

Research Article

Numerical Investigation of the Cyclic Behavior of a Replaceable Fixed Connection Equipped with a Pseudo-Gutter Fuse

Masroor Malikyar¹, Payam Tarighi^{2*}, Mehdi Shalchi Toosi²

1-Master's Student, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering and Technology, Ahlul Bayt International University, Tehran, Iran

2-Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering and Technology, Ahlul Bayt International University, Tehran, Iran



Citation: Malikyar, M., Tarighi, P., and Shalchi Tousi, M. (2026), "Numerical Investigation of the Cyclic Behavior of a Replaceable Fixed Connection Equipped with a Pseudo-Futter Fuse", *Journal of Steel & Structures*, 20(53), pp.79-105. (In Persian)

doi <https://doi.org/10.22034/jss.2026.597738.1054>

Article info:

Article History:

Received: 5 March 2026

Revised: 7 July 2026

Accepted: 15 July 2026

Published: 23 September 2026

Keywords:

Clamped Connection
Repairable Connection
Cyclic Loading
Steel Structures
Bending Frame

ABSTRACT

Background: The poor performance of steel flexural joints in past earthquakes and the high costs of repair and reconstruction have highlighted the need to develop joints that can concentrate the damage in a replaceable member and prevent damage to the beam and column. Therefore, the present study aimed to evaluate the seismic performance of a steel flexural joint equipped with a gutter fuse.

Methods: Nonlinear numerical analyses under cyclic loading were performed in Abaqus software. In addition to the base model (P20), the effect of the fuse flexural capacity, beam flange and web thickness, column connection and double plates, and the distance between the two free edges of the beam were investigated parametrically. The evaluation criteria included equivalent plastic strain (PEEQ), flexural capacity, energy absorption, stiffness, ductility, and hysteresis curves.

Results: The results showed that in the P20 model, the plastic hinge was completely formed in the gutter fuse and the beam and column remained in the elastic range; in such a way that the connection provided about 98% of the plastic capacity of the beam. Reducing the thickness of the beam flange or web caused damage to be transferred to the main members and decreased performance, while observing the capacity-based design ensured the concentration of inelastic deformations in the fuse. Also, the simultaneous removal of the continuous and double plates reduced the energy absorption and bending capacity of the connection by 45.56 and 42.82%, respectively. Increasing the distance between the two free edges of the beam to 60 mm also created a suitable balance between strength, ductility and energy absorption while maintaining the concentration of plastic strain in the fuse.

Conclusion: The findings of this study showed that the proposed connection equipped with a gutter fuse, if observing the capacity-based design and using appropriate reinforcement plates, has desirable seismic performance, high interchangeability and appropriate capacity to reduce damage and repair costs after an earthquake, and can be used as an efficient option in the design of steel bending frames.

* Corresponding Author's E-mail: p.tarighi@abu.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 in steel frames are among the most important structural components affecting the lateral stiffness, load-bearing capacity, ductility, and seismic performance of the structure.

The experience of the Northridge earthquake and the occurrence of brittle failures in conventional connections revealed the necessity of developing connection details with the ability to control the location of plastic hinge formation, increase energy absorption capacity, and reduce damage to the main members. In this regard, in recent years, numerous studies have focused on the development of replaceable connections equipped with structural fuses. The results of these studies show that the use of replaceable components, while concentrating inelastic deformations in the fuse area, improves ductility, increases energy dissipation, reduces repair costs, and accelerates the return of the structure to service after an earthquake. Despite these advances, a review of the literature shows that the cyclic behavior, stress distribution, and energy absorption capacity of fixed connections equipped with fuses with a quasi-gutter geometry have not yet been comprehensively evaluated. Therefore, the present study aims to numerically evaluate the seismic behavior of a steel clamped connection equipped with a replaceable gutter fuse. In this study, several specimens were modeled using Abaqus finite element software and their performance in terms of load-bearing capacity, ductility, energy absorption, and stress distribution was investigated, and the compliance of the results with the code requirements was evaluated. The innovation of this study is in presenting and evaluating the gutter fuse as a replaceable member for damage control and improving the seismic performance of steel clamped connections.

