

Research Article

Numerical Seismic Performance Assessment of a Replaceable-Fuse Beam Splice in a Steel Column-Tree Moment-Frame Connection

Seyed Ali Razavi Tabatabaei^{1*}, Amir Reza Karami², Sima Aramesh³

1- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, University of Science and Culture, Tehran, Iran

2- Master of Graduate, Department of Civil Engineering, University of Science and Culture, Tehran, Iran

3- Department of Civil Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran



Citation: Razavi Tabatabaei, S.A., Karami, A.R., and Aramesh, S. (2026), "Numerical Seismic Performance Assessment of a Replaceable-Fuse Beam Splice in a Steel Column-Tree Moment-Frame Connection", *Journal of Steel & Structures*, 20(53), pp.122-143. (In Persian)

doi <https://doi.org/10.22034/jss.2026.601348.1060>

Article info:

Article History:

Received: 31 March 2026

Revised: 10 August 2026

Accepted: 17 August 2026

Published: 23 September 2026

Keywords:

Steel Moment-Resisting Frame
Column-Tree
Beam-to-Column Connection
Nonlinear Analysis
Replaceable Shear Fuse

ABSTRACT

Background: Beam-to-column connections are key components in steel structures, essential for load transfer and seismic performance of moment-resisting frames. Given the limited repairability and costly post-earthquake rehabilitation of conventional steel moment frames, connections incorporating replaceable components have attracted attention as an innovative approach to limiting damage and facilitating rapid return to service. This study aims to investigate the seismic behavior of a column-tree connection equipped with a replaceable shear fuse located in the beam web region.

Methods: The system was numerically analyzed in ABAQUS using nonlinear finite element modeling. The numerical model was first validated against the results of previous studies. Subsequently, the effects of geometric parameters, including the beam and column dimensions, fuse thickness, and stub beam length, on the hysteretic response, stiffness, load-carrying capacity, and cumulative dissipated energy were investigated. In addition, the weight of the proposed fuses was compared with the total weight of the flange and web splice plates assumed for a conventional beam splice.

Results: The results showed that inelastic deformations were primarily concentrated in the fuse member, while damage to the main connection components remained limited. Increasing the fuse thickness from 15 to 20 mm increased the cumulative dissipated energy by approximately 20%. Among the parameters investigated, increasing the thickness of the main connection components and the fuse had a greater effect on the load-carrying capacity, energy dissipation, and cyclic stability of the connection, whereas the effect of varying the stub beam length within the investigated range was less pronounced. Furthermore, for fuse thicknesses of 15 and 20 mm, the total weight of the two fuses was 76% and 68% lower, respectively, than the combined weight of the four flange and web splice plates assumed for a conventional beam splice.

Conclusion: Overall, by localizing damage within the fuse member, largely preserving the integrity of the main structural members, and significantly reducing the weight of the splice components, the proposed connection demonstrates promising potential for improving repairability and facilitating the post-earthquake return to service of steel moment-resisting frames. However, given the semi-rigid behavior of the connection, further studies aimed at increasing its stiffness could broaden the applicability of this system in steel structures.

* Corresponding Author's E-mail: arazavi@usc.ac.ir



Copyright for this article are retained by the author(s) with publishing rights granted to Iranian Society of Steel Structures Press. The content of this article is subject to the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY-NC 4.0) License. For more information, please visit <https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>

Introduction

Beam-to-column connections are among the most critical components of steel structures, since local failure at these regions may trigger progressive collapse of the entire system. Over the past two decades, approaches such as Reduced Beam Section (RBS), beam flange or web modifications, and stiffener-based strengthening have been developed to relocate the plastic hinge away from the connection into the beam, thereby improving seismic performance and energy dissipation capacity. However, since the yielded region remains an integral part of the beam, it cannot be readily replaced after severe seismic events. This limitation has motivated the development of replaceable-fuse connections, in which sacrificial components yield before the primary members, dissipate seismic energy, and can be replaced after an earthquake, thereby facilitating post-earthquake repair and potentially reducing repair time and cost. This study proposes a column-tree beam-to-column connection incorporating a replaceable shear fuse with a reduced section in the beam web between the stub beam and the main beam. The proposed fuse is intended to act as a controlled yielding region, concentrating inelastic deformation and seismic damage within a replaceable component while limiting damage to the beam, column, and other primary connection elements. In the proposed configuration, the flange splice plates are omitted to reduce force transfer through the beam flanges and promote yielding in the web fuse. Locating the fuse in the beam web also facilitates post-earthquake replacement with limited intervention in the floor system. Despite recent progress in replaceable-fuse connections, the behavior of column-tree connections equipped with a replaceable web shear fuse and the influence of geometric parameters on their seismic response remain insufficiently studied. Therefore, this study numerically examines the effects of beam and column section properties, stub beam length, and fuse thickness on initial stiffness, strength, hysteretic response, cumulative energy dissipation, and plastic deformation distribution. The main objective is to

evaluate whether inelastic demand can be effectively concentrated within the replaceable fuse while maintaining satisfactory cyclic behavior and protecting the primary structural members.

Methods

The proposed connection incorporates a reduced-section replaceable web fuse with thicknesses of 15 and 20 mm as the primary energy-dissipating component. Numerical modeling was performed in ABAQUS using three-dimensional solid C3D8R elements for all structural components to accurately capture triaxial stress effects, stress concentrations, and local nonlinear behavior. Boundary conditions represented the column-tree configuration, with pinned and roller supports at the lower and upper column ends, respectively, to simulate the column inflection points. A lateral brace was placed 1000 mm from the beam free end to prevent lateral-torsional buckling, while two pairs of end stiffeners were used to prevent local buckling of the web and flanges and reduce stress concentration at the loading point. The finite element model was first validated using results reported in previous studies. The satisfactory agreement obtained in the validation process supported the suitability of the developed model for the subsequent parametric investigation. The beam and column lengths were 3500 and 3000 mm, respectively. Thirteen numerical models were analyzed by varying the beam and column flange and web thicknesses, stub beam length, and fuse thickness, while keeping the overall member lengths constant. Stub beam lengths ranged from 400 to 1200 mm, and fuse thicknesses of 15 and 20 mm were considered. The weight of the replaceable components was also compared with that of a full beam splice. The full splice used for comparison consisted of two flange and two web splice plates weighing 147.19 kg in total, whereas two replaceable fuses weighed 35.33 and 47.10 kg for thicknesses of 15 and 20 mm, respectively.

Results

The extracted hysteresis curves showed stable cyclic behavior for all models

throughout the loading history without sudden strength degradation or significant instability. Von Mises stress and equivalent plastic strain distributions showed that the highest stress levels and most inelastic deformation were concentrated in the fuse and its adjacent region, while damage to the beam, column, and other primary components remained limited. These results confirm that the proposed connection effectively redirects the primary inelastic demand toward the replaceable component. Stub beam length had a comparatively limited influence on hysteretic response and cumulative energy dissipation, although a moderate increase in energy dissipation was observed with increasing length. Its effect was substantially smaller than that of increasing the beam and column dimensions or fuse thickness. Increasing the beam and column section dimensions enlarged the hysteresis loops and improved initial stiffness, load-carrying capacity, and energy dissipation. Cumulative energy increased from approximately 84 kJ in M1 to 123 kJ in M4, corresponding to an increase of about 46%. Increasing fuse thickness from 15 to 20 mm, an increase of approximately 33%, further enhanced cyclic performance. Cumulative energy dissipation increased from approximately 123 kJ in M4 to 148 kJ in M7, or about 20%. With simultaneous increases in primary-member dimensions and fuse thickness, M7 dissipated approximately 76% more energy than M1. Among M10–M13, cyclic behavior was governed by the combined influence of stub beam length and fuse thickness. M13, with thicker beam and column sections, a 20-mm fuse, and a 1200-mm stub beam, exhibited the most favorable cyclic response in terms of energy dissipation, initial rotational stiffness and hysteretic stability. In contrast, M3, with thinner primary-member sections, showed the lowest overall load-carrying and energy dissipation capacities. Initial rotational stiffness values obtained from the elastic portions of the moment–rotation curves classified all proposed connections as semi-rigid according to the Iranian National Building Regulations, Part 10. Nevertheless, increasing beam and column flange and web thicknesses substantially enhanced stiffness; the initial rotational stiffness of M4 was approximately three times that of M1. This increase did not disrupt the intended concentration of inelastic deformation in the

fuse. Replacing the four splice plates with two 15- or 20-mm fuses reduced the weight of the compared connection components by approximately 76% and 68%, respectively. Thus, even M13, with the thicker 20-mm fuse, maintained a 68% weight reduction while providing favorable cyclic performance. Overall, increasing primary-member dimensions and fuse thickness had a substantially greater effect on seismic performance than changing the stub beam length.

Conclusion

The proposed column-tree connection with a replaceable web shear fuse exhibited stable hysteretic behavior, satisfactory cyclic performance, and effective energy dissipation across 13 nonlinear finite element models. Stress and equivalent plastic strain distributions confirmed that inelastic deformation was predominantly concentrated within the fuse, limiting damage to the beam and column. Increasing the beam and column dimensions and fuse thickness significantly improved initial stiffness, load-carrying capacity, and cumulative energy dissipation, whereas stub beam length had only a limited influence. Increasing member dimensions raised cumulative energy dissipation by approximately 46%, increasing fuse thickness from 15 to 20 mm produced a further increase of about 20%, and their combined effect resulted in an approximately 76% increase compared with the reference model. All connections were classified as semi-rigid; however, M4 had an initial rotational stiffness approximately three times that of M1, showing that surrounding-member dimensions can substantially enhance stiffness without compromising the intended damage-control mechanism. The proposed connection also reduced the weight of the compared splice components by approximately 68–76%, depending on fuse thickness. M13 provided the most favorable overall seismic response, combining enhanced cyclic performance with substantial component-weight reduction. Overall, the proposed system is a promising solution for steel moment-resisting frames where damage control, replaceability, and post-earthquake repairability are important design objectives. Future studies should investigate

alternative fuse geometries and strategies for increasing the rotational stiffness of the connection. In addition, the clearance between the beam end and the stub beam should be optimized to reduce premature contact between adjacent components during cyclic loading and further improve hysteretic stability.

Declaration of Generative AI and AI-assisted Technologies in the Writing Process

The authors declare that no generative AI or AI-assisted technologies were used in the writing, editing, or preparation of this manuscript. All parts of this paper, including conceptualization, data analysis, drafting of the text, and scientific revisions, were performed exclusively by the authors. The authors take full responsibility for the content and accuracy of the information presented herein.

Ethical Consideration

Compliance with ethical guidelines

The authors declare that this study is an original research work. All sources, data, software, and methods used are properly cited and referenced. No data fabrication or falsification has occurred, and the research adheres to all academic integrity guidelines and ethical publishing practices.

Funding

The authors received no financial support for the research, authorship, and/or publication of this article. No specific grants or funding were provided by any agency in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Author's contributions

First Author: Conceptualization, Supervision, Project Administration, Writing–Review and Editing.

Second Author: Investigation, Methodology, Numerical Modeling, Software, Formal Analysis, Data Curation.

Third Author: Visualization, Investigation, Writing–Original Draft, Writing–Review and Editing.

Conflicts of interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

مقاله پژوهشی

ارزیابی عددی عملکرد لرزه‌ای وصله تیر دارای فیوز تعویض‌پذیر در اتصال ستون درختی قاب خمشی فولادی

سیدعلی رضوی طباطبائی^{۱*}، امیررضا کریمی^۲، سیما آرامش^۳

۱- استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه علم و فرهنگ، تهران، ایران

۲- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشگاه علم و فرهنگ، تهران، ایران

۳- گروه مهندسی عمران، دانشگاه ملی مهارت، تهران، ایران



Citation: Razavi Tabatabaei, S.A., Karami, A.R., and Aramesh, S. (2026), "Numerical Seismic Performance Assessment of a Replaceable-Fuse Beam Splice in a Steel Column-Tree Moment-Frame Connection", *Journal of Steel & Structures*, 20(53), pp.122-143. (In Persian)

doi <https://doi.org/10.22034/jss.2026.601348.1060>

چکیده

زمینه پژوهش: اتصالات تیر به ستون از اجزای کلیدی در سازه‌های فولادی هستند و نقش اساسی در انتقال نیرو و تأمین عملکرد لرزه‌ای قاب‌های خمشی ایفا می‌کنند. با توجه به تعمیرپذیری محدود قاب‌های خمشی فولادی متداول و هزینه‌بر بودن بازسازی آن‌ها پس از زلزله، توسعه اتصالات مجهز به اجزای تعویض‌پذیر، به‌عنوان یکی از رویکردهای نوین برای محدود نمودن آسیب و تسهیل بازگشت سریع سازه به بهره‌برداری، مورد توجه قرار گرفته است. هدف این پژوهش، بررسی رفتار لرزه‌ای اتصال ستون درختی مجهز به فیوز برشی تعویض‌پذیر در ناحیه جان تیر است.

روش پژوهش: تحلیل عددی رفتار این سیستم با استفاده از روش اجزای محدود غیرخطی، در نرم‌افزار Abaqus انجام شد. مدل عددی ابتدا با استفاده از نتایج مطالعات پیشین اعتبارسنجی شد و سپس تأثیر پارامترهای هندسی شامل ابعاد تیر و ستون، ضخامت فیوز و طول دستک بر رفتار هیستریزس، سختی، ظرفیت باربری و انرژی تجمعی مستهلک‌شده مورد بررسی قرار گرفت. همچنین، وزن فیوزهای پیشنهادی با مجموع وزن ورق‌های وصله بال و جان در نظر گرفته‌شده برای یک وصله متداول تیر، مقایسه شد.

