیر تشکیل گردد و اتصال نیز دارای سختی لازم برای قرارگیری در گروه اتصالات صلب باشد. نهایتاً نوع دیگری از سخت‌کننده غیرمتصل به ستون نیز مورد ارزیابی قرار گرفت که از نظر اجرایی ساده‌تر است. نتایج زیر بدست آمد:

- ۱- استفاده از ناودانی سخت شده ضمن ارائه عملکرد مناسب، تمام ضوابط لازم آیین نامه را برآورده نمود.
- ۲- نتایج بیش از ۶۰ تحلیل المان محدود غیرخطی نشان داد که انتخاب مناسب ضخامت ناودانی و سخت کننده هلالی متصل به ستون، در دتایل پیشنهادی می تواند باعث تشکیل مفصل پلاستیک در تیر گردد. اگر ضخامت ناودانی و سخت کننده در محدوده t_f باشد، اتصال نیمه صلب است و اگر در محدوده $t > 2t_f$ انتخاب گردد، اتصال صلب خواهد بود، که t_f ضخامت بال تیر است.
- ۳- عملکرد ناودانی سخت شده با سخت کننده مستطیلی غیر متصل به ستون نشان داد گرچه ضخامت مورد نیاز در این نوع از سخت کننده، نسبت به سخت کننده هلالی متصل به ستون بیشتر است ولی اجرای آن ساده تر می باشد.
- ۴- ترسیم نمودارهای اتلاف انرژی و مقاومت نهایی نشان داد که می توان براساس آنها حداقل ضخامت لازم برای سخت کننده را جهت اطمینان از تشکیل مفصل پلاستیک در تیر تعیین نمود. هرچند که تشکیل مفصل پلاستیک در تیر، تضمینی بر صلبیت اتصال نیست. نتایج نشان داد که به ضخامت بیشتری برای ناودانی سخت شده نیاز است تا عملکرد اتصال صلب باشد.

اتصال صلب تیر I شکل به ستون لوله ای با ناودانی سخت شده از هر نظر رفتار قابل قبولی دارد. این دتایل علاوه بر سادگی اجراء، تمام ضوابط مورد نیاز آیین نامه ها را جهت استفاده در قاب خمشی فولادی ویژه برآورده می سازد. بنابراین استفاده از آن در قاب های خمشی ویژه در نواحی لرزه خیز توصیه می گردد. البته باید خاطر نشان کرد که روابط ارائه شده در تحقیق اخیر، بر اساس تحیل های انجام شده برای تیرهای IPE180 تا IPE330 است. بنابراین نتایج بدست آمده نیز فقط برای IPE180 تا IPE330 برقرار بوده و برای پروفیل های خارج از این بازه و مقاطع دیگر غیر از IPE، باید تحقیقات بیشتری انجام شود.

مراجع

- [1] ANSI/AISC 358-16 (2016). American Institute of Steel Construction. "Prequalified connections for special and intermediate steel moment frames for seismic applications". Chicago, Illinois.
- [2] TahamouliRoudsari, M., H. Jamshidi K, and M. Mohebi Zangeneh. (2016). "Experimental and Numerical Investigation of IPE Reduced Beam Sections with Diagonal Web Stiffeners". *Journal of Earthquake Engineering*, 22 (4): 533-552.
- [3] Garoosi, A. M., TahamouliRoudsari, M., & Hashemi, B. H. (2018). "Experimental evaluation of rigid connection with reduced section and replaceable fuse". *Structures*, 16: 390-404.
- [4] Elremaily, A., and Atorod Azizinamini. (2001). "Design provisions for connections between steel beams and concrete filled tube columns". *Journal of Constructional Steel Research*, 57(9): 971-995.
- [5] Elremaily, Ahmed, and Atorod Azizinamini. (2001). "Experimental behavior of steel beam to CFT column connections". *Journal of Constructional Steel Research*, 57(10): 1099-1119.
- [6] Cheng, Chin-Tung, and Lap-Loi Chung. (2003). "Seismic performance of steel beams to concrete-filled steel tubular column connections". *Journal of constructional steel research*, 59(3): 405-426.
- [7] Sheet, Ikhlas S., Umarani Gunasekaran, and Gregory A. MacRae. (2013). "Experimental investigation of CFT column to steel beam connections under cyclic loading". *Journal of Constructional Steel Research*, 86: 167-182.
- [8] Cheng, Chin-Tung, Chen-Fu Chan, and Lap-Loi Chung. (2007). "Seismic behavior of steel beams and CFT column moment-resisting connections with floor slabs". *Journal of Constructional Steel Research*, 63(11): 1479-1493.
- [9] Shin, Kyung-Jae, Young-Ju Kim, and Young-Suk Oh. (2008). "Seismic behaviour of composite concrete-filled tube column-to-beam moment connections". *Journal of Constructional Steel Research*, 64(1): 118-127.
- [10] Debnath, P. P., & Chan, T. M. (2022). "Experimental performance of single blind-bolted CFST column connection under predominant shear loading". *Journal of Constructional Steel Research*, 196, 107386.