Methods

In this study, in order to evaluate the performance of the proposed connection, a numerical analysis method based on ABAQUS software was used. To validate the numerical model, its results were compared with the laboratory and numerical study of Tarighi et al. (1402) who investigated the clamped connection with a fuse plate. All connection components were modeled with solid eight-node elements. The full penetration groove weld areas were modeled as continuous bodies and the contact between the surfaces was defined with the Hard Contact model and a friction coefficient of 0.30. Also, the prestressing of the bolts was applied through the Bolt Load feature. The behavior of the steel materials was considered in the model based on mechanical properties including modulus of elasticity, Poisson's ratio, yield stress and ultimate strength, and assuming elastoplastic behavior. Cyclic loading was performed according to the FEMA 350 protocol. The load was applied at the end of the beam and the analysis continued up to a drift of 0.08 radian. The ends of the columns were idealized as hinged supports. In the connection design, the dimensions of the gutter fuse were determined based on the code requirements and by observing the minimum bolt hole spacing and their distance from the edge of the member. The distance between the two beam sections was considered to be 20 mm and the strong column-weak beam condition was controlled according to the requirements of AISC 358-16 in all specimens. The analysis approach focused on investigating the cyclic response of the connection, including the bearing capacity, stiffness, stress distribution, yield zone and deformation behavior of the connection under reciprocating loading. The validity of the model was also confirmed by comparing the numerical results with reference laboratory data.

Results

The results of numerical analyses showed that the proposed connection with the gutter fuse well realized the designed mechanism and concentrated the plastic hinge completely in the fuse; as a result, the beam and column remained in the elastic range and the interchangeability of the connection was maintained after the earthquake. The P20 base specimen showed the best performance in terms of flexural capacity, ductility, and energy dissipation by providing about 98% of the beam's plastic capacity, negligible strength loss, and stable hysteresis behavior. The results of parametric studies also indicated that observing the capacity-based design principle and selecting the appropriate thickness of the beam flange and web are the main conditions for directing inelastic deformations to the fuse; in such a way that reducing the flange thickness caused the formation of a plastic hinge in the beam, reducing the flexural capacity, and losing the interchangeability of the connection, while increasing the web thickness improved the stability and flexural performance of the connection by reducing local distortion. Also, the use of continuous plates and double column web plates played an effective role in increasing local stiffness, controlling stress concentration, improving flexural capacity and energy absorption, and their simultaneous removal led to the transfer of plastic hinge to the column, reducing flexural capacity by about 43% and energy absorption by 46%. In addition, the study of the distance between the two free edges of the beam showed that although this parameter affects flexural capacity and energy absorption, in all the models studied, the plastic strain concentration in the fuse was maintained. Overall, the results indicate that the proposed connection is an efficient option for improving the seismic performance of steel flexural frames by providing resistance.

Conclusion

The results of this study showed that the steel flexural connection equipped with a gutter fuse, by observing the principles of capacity-based design, is able to effectively transfer the failure mechanism to the fuse and keep the beam and column within the elastic range. In the baseline model (P20), the formation of a plastic hinge was confirmed only in the fuse and the connection provided the desired plastic capacity of the beam, which indicates the desired seismic performance and proper interchangeability of the connection. The results of parametric studies showed that reducing the thickness of the beam flange and web leads to the transfer of plastic strain to the main members, increasing local distortion and reducing the flexural capacity, while observing the permissible width-to-thickness ratios according to the regulatory requirements ensures the concentration of inelastic deformations in the fuse and the stability of the connection. Also, the simultaneous use of continuous and double plates and energy absorption; In such a way that their simultaneous removal caused a 45.58% reduction in energy absorption and 42.82% in bending capacity compared to the baseline model. The investigation of the distance between the two free edges of the beam also showed that increasing this distance to 60 mm, while maintaining the concentration of plastic strain in the fuse, creates a good balance between strength, ductility and energy absorption. Therefore, the proposed connection can be used as a suitable option for interchangeable bending connections in earthquake-resistant steel bending frames. One of the limitations of this research is its reliance on numerical analysis; therefore, it is recommended to conduct laboratory studies and investigate the performance of the connection under various seismic records and geometric conditions to complete and generalize the results.

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

The authors of this article state that no generative artificial intelligence or AI-based technologies were used in any stage of the preparation of this manuscript.

Ethical Consideration

Compliance with ethical guidelines

The authors have avoided any fabrication of data, forgery, plagiarism, and all forms of unethical and improper behavior in research.

Funding

This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Author's contributions

All authors contributed significantly to the formulation of the research idea, of the research method, structural modeling, numerical analysis, validation of results, interpretation of findings, writing the article, critical review of scientific content, and approval of the final version submitted for publication.

Conflicts of interest

The authors declare that they have no conflicts of interest in connection with the publication of this article.