یافته‌ها: نتایج نشان داد که تغییر شکل‌های غیرارتجاعی عمدتاً در عضو فیوز متمرکز شد و آسیب اعضای اصلی اتصال محدود ماند. افزایش ضخامت فیوز از ۱۵ به ۲۰ میلی‌متر، انرژی تجمعی مستهلک‌شده را حدود ۲۰ درصد افزایش داد. همچنین، در میان پارامترهای بررسی‌شده، افزایش ضخامت اعضای اصلی اتصال و فیوز تأثیر بیش‌تری بر ظرفیت باربری، اتلاف انرژی و پایداری چرخه‌ای اتصال داشت و اثر تغییر طول دستک در محدوده بررسی‌شده کم‌تر بود. افزون بر این، برای ضخامت‌های ۱۵ و ۲۰ میلی‌متر، مجموع وزن دو فیوز در مقایسه با مجموع وزن چهار ورق وصله بال و جان در نظر گرفته‌شده برای یک وصله متداول تیر، به‌ترتیب ۷۶ و ۶۸ درصد کم‌تر بود.

نتیجه‌گیری: در مجموع، اتصال پیشنهادی با محدود نمودن آسیب به عضو فیوز، حفظ نسبی سلامت اعضای اصلی و کاهش قابل‌توجه وزن اجزای وصله، قابلیت مناسبی برای افزایش تعمیرپذیری و تسهیل بهره‌برداری مجدد قاب‌های خمشی فولادی پس از زلزله دارد. با این حال، با توجه به رفتار نیمه‌گیردار اتصال، انجام مطالعات تکمیلی برای افزایش سختی آن می‌تواند دامنه کاربرد این سیستم را در سازه‌های فولادی گسترش دهد.

اطلاعات مقاله:

سابقه مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۱ فروردین ماه ۱۴۰۵

تاریخ بازنگری: ۱۹ مرداد ماه ۱۴۰۵

تاریخ پذیرش: ۲۶ مرداد ماه ۱۴۰۵

تاریخ انتشار: ۱ مهر ماه ۱۴۰۵

واژگان کلیدی:

قاب خمشی فولادی

ستون درختی

اتصال تیر به ستون

تحلیل غیرخطی

فیوز برشی تعویض‌پذیر

* آدرس ایمیل نویسنده مسئول: arazavi@usc.ac.ir

حقوق نشر این مقاله برای نویسنده(گان) محفوظ است و حقوق انتشار آن به انتشارات انجمن سازه‌های فولادی ایران واگذار شده است. محتوای این مقاله تابع قوانین و شرایط مجوز بین‌المللی Creative Commons Attribution 4.0 (CC-BY-NC 4.0) می‌باشد. برای اطلاعات بیشتر، لطفاً به وبسایت

مربوطه مراجعه فرمایید. <https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>



۱- مقدمه

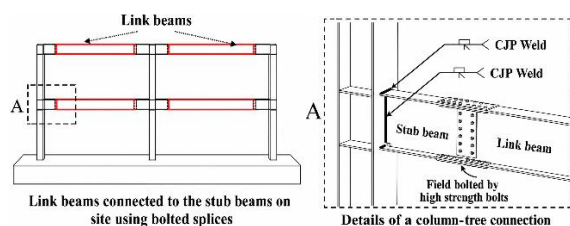
۱-۱- مبانی پژوهش

اتصالات تیر به ستون از اجزای بحرانی سازه‌های فولادی محسوب می‌شوند، زیرا وقوع خرابی موضعی در این ناحیه می‌تواند به خرابی پیشرونده سازه منجر شود. از این‌رو، در دو دهه اخیر پژوهش‌های گسترده‌ای به منظور بهبود عملکرد لرزه‌ای این اتصالات انجام شده است. این مطالعات، عمدتاً بر دو رویکرد متمرکز بوده‌اند: نخست، انتقال محل تشکیل مفصل پلاستیک به ناحیه‌ای از تیر که از پیش برای این منظور طراحی شده است؛ دوم، استفاده از اجزای قابل تعویض به منظور اتلاف انرژی زلزله، محدود نمودن آسیب به قطعات اصلی سازه و اجزای غیرسازه‌ای و تسهیل تعمیر و بازگرداندن سریع سازه به بهره‌برداری پس از زلزله.

در رویکرد نخست، هدف آن است که محل تشکیل مفصل پلاستیک از اتصال به ناحیه‌ای از تیر منتقل شود. برای این منظور، از روش‌هایی مانند کاهش موضعی مقطع تیر (RBS)^۱، برش بال یا جان تیر و همچنین تقویت اتصال با سخت‌کننده‌ها و صفحات تقویتی استفاده می‌شود. در تمامی این روش‌ها، آسیب به صورت کنترل‌شده در ناحیه‌ای از پیش تعیین‌شده، موسوم به فیوز شکل‌پذیر^۲، متمرکز می‌شود تا از آسیب به اتصال و ستون جلوگیری شود [۱ و ۲]. اگرچه این بخش‌ها عملکرد شکل‌پذیر و ظرفیت اتلاف انرژی مناسبی از خود نشان می‌دهند، اما پس از وقوع آسیب، ناحیه تسلیم‌شده بخشی از تیر بوده و به راحتی قابل تعویض نیست. از این‌رو، به منظور رفع محدودیت عدم قابلیت تعویض در اتصالات پیش‌تأیید صلاحیت‌شده^۳، نسل جدیدی از اتصالات مبتنی بر فیوزهای قابل تعویض توسعه یافته است. در این سیستم‌ها، فیوزهای قابل تعویض با پیکربندی‌های مختلف در ناحیه اتصال نصب می‌شوند تا پیش از تسلیم تیر و ستون فعال شده، انرژی زلزله را مستهلک کنند و اعضای اصلی سازه را در محدوده الاستیک نگه دارند. این فیوزها ضمن انتقال بارهای ثقلی، پس از وقوع زلزله به سادگی قابل تعویض هستند و در نتیجه زمان و هزینه تعمیر سازه به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد.

در راستای توسعه سازه‌های فولادی، اتصال ستون درختی^۴ به عنوان یکی از راهکارهای نوین برای افزایش قابلیت تعویض

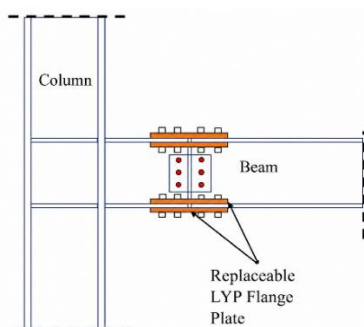
اجزای آسیب‌دیده معرفی شده است. همان‌طور که در شکل (۱) نشان داده شده است، در این روش ستون به همراه یک بخش کوتاه از دستک^۵ به صورت یکپارچه و پیش‌ساخته در کارخانه ساخته شده و سپس به محل پروژه منتقل می‌شود. دستک در کارخانه به ستون جوش داده شده و تیر اصلی در محل پروژه به وسیله پیچ یا جوش به آن متصل می‌شود؛ از این‌رو، ضمن حذف جوشکاری در محل، کیفیت اجرا و سرعت نصب نیز افزایش می‌یابد [۳ و ۴].



شکل ۱- مونتاژ سیستم ستون درختی در قاب خمشی [۳]

در یکی از روش‌های ابداعی در سیستم ستون درختی، برای ایجاد اتصالات جان‌به‌جان و بال‌به‌بال دستک به تیر اصلی، از ورق‌های فولادی با تنش تسلیم پایین (LYP)^۶ استفاده می‌شود [۵]. شکل (۲) نمونه‌ای از این نوع اتصالات را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، در این اتصال از ورق‌های تعویض‌پذیر در بال تیر استفاده شده است تا علاوه بر سهولت ساخت، امکان تعویض آسان اجزای اتصال را نیز فراهم کند [۶].

با توجه به کاربرد گسترده ستون درختی در مناطق لرزه‌خیز ایران، بررسی رفتار لرزه‌ای و ملاحظات طراحی آن اهمیت زیادی دارد. با وجود رواج این اتصال، در آیین‌نامه AISC 341-22 تأیید مشخصی برای آن ارائه نشده است؛ از این‌رو، انجام تحقیقات بیش‌تر در این زمینه ضروری است [۷].



شکل ۲- اتصال ستون درختی با استفاده از ورق‌های تعویض‌پذیر در بال تیر [۶]

^۵ Stub Beam
^۶ Low Yield Point

^۱ Reduced Beam Section
^۲ Ductile Fuse
^۳ Prequalified Connections
^۴ Column-Tree

با توجه به چالش‌های موجود در فرایند ترمیم اتصالات فعلی، این پژوهش نوع جدیدی از فیوز قابل تعویض برای قاب‌های خمشی مقاوم را معرفی می‌کند. اجرای فیوز در اتصال پیشنهادی، امکان بازسازی مقرون به صرفه سازه را پس از وقوع یک رویداد لرزه‌ای بزرگ فراهم می‌سازند. با توجه به این که هدف اصلی این پژوهش، متمرکز نمودن آسیب در عضو فیوز تعویض پذیر و جلوگیری از آسیب به اعضای اصلی سازه است، از سیستم اتصال ستون درختی به عنوان بستر مناسبی برای استقرار این فیوز استفاده شده است.

۱-۲- پیشنهاد پژوهش

در سال‌های اخیر، پژوهشگران با هدف متمرکز کردن تغییر شکل‌های غیرارتجاعی در فیوزهای لرزه‌ای، افزایش شکل پذیری و جلوگیری از آسیب دیدگی اعضای اصلی سازه، انواع مختلفی از اتصالات دارای اجزای قابل تعویض را ارائه نمودند. با وجود پیشرفت‌های حاصل شده، چالش‌هایی نظیر محدود بودن پیش‌تأییدهای آیین‌نامه‌ای، ابهام در عملکرد این اتصالات تحت بارگذاری‌های چرخه‌ای و پیچیدگی برخی جزئیات اجرایی همچنان از مهم‌ترین محدودیت‌های این سیستم‌ها به‌شمار می‌روند.

در راستای توسعه اتصالات با قابلیت اتلاف انرژی و تعمیر پذیری پس از زلزله، اتصال DT^۱ با جفت سپری مورد توجه پژوهشگران قرار گرفت. در این اتصال، اتلاف انرژی عمدتاً از طریق خمش بال سپری در اثر عملکرد هم‌زمان نیروهای کششی و فشاری تأمین می‌شود. با توجه به نقش اصلی سپری‌ها در جذب و اتلاف انرژی، این اجزا در پژوهش‌های بعدی به عنوان اعضای قابل تعویض برای کاهش هزینه‌های تعمیر و تسهیل بازسازی پس از زلزله پیشنهاد شدند [۸].

در استاندارد AISC 358-16 اتصال با سپری و جان کاهش یافته به عنوان یک اتصال با مقاومت جزئی در طراحی اتصالات فولادی معرفی شده است [۹]. در این اتصال، اتلاف انرژی از طریق رفتار مکانیکی جان سپری در ناحیه‌ای با مقطع کاهش یافته و تحت بارگذاری چرخه‌ای رفت و برگشتی تأمین می‌شود.

کیشیکی^۲ و همکاران، با هدف دستیابی به اتصالی با قابلیت کنترل آسیب و سهولت تعمیر پس از زلزله، یک اتصال جدید

شکل پذیر قاب خمشی را بر پایه سپری با جان کاهش یافته پیشنهاد کردند [۱۰]. در این اتصال برای جلوگیری از کمانش ناحیه کاهش یافته جان سپری، یک ورق پوششی بر روی آن نصب می‌شود. در این سیستم، اتلاف انرژی از طریق رفتار مکانیکی جان سپری در ناحیه کاهش یافته و تحت بارگذاری چرخه‌ای رفت و برگشتی تأمین می‌شود. این اتصال به دلیل سرعت و سهولت اجرا، قابلیت تعویض عضو مستهلک کننده و ظرفیت بالای اتلاف انرژی، به عنوان یکی از گزینه‌های مناسب برای طراحی اتصالات قاب خمشی فولادی مورد توجه قرار گرفت. این اتصال بعدها در استاندارد AISC 358-16 به عنوان یک اتصال با مقاومت جزئی در طراحی اتصالات فولادی معرفی شد [۹].

لاتور^۳ و ریزانو^۴، با الهام از ایده مقاطع با ناحیه کاهش یافته، بال سپری در این نوع اتصال را تضعیف کردند تا ظرفیت اتلاف انرژی و شکل پذیری اتصال افزایش یابد [۱۱]. نتایج نشان داد که این اتصال با بال تضعیف شده، قادر به تحمل دررفت طبقه تا هشت درصد است که به طور قابل توجهی بیش تر از اتصال DT متداول است.

مرادی گروسی و همکاران، با استفاده از تحلیل المان محدود در نرم افزار Abaqus، عملکرد لرزه‌ای اتصال متداول صفحه انتهایی با ناحیه کاهش یافته (RBS) را با دو نوع اتصال دارای لینک قابل تعویض شامل فیوز با بال کاهش یافته (RBS-F)^۵، به صورت آزمایشگاهی و عددی مقایسه کردند [۱۲]. یافته‌های این پژوهش نشان داد که با وجود کاهش شکل پذیری نمونه‌های RBS و RBS-F با افزایش سایش تیر، اتصال RWS-F از شکل پذیری بالاتری برخوردار بوده و با اصلاح ضخامت جان می‌تواند به مقاومت نهایی معادل نمونه‌های مشابه دست یابد؛ لذا این سیستم به عنوان یک راهکار کارآمد و فیوز قابل تعویض، جایگزینی مناسب برای اتصالات RBS سنتی معرفی شده است.

جیانگ^۶ و همکاران، بر پایه رویکرد کنترل خرابی، یک اتصال پیش ساخته با جان موج دار سینوسی مقاوم در برابر زلزله (PSCW)^۷ برای اتصال ستون درختی ارائه کردند [۱۳]. در اتصال پیشنهادی، از ستون لوله‌ای دایره‌ای توخالی و دستک استفاده شده است که تیر اصلی از طریق صفحات انتهایی به دستک متصل می‌شود. با توجه به آن که جان موج دار قادر به تحمل نیروی

^۳ Latour

^۴ Rizzano

^۵ Reduced Flange Section Fuse

^۶ Jiang

^۷ Prefabricated Sinusoidal Corrugated Web Beam-Column Joint

^۱ Double Tee Connection

^۲ Kishiki

که این امر موجب بهبود قابلیت تعمیر و تعویض اتصال پس از زلزله می‌شود.