- [11] Jeddi, M. Z., Sulong, N. R., & Ghanbari-Ghazijahani, T. (2022). "Behaviour of double-sleeve TubeBolt moment connections in CFT columns under cyclic loading". *Journal of Constructional Steel Research*, 194, 107302.
- [12] Shin, Kyung-Jae, et al. (2004). "Behavior of welded CFT column to H-beam connections with external stiffeners". *Engineering Structures*, 26(13): 1877-1887.
- [13] Jeddi, Mahdi Zeinizadeh, NH Ramli Sulong, and MM Arabnejad Khanouki. (2016). "Seismic performance of a new through rib stiffener beam connection to concrete-filled steel tubular columns: An experimental study". *Engineering Structures*.
- [14] Kang, Chang-Hoon, et al. (2001). "Hysteresis behavior of CFT column to H-beam connections with external T-stiffeners and penetrated elements". *Engineering Structures*, 23(9): 1194-1201.
- [15] Qin, Ying, Zhihua Chen, and Xiaodun Wang. (2014). "Experimental investigation of new internal-diaphragm connections to CFT columns under cyclic loading". *Journal of Constructional Steel Research*, 98: 35-44.
- [16] Ramadan, Hazem M., et al. (2016). "Finite element analysis of circular concrete filled tube connections". *Journal of Constructional Steel Research* 120: 33-44.
- [17] Fanaie, Nader, and Hossein Sadeghi Moghadam. (2019). "Experimental study of rigid connection of drilled beam to CFT column with external stiffeners". *Journal of Constructional Steel Research* 153: 209-221.
- [18] Mirghaderi, Seyed Rasoul, Shahabeddin Torabian, and Farhad Keshavarzi. (2010). "I-beam to box-column connection by a vertical plate passing through the column". *Engineering Structures*, 32(8): 2034-2048.
- [19] Deylami, A., and A. R. Toloukian. (2011). "Effect of Geometry of Vertical Rib Plate on Cyclic Behavior of Steel Beam to Built-up Box Column Moment Connection". *Procedia Engineering*, 14: 3010-3018.
- [20] Gholami, M., A. Deylami, and M. Tehranizadeh. (2013). "Seismic performance of flange plate connections between steel beams and box columns". *Journal of Constructional Steel Research*, 84: 36-48.
- [21] Nia, Z. Saneei, A. Mazroi, and M. Ghassemieh. (2014). "Cyclic performance of flange-plate connection to box column with finger shaped plate". *Journal of Constructional Steel Research*, 101: 207-223.
- [22] Erfani, Saeed, Ahmad Ali Asnafi, and Alireza Goudarzi. (2016). "Connection of I-beam to box-column by a short stub beam". *Journal of Constructional Steel Research*, 127: 136-150.
- [23] Rezaeian, Alireza, Majid Jamal-Omidi, and Farhood Shahidi. (2014). "Seismic behavior of ConXL rigid connection in box-columns not filled with concrete". *Journal of Constructional Steel Research*, 97: 79-104.
- [24] Yang, Chao, et al. (2016). "Numerical study on seismic behaviours of ConXL biaxial moment connection". *Journal of Constructional Steel Research*, 121: 185-201.
- [25] Sabbagh, Alireza Bagheri, Tak Ming Chan, and James Toby Mottram. (2013). "Detailing of I-beam-to-CHS column joints with external diaphragm plates for seismic actions". *Journal of Constructional Steel Research*, 88: 21-33.
- [26] Hosseini, Seiyed Mahmoud, and Rohola Rahnavard. (2020). "Numerical study of steel rigid collar connection affecting cyclic loading". *Engineering Structures* 208: 110314.
- [27] Jian, W., & Guang, T. W. (2022). "Experimental Seismic Behavior of RHS Column-to-I Beam Connection with Additional Plates". *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 46(3), 2053-2065.
- [28] iu, H., Lan, J., Chen, Z., Zhao, Y., & Jia, L. (2022). "Study on the seismic behavior of connection via welding strengthening under load". *Journal of Constructional Steel Research*, 196, 107387.
- [29] Sun, D., Yang, Y., Ma, Y., Xue, Y., Yu, Y., & Feng, S. (2022). "Seismic performance of resilient beam-column connection using replaceable stiffener angle steel". *Journal of Constructional Steel Research*, 196, 107370.
- [30] TahamouliRoudsari, Mehrzad, Sohaei, Shohreh, Torkaman, Morteza, Alizadeh, AliAshraf, Safae, Seyedamir, Haghaninia, Alishah and Meysam MohammadiMajd. (2019). "Experimental Investigation of I-Shaped Beam to Circular Column Rigid Connection with Stiffened and Non-Stiffened Channel Link". *Journal of Earthquake Engineering*, 1-23.
- [31] Tahamouli Roudsari, Mehrzad, Sohaei, Shohreh, Torkaman, Morteza, Safae, Seyed Ali, Tahmasebi, salar, Mohammadi, Saleh and Mohammad Meddi Ghiasvand. (2020). "Presenting a New Detail for the Rigid Connection between I-Shaped Beam and Concrete-Filled Steel Tube Column with Stiffened Channel Link". *International Journal of Steel Structures*, 20, 655-667.
- [32] FEMA. (2000). "Recommended Seismic Design Provisions for New Moment Frame Buildings Report". FEMA 350, Federal Emergency Management Agency, Washington DC.
- [33] FEMA. (2005). "Improvement of nonlinear static seismic analysis procedures". FEMA- 440, Federal Emergency Management Agency, Redwood City.
- [34] Shi G, Wang M, Bai Y, Wang F, Shi YJ, Wang YQ. (2012). "Experimental and modeling study of high-strength structural steel under cyclic loading". *Engineering Structures*, 37:1-13.

- [35] ANSI/AISC 360-16 (2016). American Institute of Steel Construction. "*Specification for Structural Steel Buildings*". Chicago, Illinois.
- [36] ANSI/AISC 341-16 (2016). American Institute of Steel Construction. "*Seismic Provisions for Structural Steel Buildings*". Chicago, Illinois.