Acknowledgments

I hereby express my sincere gratitude and appreciation to Dr. Payam Tariqi and Dr. Mehdi Shalchi Toosi for their invaluable guidance, scientific support, and unwavering support throughout all stages of this research.

بررسی عددی رفتار چرخه‌ای اتصال گیردار با قابلیت تعویض پذیری مجهز به فیوز شبه‌ناودانی

مسرور ملکیار^۱، پیام طریقی^{۲*}، مهدی شالچی طوسی^۲

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین‌المللی اهل بیت (ع)، تهران، ایران

۲- استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین‌المللی اهل بیت (ع)، تهران، ایران



Citation: Malikiyar, M., Tarighi, P., and Shalchi Tousi, M. (2026), "Numerical Investigation of the Cyclic Behavior of a Replaceable Fixed Connection Equipped with a Pseudo-Futter Fuse", *Journal of Steel & Structures*, 20(53), pp.79-105. (In Persian)

doi <https://doi.org/10.22034/jss.2026.597738.1054>

چکیده

زمینه پژوهش: عملکرد نامطلوب اتصالات خمشی فولادی در زمین‌لرزه‌های گذشته و هزینه‌های بالای تعمیر و بازسازی، ضرورت توسعه اتصالاتی را آشکار ساخته است که بتوانند آسیب را در یک عضو قابل تعویض، متمرکز کرده و از صدمه دیدن تیر و ستون جلوگیری کنند. از این رو، پژوهش حاضر با هدف ارزیابی عملکرد لرزه‌ای یک اتصال خمشی فولادی مجهز به فیوز شبه‌ناودانی انجام شد.

روش پژوهش: تحلیل‌های عددی غیرخطی تحت بارگذاری چرخه‌ای در نرم‌افزار Abaqus انجام شد. افزون بر مدل مینا (P20)، اثر ظرفیت خمشی فیوز، ضخامت بال و جان تیر، ورق‌های پیوستگی و مضاعف ستون و فاصله بین دو لبه آزاد تیر به صورت پارامتریک بررسی شد. معیارهای ارزیابی شامل کرنش پلاستیک معادل (PEEQ)، ظرفیت خمشی، جذب انرژی، سختی، شکل پذیری و منحنی‌های هیستریزس بود.

یافته‌ها: نتایج نشان داد که در مدل P20، مفصل پلاستیک به طور کامل در فیوز شبه‌ناودانی تشکیل شد و تیر و ستون در محدوده الاستیک باقی ماندند؛ به گونه‌ای که اتصال حدود ۹۸ درصد ظرفیت پلاستیک تیر را تأمین نمود. کاهش ضخامت بال یا جان تیر موجب انتقال آسیب به اعضای اصلی و افت عملکرد شد، درحالی که رعایت طراحی مبتنی بر ظرفیت، تمرکز تغییر شکل‌های غیرالاستیک را در فیوز تضمین کرد. همچنین، حذف هم‌زمان ورق‌های پیوستگی و مضاعف، جذب انرژی و ظرفیت خمشی اتصال را به ترتیب ۴۵/۵۶٪ و ۴۲/۸۲٪ درصد کاهش داد. افزایش فاصله بین دو لبه آزاد تیر تا ۶۰ میلی‌متر نیز ضمن حفظ تمرکز کرنش پلاستیک در فیوز، تعادل مناسبی میان مقاومت، شکل پذیری و جذب انرژی ایجاد نمود.

نتیجه‌گیری: یافته‌های این پژوهش نشان داد که اتصال پیشنهادی مجهز به فیوز ناودانی، در صورت رعایت طراحی مبتنی بر ظرفیت و استفاده از ورق‌های تقویتی مناسب، از عملکرد لرزه‌ای مطلوب، قابلیت تعویض پذیری بالا و ظرفیت مناسب برای کاهش آسیب و هزینه‌های تعمیرات پس از زلزله برخوردار است و می‌تواند به عنوان گزینه‌ای کارآمد در طراحی قاب‌های خمشی فولادی مورد استفاده قرار گیرد.