واجدیان و همکاران^۶، با توسعه مفهوم ناحیه بال کاهش‌یافته، دو پیکربندی متفاوت از فیوزهای قابل تعویض را ارائه نمودند [۱۶]. همچنین، عملکرد اتصال متداول تیر با مقطع کاهش‌یافته (RBS)، اتصال بال سوراخ‌دار (DFC)^۷ و اتصال مجهز به مجموعه فیوز قابل تعویض را با استفاده از روش اجزای محدود مورد مقایسه قرار دادند. قطعات الحاقی جدید به‌کار رفته در این اتصال، تحت اثر بارگذاری رفت‌وبرگشتی ناشی از زلزله، به‌صورت متقابل در جذب انرژی مشارکت کرده و موجب کنترل بهتر تنش‌های کششی و فشاری ناشی از لنگر خمشی در محل اتصال می‌شوند. ضخامت این قطعات با توجه به ضخامت بال تیر انتخاب شده و به‌منظور تمرکز تغییرشکل‌های غیرارتجاعی در فیوز، کم‌تر از ضخامت بال تیر در نظر گرفته شده است.

کرمی و حسینی‌هاشمی^۸، با استفاده از تحلیل المان محدود در نرم‌افزار Abaqus عملکرد لرزه‌ای اتصالات ستون‌درختی را تحت سه روش طراحی وصله پیچی (لغزش بحرانی، پیش‌تنیده و وصله ضعیف) ارزیابی کردند [۱۷]. یافته‌های این مطالعه نشان می‌دهد، اگرچه روش طراحی تأثیر محدودی بر مقاومت خمشی نهایی دارد، اما در پیش‌تأیید صلاحیت‌شدن اتصال و میزان انرژی مستهلک‌شده بسیار تعیین‌کننده است؛ بر این اساس، طراحی به‌روش پیش‌تنیده به‌دلیل بهره‌گیری از لغزش پیچ‌ها به‌عنوان مود شکل‌پذیر و کاهش شاخص‌های خسارت، به‌عنوان راهکار برتر پیشنهاد شده است.

فنگ^۹ و همکاران، یک اتصال قاب فولادی مجهز به لینک کمانش‌تاب قابل تعویض (RBRL)^۸ را با هدف بهبود عملکرد لرزه‌ای و جلوگیری از کمانش صفحات اتصال ارائه کردند [۱۸]. در این مطالعه، روابط تحلیلی تسلیم و سختی اولیه استخراج و یک روش طراحی بر اساس محدودیت‌های کرنش و تغییرشکل پیشنهاد شد. نتایج آزمایش چرخه‌ای و تحلیل عددی نشان داد که روش پیشنهادی قادر است رفتار اتصال را با دقت مناسبی پیش‌بینی کند و عملکرد لرزه‌ای مطلوبی ارائه دهد.

چن^۹ و همکاران، اتصال جدیدی برای ستون‌درختی با استفاده از صفحات کمانش‌تاب و قابل تعویض به‌عنوان المان‌های

محوری نیست، از ورق‌های پوششی بال^۱ نیز استفاده شده است. نتایج بررسی‌های نویسندگان نشان داد که این اتصال قادر است انرژی ناشی از زلزله را از طریق تغییرشکل پلاستیک و اصطکاک لغزشی^۲ مستهلک نماید. همچنین، ظرفیت باربری و ظرفیت اتلاف انرژی آن در طول عملکرد اتصال دچار کاهش یا تغییر محسوسی نمی‌شود. علاوه بر این، استفاده از ورق پوششی لغزشی و بال‌های تیر، موجب افزایش شکل‌پذیری اتصال و تأمین ظرفیت دوران بیش‌تری می‌شود.

در پژوهشی دیگر، **جیانگ و همکاران** طرحی نوآورانه را ارائه و به ثبت رساندند [۱۴]. در این طرح، یک اتصال پیش‌ساخته با صفحات بال کاهش‌یافته و قابل تعویض ارائه شد که در آن، تیر از طریق اتصال پیچی به ستون متصل می‌شود. صفحات بال کاهش‌یافته به‌عنوان فیوز لرزه‌ای عمل کرده و با تمرکز تغییرشکل‌های پلاستیک و اتلاف انرژی در این ناحیه، از آسیب‌دیدگی تیر و ستون جلوگیری می‌کنند. همچنین، کاهش موضعی عرض بال و انتخاب فاصله مناسب آن، امکان کنترل و جابه‌جایی محل تشکیل مفصل پلاستیک را فراهم می‌کند. علاوه بر این، تأمین ضخامت کافی بال، ضمن حفظ سختی بخش طره‌ای تیر، به انتقال محل تشکیل مفصل پلاستیک کمک می‌کند. در این اتصال پس از وقوع زلزله، با تعویض صفحات بال کاهش‌یافته، عملکرد اتصال با حداقل نیاز به تعمیر اعضای اصلی قابل‌بازایی است.

اوزکیلچ^۳، یک اتصال فیوزی قابل تعویض جدید با استفاده از ناحیه کاهش‌یافته تیر قابل تعویض (R-RBS)^۴ برای قاب‌های خمشی پیشنهاد کرد. هدف اصلی این اتصال، حذف نیاز به جوشکاری در محل، تسهیل نصب و فراهم‌کردن امکان تعویض سریع عضو آسیب‌دیده پس از زلزله بود. نتایج مطالعات آزمایشگاهی و تحلیل‌های عددی نشان داد که این اتصال از ظرفیت جذب انرژی و عملکرد لرزه‌ای مطلوبی برخوردار بوده و الزامات آیین‌نامه‌ای را برآورده می‌کند. در این اتصال یک انتها از طریق اتصال لب‌به‌لب به تیر اصلی و انتهای دیگر به وسیله اتصال صفحه انتهایی^۵ به ستون متصل می‌شود. همچنین، اتلاف انرژی از طریق ناحیه با مقطع کاهش‌یافته و صفحات وصله انجام می‌شود

⁶ Drilled Flange Connection

⁷ Feng

⁸ Replaceable Buckling-Restrained Link

⁹ Chen

¹ Flange Cover Plates

² Slip Friction

³ Özkılıç

⁴ Replaceable Reduced Beam Section

⁵ End Plate

AISC 358-22، عملکرد مناسب این سیستم در تأمین شکل پذیری بالا (چرخش تا ۰/۰۶ رادیان) تأمین می شود [۲۱].

فنگ و همکاران، رفتار آزمایشگاهی یک اتصال ستون درختی یک طرفه را با استفاده از ورق های مهار شده در برابر کماتش و قابل تعویض در ناحیه بال تیر مورد بررسی قرار دادند [۲۲]. نتایج این پژوهش نشان داد که این اتصال می تواند انرژی ناشی از زلزله را به خوبی مستهلک نماید و امکان تعمیر پذیری سریع پس از زلزله را فراهم آورد.

فناپی و همکاران، یک روش طراحی برای سیستم فیوز برشی در قاب های خمشی فولادی ارائه نمودند [۲۳]. در این سیستم، با استفاده از یک عضو برشی قابل تعویض، مکانیزم اتلاف انرژی از نواحی بحرانی تیر و اتصال تیر به ستون به یک جزء کنترل شده و قابل جایگزینی منتقل می شود. هدف اصلی این رویکرد، افزایش شکل پذیری، بهبود رفتار چرخه ای و کاهش آسیب های دائمی در اعضای اصلی قاب پس از زلزله است. نویسندگان با ارائه روابط طراحی و بررسی عددی عملکرد سیستم پیشنهادی نشان دادند که فیوز برشی، ضمن تأمین ظرفیت مناسب جذب انرژی، می تواند محل تشکیل مفصل پلاستیک را از ناحیه اتصال تیر به ستون به ناحیه فیوز منتقل کرده و قابلیت تعمیر پذیری قاب های خمشی فولادی را افزایش دهد.

میتوز^۴ و همکاران، به بررسی رفتار چرخه ای اتصالات ستون درختی با استفاده از صفحات تضعیف شده پرداختند [۲۴]. محققان با مدل سازی عددی ۱۴ نمونه در نرم افزار Ansys، تأثیر متغیرهایی مانند محل اتصال پیچی، لغزش پیچ ها و ضخامت صفحات را مورد تحلیل قرار دادند. نتایج نشان داد که با استفاده از صفحات تضعیف شده، می توان تغییر شکل های غیرالاستیک را کنترل کرد و بدون نیاز به قطعات پیچیده، به معیارهای استاندارد آیین نامه ای دست یافت؛ این طراحی نه تنها ایمنی اتصال را در برابر بارهای لرزه ای افزایش می دهد، بلکه به دلیل استفاده از قطعات استاندارد، تعمیر و نگهداری آن را نیز در صورت بروز آسیب، بسیار ساده تر و کم هزینه تر می کند.

به طور کلی بخش عمده پژوهش های پیشین، بر تضعیف هدفمند ناحیه تشکیل مفصل پلاستیک در تیر متمرکز بوده اند. با این حال، مطالعات مربوط به توسعه و ارزیابی فیوزهای برشی قابل تعویض همچنان محدود است.

مستهلک کننده انرژی، ارائه کردند [۱۹]. در این اتصال صفحات فولادی به عنوان فیوزهای سازه ای عمل کرده و به منظور تمرکز آسیب های غیرالاستیک و استهلاک انرژی طراحی شده اند. کماتش احتمالی این صفحات توسط ورق های برشی تشکیل که به صورت هدفمند طراحی شده اند، مهار می شود. این ورق های برشی علاوه بر جلوگیری از کماتش، وظیفه اتصال جان تیرها و انتقال نیروی برشی تیر را نیز بر عهده دارند. از این رو، اتصال قادر است هم مقاومت پایدار و هم ظرفیت استهلاک انرژی مطلوب را تأمین کند. در این پژوهش، به منظور ارزیابی رفتار لرزه ای و قابلیت تعمیر پذیری اتصال پس از زلزله، شش آزمایش بارگذاری چرخه ای انجام شد. نتایج نشان داد صفحات فیوز پس از پایان آزمایش به سرعت قابل تعویض بودند و اتصال تعمیر شده، عملکرد لرزه ای تقریباً مشابهی با اتصال اولیه از خود نشان داد. در مجموع، اتصال پیشنهادی راهکاری اقتصادی، کارآمد و مناسب برای سازه های فولادی تاب آور در برابر زلزله ارائه می کند.

کرمی و همکاران، نشان دادند که پیش تأیید صلاحیت شدن اتصالات ستون درختی، وابسته به طول عضو واسط (دستک) و جزئیات طراحی وصله پیچی است [۳]. بر اساس یافته های آن ها، آرایش وصله تأثیر قابل توجهی بر رفتار غیرخطی، مقاومت، سختی، تمایل به شکست، شکل پذیری، ظرفیت اتلاف انرژی، لغزش و افت پیش تیدگی پیچ ها دارد. همچنین مشخص شد که نوع وصله پیچی می تواند ماهیت اتصال را از گیردار به نیمه گیردار تغییر دهد که این موضوع باید در تحلیل قاب های خمشی لحاظ شود.

ریچاردز^۱ و لی^۲، یک فیوز برشی قابل تعویض مبتنی بر صفحه شیاردار^۳ برای اتصال قاب خمشی فولادی پیشنهاد کردند [۲۰]. در اتصالات تیر به ستون، بخش عمده نیروهای خمشی از طریق بال تیر به بال ستون منتقل می شود. استفاده از فیوزهای برشی قابل تعویض، مانند صفحات شیاردار، می تواند با تمرکز تغییر شکل های غیرالاستیک در یک ناحیه مشخص، موجب افزایش شکل پذیری و بهبود رفتار لرزه ای اتصال شود. در این سیستم، بخش میانی صفحه شیاردار به تیر متصل شده و دو انتهای آن توسط ورق های ضخیم متصل به ستون مهار می شود؛ به طوری که ناحیه بین شیارها تحت برش تغییر شکل داده و انرژی زلزله را مستهلک می کند. همچنین، با اصلاح هندسه فیوز برای تیرهای عمیق سنگین خارج از محدوده پیش تأیید آیین نامه

⁴ Matthews

¹ Richards

² Lee

³ Slitted Shear Plate

۱-۳- انگیزه پژوهش

با وجود پیشرفت‌های قابل توجه در توسعه اتصالات فولادی و فیوزهای لرزه‌ای قابل تعویض، دستیابی به اتصالاتی که ضمن تأمین سختی، مقاومت و شکل‌پذیری مناسب، آسیب لرزه‌ای را به یک عضو قابل تعویض محدود کند، همچنان از چالش‌های مهم مهندسی سازه محسوب می‌شود. اگرچه سیستم ستون درختی با انتقال محل اتصال از مجاورت ستون، احتمال آسیب به ستون و چشمه اتصال را کاهش می‌دهد، در بسیاری از طرح‌های ارائه شده، تغییر شکل‌های غیرالاستیک و اتلاف انرژی همچنان در تیر یا سایر اجزای اصلی اتصال متمرکز می‌شوند که می‌تواند تعمیر سازه پس از زلزله را دشوار و پرهزینه سازد. افزون بر این، اغلب فیوزهای معرفی شده در مطالعات پیشین از نوع فیوزهای فلنجی، T-Stub، صفحات انتهایی یا سایر اجزای مستقل بوده‌اند و استفاده از پلیت‌های دارای مقطع کاهش یافته در ناحیه جان، به‌ویژه در اتصالات مبتنی بر سیستم ستون درختی، کم‌تر مورد بررسی قرار گرفته است. در بسیاری از این سیستم‌ها، وقوع کماتش موضعی و درگیری هم‌زمان بال‌های تیر می‌تواند موجب تمرکز تنش، کاهش مقاومت و شکل‌پذیری، آغاز زود هنگام خستگی کم‌چرخه و در نهایت کاهش ظرفیت اتلاف انرژی اتصال شود.

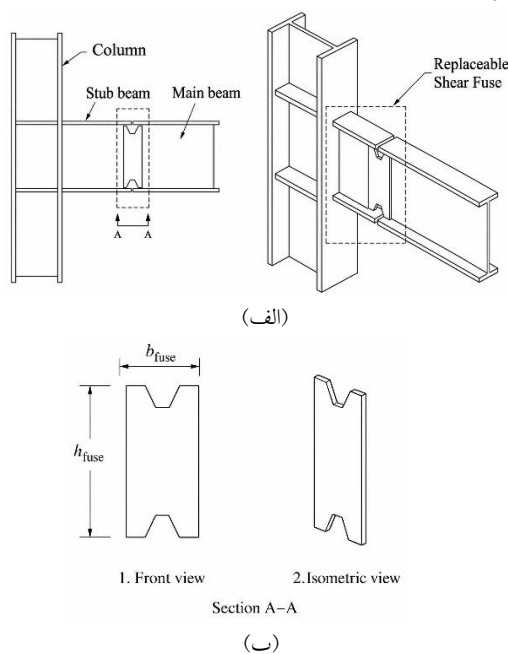
بر این اساس، خلأ اصلی مورد توجه در پژوهش حاضر، محدود بودن مطالعات درباره استفاده از یک فیوز برشی تعویض‌پذیر با مقطع کاهش یافته در ناحیه جان تیر، به‌ویژه در اتصال ستون درختی، است. در طرح پیشنهادی، برخلاف بسیاری از اتصالات تعویض‌پذیر پیشین که عضو مستهلک‌کننده در ناحیه بال تیر، صفحات انتهایی یا سایر اجزای واسط اتصال قرار می‌گیرد، عضو فیوز در مسیر اتصال جان تیر اصلی به دستک تعبیه شده است. همچنین، با حذف ورق‌های وصله بال، سهم انتقال نیرو از طریق بال‌ها کاهش یافته و پاسخ غیرخطی اتصال به‌صورت هدفمند به ناحیه فیوز هدایت می‌شود.

نوآوری پژوهش حاضر، در ارزیابی عددی این آرایش و بررسی تأثیر پارامترهای هندسی شامل ابعاد تیر و ستون، ضخامت فیوز و طول دستک بر تمرکز تغییر شکل‌های غیرارتجاعی، رفتار هیستریزس، سختی و ظرفیت اتلاف انرژی اتصال است. علاوه بر این، کاهش وزن اجزای وصله در مقایسه با وصله متداول به‌عنوان یکی از مزایای کمی طرح پیشنهادی ارزیابی شده است. قرارگیری فیوز در ناحیه جان و استفاده از مقطع کاهش یافته، می‌تواند از درگیری هم‌زمان بال‌های تیر کاسته و به بهبود رفتار هیستریزس اتصال کمک نماید.

همچنین، قرارگیری فیوز در ناحیه جان تیر و پایین‌تر از تراز بال فوقانی، سبب می‌شود فیوز خارج از ناحیه اتصال تیر به دال قرار گیرد و دسترسی به آن برای تعویض، بدون مداخله مستقیم در دال امکان‌پذیر باشد. کاهش نیاز به تأمین مهارهای جانبی و حساسیت کم‌تر عملکرد اتصال به محل قرارگیری این مهارها نیز از دیگر مزایای این نوع اتصال به‌شمار می‌روند. در نتیجه، پس از وقوع زلزله، تمرکز آسیب در عضو فیوز می‌تواند نیاز به تعمیر یا تعویض اجزای اصلی اتصال را کاهش داده و با فراهم کردن امکان تعویض عضو فیوز، فرایند بازگرداندن سازه به بهره‌برداری پس از زلزله را تسهیل کند.

۲- معرفی طرح پیشنهادی

در شکل (۳)، طرح پیشنهادی اتصال و جزئیات فیوز لرزه‌ای تعویض‌پذیر نشان داده شده است. در این طرح، به‌منظور ارتقای عملکرد لرزه‌ای اتصال و افزایش قابلیت تعمیرپذیری پس از زلزله، یک المان تعویض‌پذیر در ناحیه زیر وصله تیر و در امتداد جان تیر تعبیه شده است. این عضو به‌عنوان ناحیه کنترل‌شده تسلیم در نظر گرفته شده و با تمرکز تغییر شکل‌های غیرالاستیک در خود، بخشی از انرژی ناشی از بارگذاری‌های چرخه‌ای را جذب و مستهلک می‌کند. بدین ترتیب، تقاضای غیرالاستیک به ناحیه فیوز هدایت شده و میزان آسیب در اعضای اصلی اتصال محدود می‌شود.



شکل ۳- اتصال ستون درختی پیشنهادی مجهز به فیوز برشی تعویض‌پذیر؛ (الف) نمای کلی اتصال، (ب) هندسه فیوز برشی

مجموع وزن دو فیوز در هر اتصال برای ضخامت‌های مذکور، به‌ترتیب، ۳۵/۳۳ و ۴۷/۱۰ کیلوگرم است. بنابراین، جایگزینی چهار ورق وصله با فیوزهای ۱۵ و ۲۰ میلی‌متری، وزن این بخش از اتصال را به‌ترتیب ۷۶ و ۶۸ درصد کاهش می‌دهد. افزون بر کاهش وزن، کاهش تعداد قطعات به‌کاررفته در اتصال می‌تواند موجب ساده‌تر شدن جزئیات اجرایی، کاهش حجم عملیات ساخت و نصب و تسهیل فرایند تعویض اجزای آسیب‌دیده پس از زلزله شود.

۳- مدل‌سازی اجزای محدود

۳-۱- صحت‌سنجی مدل المان محدود

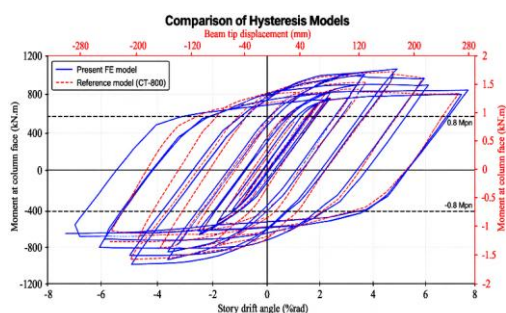
به‌منظور اطمینان از صحت نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی، نتایج به‌دست‌آمده از نرم‌افزار با نتایج مطالعات کرمی و همکاران مورد اعتبارسنجی قرار گرفت [۳]. مشخصات هندسی و مکانیکی المان‌های نمونه‌های مورد بررسی در این پژوهش با مشخصات نمونه‌های ارائه‌شده در مطالعه مذکور مطابقت دارد و امکان مقایسه مستقیم پاسخ عددی مدل با نتایج مطالعه مرجع را فراهم می‌کند. بنابراین، مقاله مذکور به‌عنوان مرجع مناسبی برای صحت‌سنجی مدل عددی انتخاب شده است.

بر این اساس، نمونه مورد نظر مطابق مشخصات ارائه‌شده در مطالعه مرجع در نرم‌افزار Abaqus مدل‌سازی شد. نمای مدل اجزای محدود و توزیع کرنش پلاستیک معادل (PEEQ)^۱ حاصل از تحلیل در شکل (۴) نشان داده شده است. پس از مدل‌سازی نمونه در نرم‌افزار، نمودار لنگر-دوران حاصل از تحلیل عددی استخراج و با نمودار ارائه‌شده در مطالعه مرجع مقایسه شد. در شکل (۵) نمودارهای هیستریزس مقاله مرجع و مدل اجزای محدود با هم مقایسه شده‌اند.

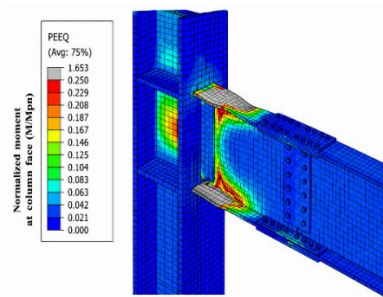
در پیکربندی پیشنهادی، فیوز در مسیر اتصال جان تیر اصلی به دستک قرار گرفته و به‌عنوان جزء واسط میان این دو بخش عمل می‌کند؛ همچنین، وصله‌های بال میان تیر اصلی و دستک حذف شده‌اند. با توجه به قرارگیری فیوز در امتداد جان تیر، هدف طرح آن است که ناحیه اصلی تسلیم و تغییرشکل‌های غیرارتجاعی در عضو فیوز متمرکز شده و گسترش تقاضای غیرالاستیک به جان تیر اصلی محدود شود. حذف وصله‌های بال پس از چند مرحله اصلاح و ارزیابی مدل عددی، با هدف کاهش سهم انتقال نیرو از طریق بال‌ها و هدایت تقاضای غیرالاستیک به ناحیه فیوز انجام شد. نتایج مدل‌سازی عددی نیز نشان داد که بیش‌ترین تغییرشکل‌های پلاستیک در عضو فیوز و نواحی مجاور آن متمرکز شده است. بنابراین، وجه تمایز طرح پیشنهادی، هدایت هدفمند تقاضای غیرالاستیک به یک جزء تعویض‌پذیر در ناحیه جان و محدودکردن آن در اعضای اصلی اتصال است.

در پژوهش حاضر، تیرها با مقطع $600 \times 200 \times 10 \times 20$ H و طول ۳۵۰۰ میلی‌متر و ستون‌ها با مقطع $400 \times 400 \times 15 \times 20$ H و ارتفاع ۳۰۰۰ میلی‌متر مدل‌سازی شده‌اند. به‌منظور مقایسه وزنی اتصال ستون‌درختی دارای وصله کامل آیین‌نامه‌ای و اتصال پیشنهادی، وزن اجزای به‌کاررفته در هر دو حالت محاسبه شد. در این مقایسه، وصله کامل آیین‌نامه‌ای شامل دو ورق وصله بال، هر یک به ابعاد $1500 \times 150 \times 35$ میلی‌متر و دو ورق وصله جان در دو طرف جان تیر، هر یک به ابعاد $500 \times 300 \times 10$ میلی‌متر، در نظر گرفته شد. مجموع وزن این چهار ورق $147/19$ کیلوگرم به‌دست آمد.

در اتصال پیشنهادی، دو فیوز تعویض‌پذیر مستقر در جان تیر جایگزین چهار ورق به‌کاررفته در وصله کامل آیین‌نامه‌ای شدند. بر اساس نتایج طراحی، فیوزهای مورد بررسی با هندسه یکسان و در دو ضخامت متفاوت ۱۵ و ۲۰ میلی‌متر در نظر گرفته شدند.



شکل ۴- مقایسه نمودارهای هیستریزس مقاله مرجع و مدل اجزای محدود



شکل ۵- نمونه مدل‌سازی شده در اجزای محدود و توزیع PEEQ

^۱ Equivalent Plastic Strain

کامل اثرات تنش سه‌محوره، تمرکز تنش‌ها و رفتار موضعی اجزا را فراهم می‌سازد.

برای شبکه‌بندی مدل، در تیر، ستون و ناحیه فیوز از اندازه تقریبی ۵ میلی‌متر استفاده شد. شبکه فیوز به صورت منظم ایجاد شد و در راستای ضخامت فیوزهای ۱۵ و ۲۰ میلی‌متری، به ترتیب سه و چهار المان در نظر گرفته شد. این آرایش امکان نمایش مناسب تغییرات تنش و کرنش در ناحیه کاهش یافته فیوز را فراهم می‌کند. تحلیل غیرخطی با استفاده از گام تحلیل استاتیکی عمومی^۲ انجام شد و اثرات غیرخطی هندسی با فعال‌سازی گزینه NLGEOM در نظر گرفته شد. حل دستگاه معادلات به روش مستقیم^۳ و با الگوریتم نیوتن کامل^۴ انجام شد. به منظور کنترل ناپایداری‌های عددی، پایداری‌سازی خودکار با ضریب میرایی ۰/۰۰۰۲ اعمال شد. اندازه گام‌های افزایشی تحلیل به صورت خودکار در نظر گرفته شد؛ به طوری که اندازه گام افزایشی اولیه برابر ۰/۰۰۱، حداقل اندازه گام برابر $10^{-1} \times 10^{-1}$ و حداکثر آن برابر ۰/۰۱ تعیین شد. معیارهای همگرایی تحلیل بر اساس تنظیمات پیش فرض Abaqus در نظر گرفته شد. همچنین، نقص اولیه هندسی به صورت صریح در مدل اعمال نشد.

تماس میان سطوح با استفاده از تماس عمومی^۵ تعریف شد. در راستای نرمال، رفتار تماس سخت^۶ در نظر گرفته شد و جدایش سطوح پس از تماس مجاز بود. در راستای مماسی، رفتار اصطکاکی با روش جریمه‌ای^۷ و ضریب اصطکاک ۰/۵ به صورت همسان‌گرد^۸ تعریف شد.

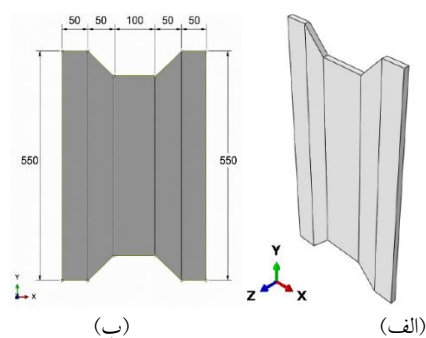
۳-۳- شرایط مرزی

شرایط مرزی اعمال شده در مدل اجزای محدود مطابق با شرایط نصب اتصال تیر به ستون و الزامات آیین‌نامه‌ای برای اتصال ستون درختی در نظر گرفته شد. به منظور شبیه‌سازی نقاط عطف ستون، انتهای پایینی و بالایی ستون به ترتیب با تکیه‌گاه‌های مفصلی^۹ و غلتکی^{۱۰} مقید شدند. علاوه بر این، به منظور جلوگیری از کماتش جانبی تیر، یک مهار جانبی در فاصله ۱۰۰۰ میلی‌متری از انتهای آزاد تیر در نظر گرفته شد. همچنین، دو جفت سخت‌کننده در انتهای تیر تعبیه شدند تا از کماتش موضعی جان

همان‌گونه که در شکل (۵) مشاهده می‌شود، انطباق مناسب بین نتایج دو نمودار بیانگر آن است که مدل‌سازی انجام شده از دقت قابل‌قبولی برخوردار است. از این‌رو، مدل عددی توسعه یافته اعتبار لازم را برای انجام تحلیل‌های پارامتریک و ارزیابی عملکرد لرزه‌ای مدل‌های پیشنهادی دارد.