اطلاعات مقاله:

سابقه مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴ اسفند ماه ۱۴۰۴

تاریخ بازنگری: ۱۶ تیر ماه ۱۴۰۵

تاریخ پذیرش: ۲۴ تیر ماه ۱۴۰۵

تاریخ انتشار: ۱ مهر ماه ۱۴۰۵

واژگان کلیدی:

اتصال گیردار
اتصال با قابلیت تعمیر پذیری
بارگذاری چرخه‌ای
سازه‌های فولادی
قاب خمشی

* آدرس ایمیل نویسنده مسئول: p.tarighi@abu.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

اتصالات تیر به ستون در قاب‌های فولادی از مهم‌ترین اجزای سازه‌ای در تعیین سختی جانبی، ظرفیت باربری و به‌ویژه رفتار شکل‌پذیر سازه تحت بارهای لرزه‌ای محسوب می‌شوند [۱]. عملکرد نامطلوب این ناحیه می‌تواند به تمرکز تنش، کاهش ظرفیت جذب انرژی و درنهایت بروز آسیب‌های موضعی یا حتی ناپایداری کلی سازه منجر شود. تجربه‌های حاصل از زلزله نورتریج^۱ (۱۹۹۴) نشان داد که تعدادی از اتصالات گیردار فولادی، با وجود طراحی بر اساس ضوابط متداول، دچار شکست‌های ترد در ناحیه جوش بال تیر، ورق‌های اتصال و اجزای مجاور شدند. این رخداد محدودیت‌های برخی جزئیات طراحی موجود و ضرورت کنترل دقیق‌تر محل تشکیل مفصل پلاستیک را برجسته ساخت [۲ و ۳]. در پی این تجربیات، رویکرد طراحی لرزه‌ای به سمت کنترل آسیب و تمرکز تغییرشکل‌های غیرالاستیک در اجزای از پیش تعیین شده سوق داده شد [۴]. یکی از راهکارهای ارائه‌شده در این زمینه، استفاده از اتصالات فولادی با قابلیت تعویض‌پذیری است [۵] که در آن، عضوی موسوم به فیوز به‌عنوان ناحیه اصلی تسلیم طراحی می‌شود؛ به‌کارگیری این راهکار، علاوه بر افزایش ظرفیت اتلاف انرژی و بهبود شکل‌پذیری اتصال، موجب کاهش آسیب در اعضای اصلی نظیر تیر و ستون شده و امکان تعمیر سریع‌تر و کم‌هزینه‌تر پس از زلزله را فراهم می‌سازد [۶ و ۷].

در پژوهش ازکیلک^۲، اتصال تیر با مقطع کاهش‌یافته قابل تعویض (R-RBS) را برای قاب‌های خمشی معرفی کرد [۸]. نتایج تحلیل عددی و آزمایشگاهی نشان داد که عملکرد لرزه‌ای مطلوبی برای این اتصال حاصل شده و آسیب‌ها در بخش قابل تعویض متمرکز شده‌اند. همچنین، امکان تعویض آسان اتصال پس از زلزله، بدون نیاز به جوشکاری، فراهم شده است.

در مطالعه لی^۳ و همکاران، نشان داده شد که اتصالات T-stub قابل تعویض (SF-RTSSs) با کاهش پاسخ لرزه‌ای و آسیب‌های سازه‌ای و غیرسازه‌ای، موجب بهبود تاب‌آوری لرزه‌ای قاب‌های فولادی شده است [۹].

در مطالعه دونگده^۴ و یانگ^۵، نشان داده شد که استفاده از نبشی‌های تعویض‌پذیر در اتصالات پیش‌ساخته، موجب بهبود

عملکرد لرزه‌ای، افزایش قابلیت خودمرکزی و فراهم‌شدن امکان تعویض اجزای آسیب‌دیده پس از زلزله شده است [۱۰]. در مطالعه سویی و سیاه‌پلو، رفتار لرزه‌ای تیر پیوند قابل تعویض با مقطع دابل ناودانی و اتصال پیچی به جان در سیستم مهاربند برون‌محور (ELB) را از طریق مدل‌سازی عددی در نرم‌افزار Abaqus بررسی کردند. نتایج نشان داد که این سیستم با ایجاد تسلیم برشی کامل، عملکرد مؤثری به‌عنوان فیوز لرزه‌ای داشته و از شکل‌پذیری و ظرفیت اتلاف انرژی مطلوبی برخوردار است. همچنین استفاده از ورق‌های تقویتی و انتخاب مناسب مقطع تیر پیوند موجب افزایش مقاومت، سختی و بهبود عملکرد لرزه‌ای اتصال می‌شود [۱۱].

در مطالعه کامگر و همکاران، عملکرد قاب فولادی مجهز به اتصال برشی قابل تعویض از جنس آلایژ حافظه‌دار تحت بار انفجار مورد بررسی قرار گرفت [۱۲]. نتایج نشان داد که برش پایه تا ۲۷ درصد کاهش یافته و تغییرمکان بیشینه تا ۴۳ درصد افزایش یافته است؛ درحالی‌که تغییرمکان باقی‌مانده برابر صفر گزارش شد. این نتایج بیانگر بهبود عملکرد سازه و کاهش هزینه‌های پس از آسیب می‌است.