۳-۲- هندسه مدل

نمای کلی هندسه اتصال پیشنهادی در شکل (۶) نشان داده شده است. هندسه اتصال پیشنهادی به گونه‌ای طراحی شده است که فیوز تعویض‌پذیر با مقطع کاهش یافته و ضخامت‌های ۱۵ و ۲۰ میلی‌متر در ناحیه جان تیر تعبیه شود. مطابق شکل (۶)، با ایجاد ناحیه کاهش یافته در مقطع فیوز، تمرکز تغییرشکل‌های غیرارتجاعی به ناحیه فیوز هدایت می‌شود. در نتیجه، تغییرشکل‌های غیرارتجاعی عمدتاً در ناحیه فیوز متمرکز شده و گسترش آن‌ها به سایر اجزای اتصال محدود می‌شود. همچنین، به منظور محدود کردن ناپایداری خارج از صفحه فیوز، در مدل عددی یک صفحه مهار در مجاورت ناحیه فیوز در نظر گرفته شده است. این جزء با محدود نمودن تغییرشکل خارج از صفحه، از بروز زود هنگام ناپایداری موضعی در ناحیه فیوز جلوگیری می‌کند.



شکل ۶- فیوز تعویض‌پذیر با مقطع کاهش یافته؛ الف) نمای سه‌بعدی، ب) ابعاد هندسی بر حسب میلی‌متر

تعریف هندسه و مدل‌سازی اجزای سازه در محیط نرم‌افزار Abaqus انجام شده است. در پژوهش حاضر، به منظور افزایش دقت نتایج و امکان مدل‌سازی واقع‌گرایانه تر رفتار غیرخطی اجزاء تمامی بخش‌های سازه‌ای به صورت المان‌های سه‌بعدی توپر^۱ از نوع C3D8R، مدل‌سازی شده‌اند. این رویکرد امکان در نظر گرفتن

² Static General

³ Direct

⁴ Full Newton

⁵ General Contact

⁶ Hard Contact

⁷ Penalty

⁸ Isotropic

⁹ Pinned Support

¹⁰ Roller Support

¹ Solid

جدول ۲- داده‌های تنش-کرنش پلاستیک مورد استفاده در مدل عددی

مقطع	تنش پلاستیک (MPa)	کرنش پلاستیک
فیوز	۲۴۰	۰
	۴۰۰	۰/۱۰
	۳۷۰	۰/۲۰
تیر	۳۶۰	۰
	۵۵۰	۰/۱۰
	۵۲۰	۰/۲۰
ستون	۴۵۰	۰
	۶۰۰	۰/۱۰
	۵۷۰	۰/۲۰

رفتار الاستیک تمامی مصالح با مدول الاستیسیته ۲۱۰۰۰۰ مگاپاسکال و ضریب پواسون ۰/۳ تعریف شده است. رفتار پلاستیک مصالح در نرم‌افزار Abaqus بر اساس داده‌های تنش-کرنش پلاستیک و با فرض سخت‌شوندگی همسان‌گرد در نظر گرفته شده است. در مدل عددی حاضر، آسیب و شکست ماده و خستگی کم‌چرخه به‌طور صریح در نظر گرفته نشده‌اند.

۳-۵- مشخصات مدل‌ها و طراحی اجزای اتصال

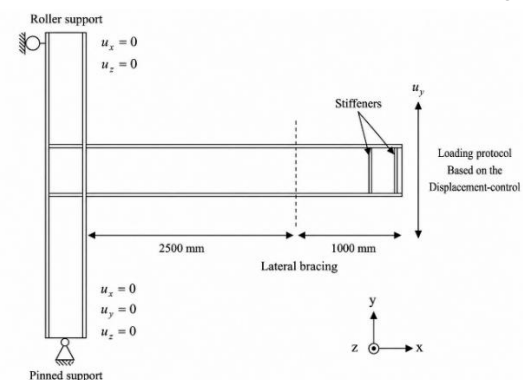
در این پژوهش، ۱۳ مدل با مشخصات ارائه‌شده در جدول (۳) مورد بررسی قرار گرفته است. طول تیر و ارتفاع ستون در تمامی مدل‌ها ثابت در نظر گرفته شده است؛ درحالی‌که طول دستک، ضخامت فیوز و در برخی مدل‌ها ضخامت بال و جان تیر و ستون، تغییر داده شده است. تغییر طول دستک و ضخامت فیوز با هدف بررسی اثر هندسه ناحیه تعویض‌پذیر بر رفتار اتصال، انجام شد. همچنین، تغییر ضخامت بال و جان تیر و ستون به‌منظور ارزیابی اثر تغییر سختی اعضای اصلی بر پاسخ اتصال در نظر گرفته شد. بدین ترتیب، مجموعه مدل‌های مورد بررسی، امکان مقایسه اثر مستقل و هم‌زمان پارامترهای هندسی مختلف بر پاسخ غیرخطی اتصال را فراهم می‌کند.

۴- تحلیل نتایج

۴-۱- توزیع تنش و کرنش پلاستیک

به‌منظور بررسی نحوه توزیع تنش در اتصال پیشنهادی، مدل M5 به‌عنوان نمونه‌ای از مدل‌های مورد بررسی انتخاب شد و کانتور

و بال‌ها و نیز تمرکز تنش در محل اعمال بار جلوگیری شود. شکل (۷) شرایط مرزی مدل اجزای محدود را نشان می‌دهد.



شکل ۷- شرایط مرزی مدل پیشنهادی

به‌منظور شبیه‌سازی پاسخ اتصال تحت بارگذاری رفت‌وبرگشتی، بارگذاری به‌صورت کنترل جابه‌جایی در انتهای تیر و در راستای قائم اعمال شد. تاریخچه بارگذاری چرخه‌ای با استفاده از تابع دامنه جدولی^۱ در نرم‌افزار Abaqus تعریف شد؛ به‌گونه‌ای که دامنه جابه‌جایی در مراحل متوالی به‌صورت رفت‌وبرگشتی افزایش یافت.

۴-۳- تعریف رفتار مصالح

مشخصات مقاومتی فولادهای مورد استفاده برای تیر و ستون در جدول (۱) ارائه شده است. همچنین، رفتار پلاستیک مصالح در مدل عددی بر اساس داده‌های تنش-کرنش پلاستیک واردشده در نرم‌افزار Abaqus برای فیوز، تیر و ستون مطابق جدول (۲) در نظر گرفته شد.

جدول ۱- مشخصات فولادهای مصرفی

مقطع	F_y (MPa)	F_u (MPa)	F_{ye} (MPa)	F_{ue} (MPa)
بال ستون	۳۲۵	۴۹۰	۳۹۸/۴	۵۵۹/۷
جان ستون	۳۲۵	۴۹۰	۴۰۷/۹	۵۷۱/۴
بال تیر	۲۳۵	۴۰۰	۳۳۶/۳	۴۷۰/۵
جان تیر	۲۳۵	۴۰۰	۲۹۲/۳	۴۵۵/۸

^۱ Tabular Amplitude

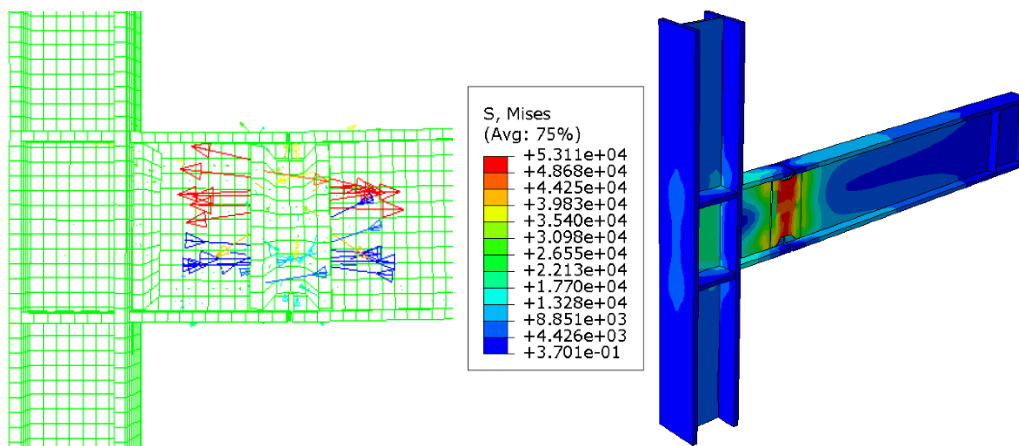
تنش فون‌میسز^۱ آن در آخرین گام بارگذاری استخراج و در شکل (۸) ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مقادیر بالای تنش عمدتاً در ناحیه فیوز و محدوده مجاور آن متمرکز شده، درحالی‌که تنش ایجادشده در تیر و ستون کم‌تر است. این توزیع نشان می‌دهد که به‌کارگیری فیوز پیشنهادی موجب انتقال ناحیه اصلی تمرکز تنش از اجزای اصلی اتصال به بخش تعویض‌پذیر شده است. به‌منظور بررسی سازوکار انتقال نیرو در اتصال پیشنهادی، جهت‌گیری تنش‌های اصلی در ناحیه اتصال مورد بررسی قرار گرفت. مطابق شکل (۹)، الگوی تنش‌های اصلی نشان می‌دهد که نیرو از تیر اصلی به ناحیه فیوز منتقل شده و سپس از طریق دستک به ستون انتقال می‌یابد. تمرکز و جهت‌گیری تنش‌ها در ناحیه فیوز نیز بیانگر نقش این جزء در مسیر انتقال نیرو و مشارکت آن در رفتار غیرارتجاعی اتصال است. این الگو با هدف طراحی اتصال، یعنی هدایت تقاضای غیرالاستیک به ناحیه

فیوز و محدودکردن گسترش آن به اعضای اصلی اتصال، سازگار است. بر این اساس، در مدل عددی حاضر، حذف وصله‌های بال سبب قطع مسیر انتقال نیرو نشده و نیرو همچنان از تیر اصلی به فیوز، سپس دستک و درنهایت ستون منتقل می‌شود. ازسوی دیگر، توزیع تنش فون‌میسز نیز نشان می‌دهد که ناحیه فیوز، ضمن مشارکت در انتقال نیرو، محل اصلی تمرکز تنش اتصال است.

جدول ۳- مشخصات مدل‌های مورد بررسی

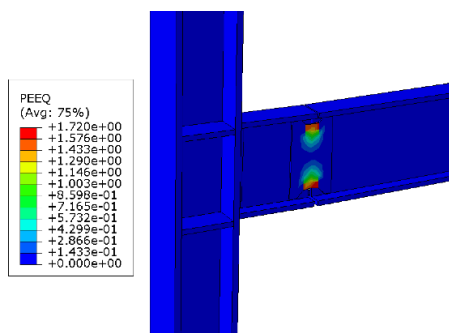
شماره مدل	مقطع تیر H600×200		مقطع ستون H400×400		تعداد فیوز	ضخامت فیوز (mm)	طول دستک (mm)
	t_{bf} (mm)	t_{bw} (mm)	t_{cf} (mm)	t_{cw} (mm)			
M1	۲۰	۱۰	۲۰	۱۵	۲	۱۵	۸۰۰
M2	۲۰	۱۰	۲۰	۱۵	۲	۱۵	۶۰۰
M3	۲۰	۱۰	۲۰	۱۵	۲	۱۵	۴۰۰
M4	۳۵	۲۰	۴۰	۲۵	۲	۱۵	۸۰۰
M5	۳۵	۲۰	۴۰	۲۵	۲	۱۵	۶۰۰
M6	۳۵	۲۰	۴۰	۲۵	۲	۱۵	۴۰۰
M7	۳۵	۲۰	۴۰	۲۵	۲	۲۰	۸۰۰
M8	۳۵	۲۰	۴۰	۲۵	۲	۲۰	۶۰۰
M9	۳۵	۲۰	۴۰	۲۵	۲	۲۰	۴۰۰
M10	۳۵	۲۰	۴۰	۲۵	۲	۱۵	۱۰۰۰
M11	۳۵	۲۰	۴۰	۲۵	۲	۱۵	۱۲۰۰
M12	۳۵	۲۰	۴۰	۲۵	۲	۲۰	۱۰۰۰
M13	۳۵	۲۰	۴۰	۲۵	۲	۲۰	۱۲۰۰

^۱ von-Mises



شکل ۸- کانتور تنش فونمیسز مدل M5 در آخرین گام بارگذاری

شکل ۹- نمایش کیفی مسیر انتقال نیرو و جهت گیری تنش های اصلی



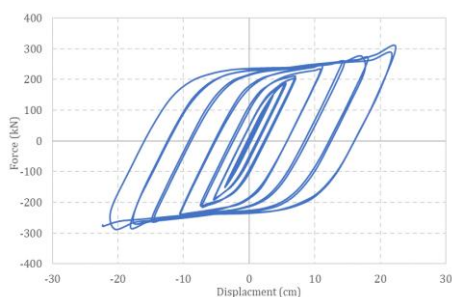
شکل ۱۰- کانتور کرنش پلاستیک معادل فیوز در آخرین گام بارگذاری

برای ارزیابی محل تمرکز تغییرشکل های غیرارتجاعی، کانتور کرنش پلاستیک معادل مدل M5 نیز بررسی شد. مطابق شکل (۱۰)، کرنش های پلاستیک عمدتاً در لبه های بالایی و پایینی فیوز تجمع یافته اند و سایر اجزای اتصال، کرنش پلاستیک بسیار محدودی را تجربه کرده اند. تمرکز کرنش پلاستیک معادل در ناحیه فیوز نشان می دهد که در چارچوب مدل رفتاری به کاررفته، بخش عمده تغییرشکل های غیرارتجاعی در عضو تعویض پذیر متمرکز شده و گسترش تقاضای غیرالاستیک به تیر و ستون محدود شده است.

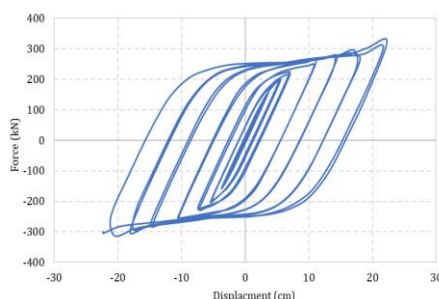
با توجه به این که در مدل عددی حاضر، آسیب، شکست ماده و خستگی کم چرخه به طور صریح مدل نشدند، مقادیر بالای کرنش پلاستیک معادل، از جمله مقداری در حدود ۱/۷۲، صرفاً به عنوان شاخصی از تمرکز تغییرشکل های غیرارتجاعی در ناحیه فیوز تفسیر می شوند. کاهش مقادیر کرنش پلاستیک معادل با فاصله گرفتن از ناحیه فیوز، محدود ماندن بخش عمده تغییرشکل های پلاستیک در محدوده عضو تعویض پذیر و نواحی مجاور آن را نشان می دهد. این رفتار، بیانگر تمرکز تغییرشکل های غیرارتجاعی در عضو تعویض پذیر است و در راستای هدف تعمیرپذیری طرح قرار دارد.

۴-۲- نمودار هیستریزیس

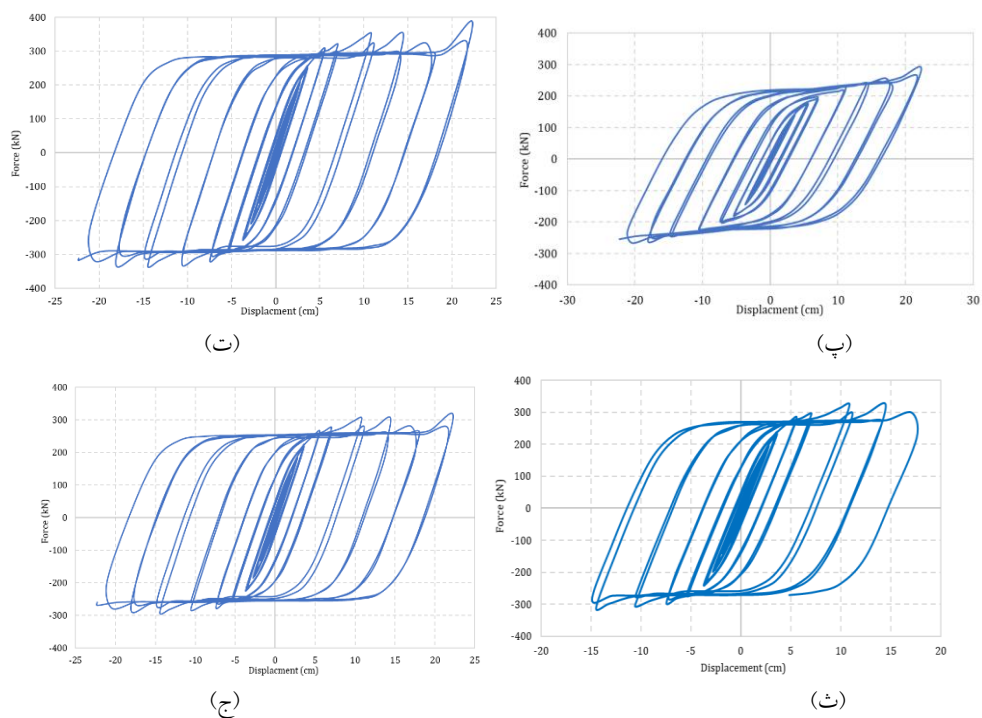
منحنی های هیستریزیس تمامی مدل های مورد بررسی به منظور ارزیابی عملکرد لرزه ای فیوز فولادی استخراج و در شکل (۱۱) ارائه شده است. بررسی منحنی های هیستریزیس نشان می دهد که تمامی مدل ها، رفتار چرخه ای پایداری را تا مراحل پایانی بارگذاری حفظ کرده اند، اما تغییرات ضخامت فیوز، طول دستک و ابعاد تیر و ستون بر رفتار لرزه ای اتصال، شکل حلقه های هیستریزیس و میزان اتلاف انرژی در طول بارگذاری تأثیرگذار بوده است.



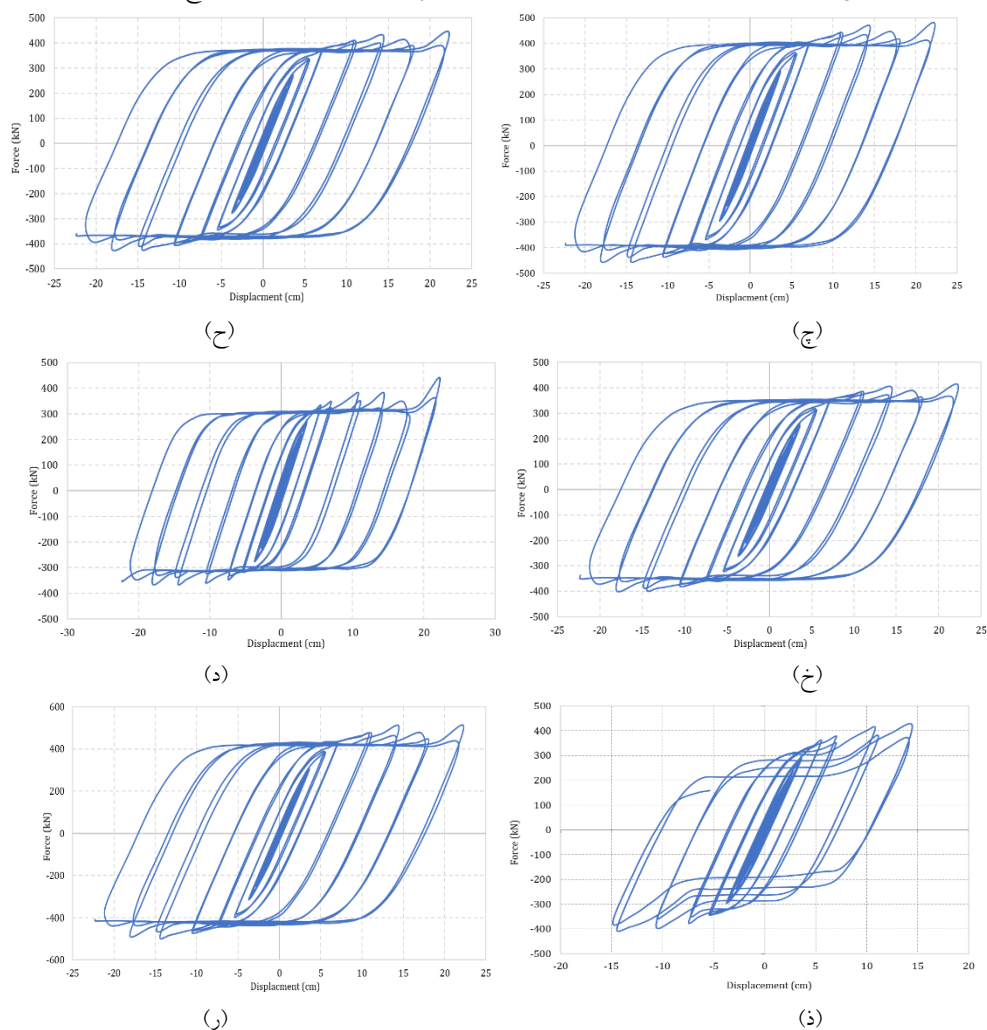
(ب)

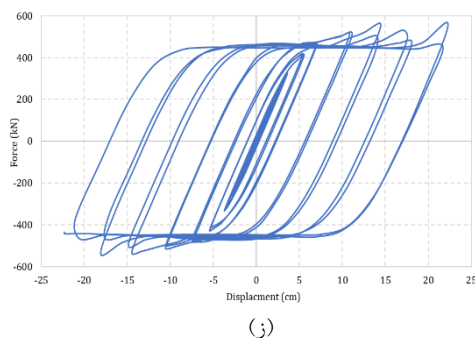


(الف)



شکل ۱۱- منحنی‌های هیستریزیس؛ الف) M1، ب) M2، پ) M3، ت) M4، ث) M5، ج) M6





ادامه شکل ۱۱- منحنی‌های هیستریزیس؛ چ (M7، ح (M8، خ (M9، د (M10، ذ (M11، ر (M12 و ز (M13

در مجموع، مقایسه نتایج مدل‌ها نشان می‌دهد که افزایش ضخامت اعضای اصلی و فیوز، در مقایسه با تغییر طول دستک، تأثیر بیش‌تری بر ظرفیت باربری، ظرفیت اتلاف انرژی و پایداری چرخه‌ای اتصال داشته است.

پرش‌های موضعی مشاهده‌شده در انتهای برخی منحنی‌های هیستریزیس ناشی از رفتار تماسی^۱ تعریف‌شده میان اجزای مجاور فیوز در مدل اجزای محدود است. طی بارگذاری چرخه‌ای و با تغییر جهت بار، تماس میان این اجزا به‌طور متناوب قطع و دوباره برقرار می‌شود. برخورد مجدد قطعات، به‌ویژه در مجاورت بال‌های تیر، موجب تغییر ناگهانی نیروی تماس و سختی لحظه‌ای اتصال شده و به‌صورت پرش‌های موضعی در منحنی‌ها نمایان می‌شود. به‌منظور کاهش پرش‌های موضعی منحنی‌های هیستریزیس، پیشنهاد می‌شود فاصله آزاد میان انتهای تیر و دستک در محدوده فیوز به‌گونه‌ای تعیین شود که از تماس زود هنگام بال‌ها تا رسیدن اتصال به حداکثر دوران، جلوگیری شود. تعیین مقدار بهینه این فاصله، با در نظر گرفتن حداکثر دوران اتصال و عملکرد فیوز، می‌تواند در مطالعات آتی بررسی شود.

۴-۳- نمودار انرژی تجمعی مستهلک شده

افزایش انرژی تجمعی مستهلک‌شده، بیانگر پایداری بیش‌تر حلقه‌های هیستریزیس و ظرفیت بالاتر اتصال در جذب انرژی ورودی زلزله است. از این‌رو مقایسه منحنی‌های انرژی تجمعی، امکان ارزیابی تأثیر تغییرات هندسی و پارامترهای طراحی بر عملکرد لرزه‌ای اتصال را فراهم می‌کند.

۴-۳-۱- بررسی اثر تغییر ابعاد تیر و ستون

شکل (۱۲) منحنی انرژی تجمعی مستهلک‌شده مدل‌های M1 و M4 را نشان می‌دهد. تفاوت این دو مدل تنها در افزایش ضخامت بال و جان تیر و ستون در مدل M4 است؛ به‌گونه‌ای که ضخامت

مدل‌های M1 تا M3، که تنها در طول دستک با یکدیگر تفاوت دارند، رفتار هیستریزیسی تقریباً مشابهی از خود نشان داده و تغییر طول دستک در این محدوده، تأثیر قابل‌توجهی بر شکل و سطح حلقه‌های هیستریزیس نداشته است. مقایسه این مدل‌ها با مدل‌های متناظر M4 تا M6 نشان می‌دهد که افزایش ضخامت تیر و ستون، موجب افزایش مساحت محصور در حلقه‌های هیستریزیس و شیب اولیه منحنی‌ها شده است. همان‌گونه که انتظار می‌رود، این نتایج بیانگر ظرفیت بیش‌تر مدل‌های M4 تا M6 در جذب و اتلاف انرژی و سختی اولیه بیش‌تر اتصال نسبت به مدل‌های M1 تا M3 است.

مقایسه مدل‌های M4 تا M6، با مدل‌های M7 تا M9 نشان می‌دهد که افزایش ضخامت فیوز از ۱۵ به ۲۰ میلی‌متر موجب بزرگ‌تر شدن سطح حلقه‌های هیستریزیس شده است. در نتیجه، میزان اتلاف انرژی با بزرگ‌تر شدن ضخامت فیوز افزایش یافته است.

در مدل‌های M10 تا M13 نیز مشاهده می‌شود که عملکرد چرخه‌ای اتصال به اثر هم‌زمان طول دستک و ضخامت فیوز وابسته است؛ به‌طوری‌که مدل M13 با طول دستک ۱۲۰۰ میلی‌متر و فیوز ۲۰ میلی‌متری گسترده‌ترین و پایدارترین حلقه‌های هیستریزیس را ارائه می‌دهد؛ درحالی‌که مدل M11 با وجود افزایش طول دستک، به‌دلیل استفاده از فیوز با ضخامت ۱۵ میلی‌متر، کم‌ترین ظرفیت جذب انرژی را در میان این چهار مدل نشان می‌دهد. همچنین، وزن دو فیوز به‌کاررفته در مدل M13 با وزن وصله کامل آیین‌نامه‌ای شامل چهار ورق در ناحیه بال و جان تیر مقایسه شد. با وجود افزایش ضخامت فیوز در مدل M13، وزن دو فیوز به‌کاررفته در این مدل همچنان ۶۸ درصد کم‌تر از وزن این چهار ورق است؛ بنابراین، مدل M13 در کنار کاهش قابل‌توجه وزن، عملکرد چرخه‌ای مطلوبی نیز نشان می‌دهد.

^۱ Contact

بال و جان تیر به ترتیب ۷۵ و ۱۰۰ درصد و ضخامت بال و جان ستون به ترتیب ۱۰۰ و حدود ۶۷ درصد افزایش یافته است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، هر دو مدل در سیکل‌های اولیه رفتار تقریباً مشابهی داشته و میزان انرژی مستهلک‌شده در این مرحله ناچیز است. با افزایش دامنه بارگذاری و ورود اتصال به محدوده غیرالاستیک، اختلاف عملکرد دو مدل به تدریج افزایش یافته و منحنی مدل M4 با شیب بیش‌تری نسبت به مدل M1 رشد می‌کند. در انتهای بارگذاری، انرژی تجمعی مستهلک‌شده در مدل M4 به حدود ۱۲۳ کیلوژول می‌رسد؛ درحالی‌که این مقدار برای مدل M1 حدود ۸۴ کیلوژول است؛ بنابراین، افزایش ضخامت بال و جان تیر و ستون موجب افزایش حدود ۴۶ درصدی ظرفیت استهلاک انرژی شده است. این رفتار نشان می‌دهد که افزایش سختی و ظرفیت مقاومتی تیر و ستون موجب پایداری بیش‌تر رفتار هیستریزس در سیکل‌های پایانی و در نتیجه افزایش توان اتصال در جذب و استهلاک انرژی لرزه‌ای شده است.

۴-۳-۲- بررسی اثر تغییر ضخامت فیوز

شکل (۱۳) مقایسه منحنی‌های انرژی تجمعی مستهلک‌شده مدل‌های M4 و M7 را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، هر دو مدل در سیکل‌های اولیه، رفتار تقریباً مشابهی داشته و اختلاف محسوس در میزان انرژی تجمعی مستهلک‌شده مشاهده نمی‌شود. با افزایش دامنه بارگذاری و ورود اتصال به محدوده غیرالاستیک، اختلاف میان دو منحنی به تدریج افزایش یافته و مدل M7 با ضخامت فیوز ۲۰ میلی‌متر در سیکل‌های پایانی انرژی بیش‌تری نسبت به مدل M4 با ضخامت فیوز ۱۵ میلی‌متر مستهلک می‌کند. در پایان بارگذاری، انرژی تجمعی مستهلک‌شده مدل M7 حدود ۱۴۸ کیلوژول و برای مدل M4 حدود ۱۲۳ کیلوژول است که نشان می‌دهد افزایش حدود ۳۳ درصدی ضخامت فیوز، از ۱۵ به ۲۰ میلی‌متر، به افزایش حدود ۲۰ درصدی انرژی تجمعی مستهلک‌شده منجر شده است. این نتیجه بیانگر آن است که افزایش ضخامت فیوز، تأثیر قابل‌توجهی بر ظرفیت اتلاف انرژی اتصال در دامنه‌های بالاتر بارگذاری دارد.

شکل (۱۴) مقایسه منحنی‌های انرژی تجمعی مستهلک‌شده مدل‌های M1 و M7 را نشان می‌دهد. در این دو مدل، علاوه بر افزایش ضخامت فیوز از ۱۵ به ۲۰ میلی‌متر، ابعاد و ضخامت تیر و ستون نیز در مدل M7 افزایش یافته است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، هر دو مدل در سیکل‌های اولیه، رفتار تقریباً مشابهی دارند، اما با افزایش دامنه بارگذاری و ورود اتصال به محدوده غیرالاستیک، اختلاف میان دو منحنی به تدریج افزایش می‌یابد. در

انتهای بارگذاری، انرژی تجمعی مستهلک‌شده در مدل M7 حدود ۱۴۸ کیلوژول و در مدل M1 حدود ۸۴ کیلوژول بوده است که نشان‌دهنده افزایش ۷۶ درصدی ظرفیت استهلاک انرژی در مدل M7 است. بنابراین، افزایش ۷۶ درصدی ظرفیت اتلاف انرژی را می‌توان حاصل اثر هم‌زمان افزایش ضخامت فیوز و ابعاد اعضای اصلی دانست.

۴-۳-۳- بررسی اثر تغییر طول دستک

در شکل (۱۵)، منحنی‌های انرژی تجمعی مستهلک‌شده مدل‌های M1 تا M3 با طول دستک‌های ۸۰۰، ۶۰۰ و ۴۰۰ میلی‌متر، به‌منظور بررسی تأثیر طول دستک بر عملکرد لرزه‌ای اتصال مقایسه شده‌اند. از آن‌جاکه سایر پارامترهای هندسی و مشخصات مصالح در این سه مدل ثابت هستند، تفاوت عملکرد مشاهده‌شده را می‌توان به تغییر طول دستک نسبت داد.

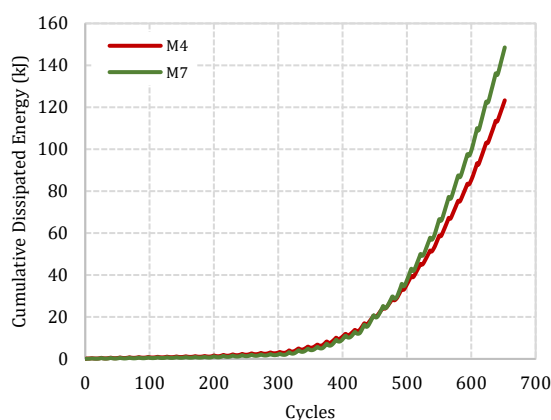
همان‌گونه که مشاهده می‌شود، منحنی‌های سه مدل در بخش عمده‌ای از تاریخچه بارگذاری به یکدیگر نزدیک هستند؛ باین‌حال، با افزایش طول دستک، افزایش نسبی در انرژی تجمعی مستهلک‌شده مشاهده می‌شود. این روند را می‌توان با کاهش نیروی برشی ناشی از افزایش طول دستک مرتبط دانست؛ به‌گونه‌ای‌که برای مقدار مشخصی از لنگر، افزایش طول دستک با کاهش نیروی برشی همراه است و می‌تواند شرایط مناسب‌تری برای توسعه تغییرشکل‌های چرخه‌ای در اتصال فراهم کند. در نتیجه، افزایش طول دستک در محدوده مورد بررسی، اگرچه اثر آن نسبت به سایر پارامترها محدودتر است، با افزایش تدریجی ظرفیت اتلاف انرژی اتصال همراه بوده است.

به‌منظور بررسی عملکرد اتصال در طول‌های بزرگ‌تر دستک، منحنی‌های انرژی تجمعی مستهلک‌شده مدل‌های M12 و M13 با طول دستک‌های به ترتیب ۱۰۰۰ و ۱۲۰۰ میلی‌متر در شکل (۱۶) مقایسه شده‌اند. از آن‌جاکه سایر پارامترهای هندسی و مشخصات مصالح در این دو مدل ثابت هستند، این مقایسه امکان ارزیابی مستقیم اثر افزایش طول دستک از ۱۰۰۰ به ۱۲۰۰ میلی‌متر را فراهم می‌کند. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، انرژی تجمعی مستهلک‌شده نهایی مدل‌های M12 و M13 به ترتیب حدود ۱۵۷ و ۱۶۴ کیلوژول است. بنابراین، افزایش ۲۰ درصدی طول دستک موجب افزایش حدود ۴/۵ درصدی انرژی تجمعی مستهلک‌شده شده است. نزدیک‌بودن منحنی‌ها نشان می‌دهد که افزایش طول دستک در این محدوده، تأثیر مثبت اما محدودی بر ظرفیت اتلاف انرژی اتصال دارد. در میان مدل‌های مورد بررسی، مدل M13 به‌دلیل برخورداری از تیر و ستون با ضخامت بیش‌تر، فیوز ۲۰

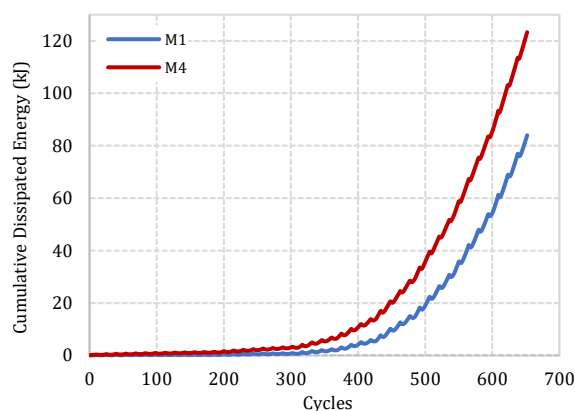
۴-۴- بررسی سختی اتصال

به منظور ارزیابی سختی دورانی اولیه اتصالات، سختی دورانی اولیه به صورت شیب بخش خطی اولیه منحنی لنگر-دوران تعریف شد و مقدار آن برای هر مدل از نتایج تحلیل اجزای محدود استخراج شد. سپس مقادیر به دست آمده بر اساس ضوابط مبحث دهم مقررات ملی ساختمان ایران (ویرایش پنجم) [۲۵] مورد ارزیابی قرار گرفت تا نوع عملکرد اتصال از نظر صلبیت تعیین شود. مقایسه مقادیر سختی دورانی اولیه مدل‌ها با حدود مرجع این طبقه‌بندی در شکل (۱۷) ارائه شده است.

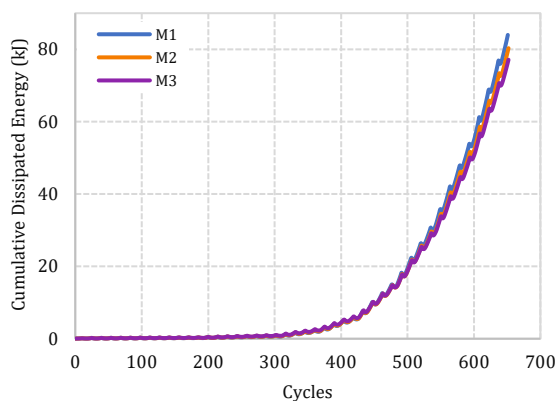
میلی متری و دستک بلندتر، مطلوب‌ترین عملکرد لرزه‌ای را از نظر ظرفیت اتلاف انرژی، حفظ سختی و پایداری چرخه‌ای نشان داد. در مقابل، مدل M3 به دلیل استفاده از اعضای اصلی با ضخامت کمتر، فیوز ۱۵ میلی متری و کوتاه‌ترین دستک، کم‌ترین میزان اتلاف انرژی را در میان مدل‌های مورد مقایسه نشان داد. به طور کلی، نتایج مقایسه مدل‌ها نشان داد که افزایش ابعاد تیر و ستون و همچنین افزایش ضخامت فیوز، نقش مؤثرتری در افزایش ظرفیت اتلاف انرژی اتصال داشته است؛ در حالی که اثر تغییر طول دستک در مقایسه با این پارامترها محدودتر بوده است. این یافته‌ها می‌تواند مبنایی برای انتخاب مؤثرتر پارامترهای هندسی و دست‌یابی به تعادل مناسب میان ظرفیت اتلاف انرژی و ابعاد اجزای اتصال باشد.



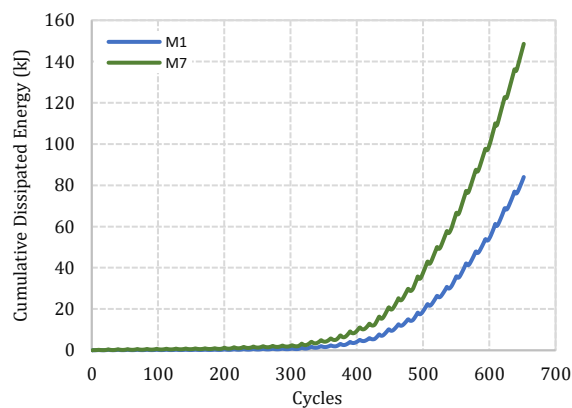
شکل ۱۳- مقایسه انرژی تجمعی مستهلک‌شده مدل‌های M4 و M7



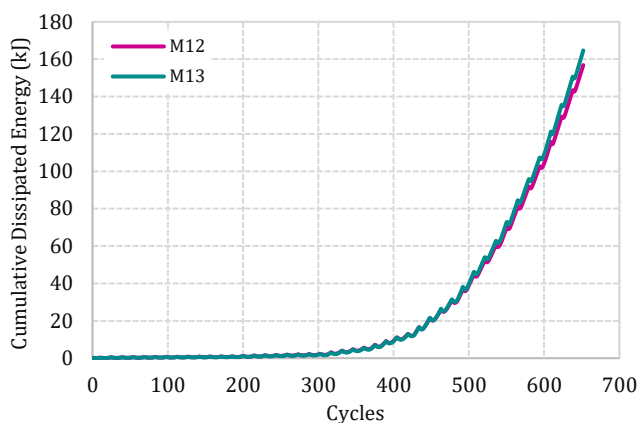
شکل ۱۲- مقایسه انرژی تجمعی مستهلک‌شده مدل‌های M1 و M4



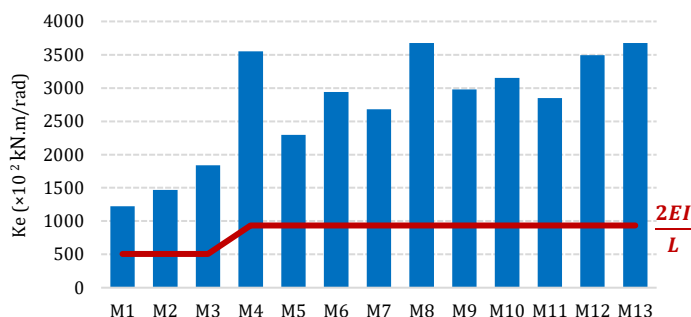
شکل ۱۵- مقایسه انرژی تجمعی مستهلک‌شده مدل‌های M1، M2 و M3



شکل ۱۴- مقایسه انرژی تجمعی مستهلک‌شده مدل‌های M1 و M7



شکل ۱۶- مقایسه انرژی تجمعی مستهلک‌شده مدل‌های M12 و M13



شکل ۱۷- مقایسه سختی دورانی اولیه مدل‌های عددی با معیار صلبیت اتصالات بر اساس توصیه‌های مبحث دهم مقررات ملی ساختمان [۲۵]

به‌عنوان نمونه، سختی دورانی مدل M4 در مقایسه با M1 حدود سه برابر شده است که می‌توان آن را به افزایش هم‌زمان ضخامت بال و جان تیر و ستون و در نتیجه افزایش سختی خمشی اعضای مجاور اتصال نسبت داد.

قرارگیری اتصالات مورد بررسی در محدوده نیمه‌گیردار را می‌توان ناشی از حضور فیوز قابل تعویض در ناحیه اتصال دانست؛ این فیوز با کاهش موضعی سختی، امکان تمرکز تغییرشکل‌های غیرالاستیک و جذب انرژی لرزه‌ای را در عضو فیوز فراهم می‌کند. از این‌رو، کاهش نسبی سختی دورانی اتصال را می‌توان در چارچوب فلسفه طراحی لرزه‌ای این سیستم ارزیابی نمود؛ به‌گونه‌ای که آسیب به‌صورت کنترل‌شده در عضو قابل تعویض متمرکز شده و از آسیب به اعضای اصلی سازه جلوگیری می‌شود. باین‌حال، در کاربردهای سازه‌ای که افزایش سختی جانبی قاب و کاهش تغییرمکان نسبی طبقات حائز اهمیت است، می‌توان از راهکارهایی برای افزایش سختی دورانی اتصال بهره گرفت. ازجمله این راهکارها می‌توان به افزایش ابعاد تیر، استفاده از سیستم‌های دوگانه شامل قاب خمشی و مهاربند همگرا یا کماتش‌تاب (BRB)^۱ قابل تعویض، استفاده از اتصال زانویی،

بر اساس ضوابط مبحث دهم مقررات ملی ساختمان ایران، اتصالات فولادی از نظر سختی دورانی به سه گروه مفصلی، نیمه‌گیردار و گیردار تقسیم می‌شوند. در این طبقه‌بندی، اتصالاتی که سختی دورانی آن‌ها کمتر از $\frac{2EI}{L}$ باشد، در گروه اتصالات مفصلی قرار می‌گیرند. اتصالاتی که سختی دورانی آن‌ها در بازه $\frac{2EI}{L}$ تا $\frac{20EI}{L}$ قرار گیرد، در رده اتصالات نیمه‌گیردار طبقه‌بندی می‌شوند؛ درحالی‌که اتصالات با سختی بیش از $\frac{20EI}{L}$ به‌عنوان اتصالات گیردار شناخته می‌شوند.

در شکل (۱۷) حد پایین محدوده اتصالات نیمه‌گیردار با رنگ قرمز مشخص شده است. از آن‌جاکه مدل‌های مورد بررسی در دو گروه با مقاطع تیر متفاوت طراحی شده‌اند، مقدار $\frac{2EI}{L}$ برای این دو گروه یکسان نبوده و به همین دلیل خط مرجع به‌صورت شکسته نمایش داده شده است. نتایج نشان داد که سختی دورانی تمامی مدل‌های پیشنهادی در محدوده $\frac{2EI}{L}$ تا $\frac{20EI}{L}$ قرار دارد؛ از این‌رو، تمامی اتصالات مورد بررسی در رده اتصالات نیمه‌گیردار قرار می‌گیرند.

نتایج شکل (۱۷) همچنین نشان می‌دهد که تغییر پارامترهای هندسی مدل‌ها، تأثیر محسوسی بر سختی دورانی اولیه اتصال دارد.

^۱ Buckling-Restrained Brace

به کارگیری تیرهای مختلط با مشارکت دال بتنی و برش گیرها به منظور افزایش سختی خمشی تیر و نیز بهینه سازی ابعاد و مشخصات هندسی فیوز برشی قابل تعویض اشاره کرد.

۵- نتیجه گیری

در این پژوهش، ایده استفاده از یک فیوز برشی تعویض پذیر در جان تیر یک قاب خمشی فولادی با اتصال ستون درختی و تأثیر آن بر عملکرد لرزه ای اتصال مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور، ۱۳ مدل با هندسه مشابه و با اعمال تغییرات در پارامترهای هندسی شامل ابعاد تیر و ستون، ضخامت فیوز و طول دستک، مورد تحلیل قرار گرفتند. بر اساس نتایج تحلیل اجزای محدود و ارزیابی عملکرد لرزه ای اتصال پیشنهادی، مهم ترین نتایج این پژوهش به شرح زیر است:

۱- تمامی مدل های مورد بررسی، رفتار هیستریزیسی پایدار و مناسبی تحت بارگذاری چرخه ای از خود نشان دادند و تا انتهای پروتکل بارگذاری، افت ناگهانی مقاومت یا ناپایداری قابل توجهی مشاهده نشد که بیانگر عملکرد لرزه ای مناسب اتصال پیشنهادی است.

۲- افزایش ضخامت بال و جان تیر به ترتیب به میزان ۷۵ و ۱۰۰ درصد و ضخامت بال و جان ستون به ترتیب به میزان ۱۰۰ و حدود ۶۷ درصد، موجب افزایش سختی اولیه، ظرفیت باربری و ظرفیت استهلاک انرژی اتصال شد؛ به گونه ای که انرژی تجمعی مستهلک شده مدل M4 نسبت به مدل M1 حدود ۴۶ درصد افزایش یافت.

۳- با افزایش حدود ۳۳ درصدی ضخامت فیوز، از ۱۵ به ۲۰ میلی متر، سطح محصور حلقه های هیستریزیس و پایداری چرخه ای اتصال افزایش یافت و در نتیجه، انرژی تجمعی مستهلک شده مدل M7 نسبت به مدل M4 حدود ۲۰ درصد بیش تر شد.

۴- اعمال هم زمان افزایش ضخامت بال و جان تیر و ستون و افزایش ضخامت فیوز، بیش ترین تأثیر را بر بهبود عملکرد لرزه ای اتصال داشت؛ به طوری که ضمن جبران بخشی از کاهش سختی ناشی از تعبیه ناحیه کاهش یافته در فیوز، انرژی تجمعی مستهلک شده مدل M7 نسبت به مدل M1 حدود ۷۶ درصد افزایش یافت.

۵- افزایش طول دستک در محدوده مورد بررسی، با افزایش نسبی ظرفیت اتلاف انرژی همراه بود؛ با این حال، اثر آن در مقایسه با افزایش ضخامت تیر و ستون و ضخامت فیوز محدود تر بود.

۶- ارزیابی سختی دورانی اولیه نشان داد که تمامی مدل های پیشنهادی بر اساس ضوابط مبحث دهم مقررات ملی ساختمان ایران در محدوده اتصالات نیمه گیردار قرار می گیرند. همچنین افزایش ضخامت بال و جان تیر و ستون، تأثیر محسوسی بر سختی اتصال داشت؛ به طوری که سختی دورانی مدل M4 نسبت به مدل M1 حدود سه برابر شد. با وجود افزایش سختی در مدل های دارای مقاطع ضخیم تر، تمرکز تغییر شکل های غیرالاستیک همچنان در فیوز قابل تعویض مشاهده شد و آسیب عمدتاً در این ناحیه متمرکز ماند. این رفتار با هدف طراحی اتصال پیشنهادی در محدود نمودن آسیب به اعضای اصلی و فراهم کردن امکان تعویض عضو آسیب دیده هم خوانی دارد.

۷- در مجموع، مدل M13 مطلوب ترین و مدل M3 ضعیف ترین عملکرد لرزه ای را در میان مدل های مورد بررسی از خود نشان دادند.

در مجموع، نتایج این پژوهش نشان داد که افزایش ضخامت تیر و ستون و افزایش ضخامت فیوز، مؤثرترین پارامترها در بهبود عملکرد لرزه ای اتصال پیشنهادی هستند؛ در حالی که تغییر طول دستک تأثیر محدودتری بر شاخص های عملکردی دارد. تمرکز آسیب در فیوز قابل تعویض، همراه با ظرفیت مناسب اتلاف انرژی، پایداری چرخه ای مطلوب و سختی دورانی قابل قبول، نشان می دهد که اتصال پیشنهادی می تواند گزینه ای مناسب برای قاب های فولادی با قابلیت تعمیر پذیری پس از زلزله باشد.

انجام مطالعات تکمیلی با هدف افزایش سختی اتصال می تواند دامنه کاربرد این سیستم را در سازه های فولادی گسترش دهد. همچنین، بررسی اشکال هندسی متفاوت برای عضو فیوز و تعیین فاصله آزاد مناسب میان انتهای تیر و دستک، به منظور کاهش تماس زود هنگام اجزا در حین بارگذاری چرخه ای، می تواند در مطالعات آینده مورد توجه قرار گیرد. این بررسی ها امکان ارزیابی و مقایسه عملکرد طرح های مختلف از نظر شکل پذیری، ظرفیت اتلاف انرژی، پایداری چرخه ای و سایر پارامترهای لرزه ای را فراهم می کند.

- Replaceable Cover Plates", *Advances in Structural Engineering*, 22(5), pp.1161-1174.
- [14] Jiang, Z.Q., Yang, X.-F., Dou, C., Li, C., and Zhang, A.L. (2019), "Cyclic Testing of Replaceable Damper: Earthquake-Resilient Prefabricated Column-Flange Beam-Column Joint", *Engineering Structures*, 183, pp.922-936.
- [15] Özkılıç, Y.O. (2020), "A New Replaceable Fuse for Moment-Resisting Frames: Replaceable Bolted Reduced Beam Section Connections", *Steel & Composite Structures*, 35(3), pp.353-370.
- [16] Vajdian, M., Parvari, A., and Afzali, M. (2020), "Improvement of Seismic Performance of Beam-Column Connection with Replaceable Drilled Attachment Parts", *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 64(4), pp.1202-1218.
- [17] Karami, B., and Hosseini Hashemi, B. (2021), "Effect of Bolted Splice Design Method on the Seismic Performance and Prequalification of Column-Tree Connections", *Journal of Earthquake Science & Engineering*, 8(3), pp.33-56. (In Persian)
- [18] Feng, Y., Wei, M., Chong, X., Jiang, Q., and Zhu, Y. (2022), "Design and Numerical Analysis of Steel Frame Joints with Replaceable Buckling-Restrained Links", *Journal of Constructional Steel Research*, 196, p.107415.
- [19] Chen, P., Pan, J., Hu, F., and Wang, Z. (2022), "Experimental Investigation on Earthquake-Resilient Steel Beam-to-Column Joints with Replaceable Buckling-Restrained Fuses", *Journal of Constructional Steel Research*, 196, p.107413.
- [20] Richards, P.W., and Lee, H. (2023), "Experimental and Analytical Performance of Replaceable Shear Fuse Connections for Heavy Beams", *Journal of Constructional Steel Research*, 208, p.108028.
- [21] ANSI/AISC 358-22, (2022), *Prequalified Connections for Special and Intermediate Steel Moment Frames for Seismic Applications*, American Institute of Steel Construction.
- [22] Feng, Y., Wen, H., Chong, X., Jiang, Q., Zhang, Z., and Wei, M. (2023), "Experimental Study on a Single-Sided Column-Tree Connection with a Replaceable Buckling-Restrained Cover Plate at a Bottom Flange", *Journal of Structural Engineering*, 149(11), p.04023155.
- [23] Fanaie, N., Mohammadzade, B., Gharebaghi, S.A., and Sarkhosh, O.S. (2024), "Design Procedure of a Shear Fuse System for Steel Moment-Resisting Frames", *Structures*, 63, p.106473.
- [24] Matthews, P., Nuñez-Castellanos, E., Sanhueza, F., Mata, R., Chávez-Delgado, M., and Bustamante, G. (2025), "Experimental Study on Cyclic Behavior of Modified Column-Tree Connections Using Weakening Strategies", SSRN. (Preprint).
- [25] Iran National Building Regulations, Part 10, (2022), *Design and Construction of Steel Buildings*, Ministry of Roads and Urban Development.
- [1] Horton, T.A., Hajirasouliha, I., Davison, B., and Ozdemir, Z. (2021), "More Efficient Design of Reduced Beam Sections (RBS) for Maximum Seismic Performance", *Journal of Constructional Steel Research*, 183, p.106728.
- [2] Nadi, A., Saleh, A., and Ayazi, A. (2023), "Low-Cycle Fatigue Analysis of a New Type of Reduced-Beam-Section Connection", *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Structures & Buildings*, 176(4), pp.257-271.
- [3] Karami, B., Hosseini Hashemi, B., Ramhormozian, S., and Zarabimanes, Y. (2022), "Numerical Study on Prequalification and Cyclic Performance of Column-Tree Connections", *Structures*, 41, pp.331-348.
- [4] Chen, P., Pan, J., Hu, F., and Wang, Z. (2022), "Numerical Investigation on Seismic Resilient Steel Beam-to-Column Connections with Replaceable Buckling-Restrained Fuses", *Journal of Constructional Steel Research*, 199, p.107598.
- [5] Wang, M., and Ke, X. (2020), "Seismic Design of Widening Flange Connection with Fuses Based on Energy Dissipation", *Journal of Constructional Steel Research*, 170, p.106076.
- [6] Wang, M., and Bi, P. (2019), "Study on Seismic Behavior and Design Method of Dissipative Bolted Joint for Steel Frame with Replaceable Low Yield Point Steel Connected Components", *Construction & Building Materials*, 198, pp.677-695.
- [7] ANSI/AISC 341-22, (2022), *Seismic Provisions for Structural Steel Buildings*, American Institute of Steel Construction.
- [8] Herrera, R., Salas, C., Beltran, J.F., and Nuñez, E. (2017), "Experimental Performance of Double Built-Up T Moment Connections under Cyclic Loading", *Journal of Constructional Steel Research*, 138, pp.742-749.
- [9] ANSI/AISC 358-16, (2016), *Prequalified Connections for Special and Intermediate Steel Moment Frames for Seismic Applications*, American Institute of Steel Construction.
- [10] Kishiki, S., Yamada, S., Suzuki, K., Saeki, E., and Wada, A. (2006), "New Ductile Moment-Resisting Connections Limiting Damage to Specific Elements at the Bottom Flange", *Proceedings of the 8th U.S. National Conference on Earthquake Engineering*, San Francisco, California, USA, pp.6649-6657.
- [11] Latour, M., and Rizzano, G. (2015), "Design of X-Shaped Double Split Tee Joints Accounting for Moment-Shear Interaction", *Journal of Constructional Steel Research*, 104, pp.115-126.
- [12] Garoosi, A.R.M., TahamouliRoudsari, M., and Hosseini Hashemi, B. (2018), "Experimental Evaluation of Rigid Connection with Reduced Section and Replaceable Fuse", *Structures*, 16, pp.390-404.
- [13] Jiang, Z.Q., Yang, X.F., Dou, C., Li, S.H., and Zhang, A.L. (2019), "Seismic Performance of Prefabricated Corrugated Web Beam-Column Joint with