در مطالعه محمودی و تهرانی، رفتار چرخه‌ای قاب‌های خمشی ویژه مجهز به پیوند برشی بررسی شد. پژوهشگران با جایگزینی بخشی از ناحیه میانی تیر با پیوند برشی، محل تشکیل مفصل پلاستیک را از انتهای تیر به مرکز آن منتقل نمودند. نتایج آزمایش سه نمونه تحت بارگذاری چرخه‌ای شبه‌استاتیکی نشان داد که این راهکار می‌تواند برای طراحی ساختمان‌های جدید و بهسازی قاب‌های آسیب‌دیده مؤثر واقع شود [۱۳].

در پژوهش هی^۶ و همکاران، اتصالات خمشی قابل تعویض در قاب‌های مرکب فولادی به‌صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفتند [۱۴]. نتایج نشان داد که آسیب‌ها در اجزای قابل تعویض متمرکز شده و اعضای اصلی سازه سالم باقی ماندند. همچنین، رفتار هیستریزیس پایدار تا دررفت ۰/۰۴۲ رادیان مشاهده شد و امکان تعویض آسان اجزای آسیب‌دیده فراهم بود.

در مطالعه چن^۷ و لی، عملکرد یک اتصال قابل تعویض برای قاب‌های فولادی با مهاربند خارج از مرکز Y شکل به‌صورت عددی مورد بررسی قرار گرفت [۱۵]. نتایج تحلیل‌های Abaqus نشان داد که استفاده از فولادهای پرمقاومت و دهانه‌های کوتاه‌تر

^۶ He
^۷ Chen

^۱ Northridge
^۲ Ozkilic
^۳ Li
^۴ Dongde
^۵ Yong

موجب افزایش ظرفیت باربری و شکل‌پذیری سازه شده و انتخاب طول بهینه اتصال نقش مؤثری در بهبود عملکرد لرزه‌ای این سیستم دارد.

در مطالعه یوانا^۱ و همکاران، اتصال قفل‌شونده‌ای بین تیر و ستون با فیوز قابل تعویض ارائه شده است [۱۶]. این اتصال با هدف جذب انرژی زلزله و جلوگیری از آسیب به اعضای اصلی سازه ارائه شد. نتایج نشان داد که مقاومت و ظرفیت جذب انرژی مناسبی حاصل شده و با تعویض فیوز پس از زلزله، امکان بهره‌برداری مجدد از سازه بدون نیاز به تعمیرات اساسی فراهم شده است.

در پژوهش گشتایی و همکاران، رفتار فیوزهای فولادی اتلاف‌کننده انرژی در قاب‌های مقاوم لرزه‌ای با استفاده از شبیه‌سازی و روش سطح پاسخ مورد بررسی قرار گرفت و پارامترهای بهینه آن‌ها تعیین شد [۱۷]. نتایج نشان داد فیوزهای دارای ضخامت متوسط و طول میانی، عملکرد مناسب‌تری در اتلاف انرژی و بهبود رفتار لرزه‌ای سازه دارند.

در پژوهش ریچاردز^۲ و لی، اتصال جدیدی برای قاب‌های فولادی خمشی با استفاده از صفحه‌های فیوزی تسلیم‌شونده مطرح شد [۱۸]. این صفحات انرژی زلزله را جذب و مستهلک کرده و پس از زلزله به آسانی قابل تعویض بودند؛ در نتیجه، کاهش نیاز به تعمیرات اساسی و بهبود عملکرد لرزه‌ای سازه حاصل شد.

در مطالعه جلالی و رفیعی، عملکرد قاب‌های خمشی فولادی دارای اتصال پیچی با به‌کارگیری روش‌های مختلف کاهش مقطع تیر، به‌ویژه ایجاد شیارهای طولی و عرضی در بال و جان، مورد بررسی قرار گرفت. هدف اصلی، بهبود عملکرد لرزه‌ای اتصال، انتقال محل تشکیل پلاستیک از ستون و افزایش شکل‌پذیری و ظرفیت جذب انرژی بود. نتایج نشان داد که استفاده از شیار طولی در جان تیر نسبت به سایر روش‌ها، عملکرد مطلوب‌تری داشته و با افزایش ظرفیت باربری و اتلاف انرژی، بهترین رفتار لرزه‌ای را ارائه کرده است [۱۹].

در پژوهش شیونگ^۳ و همکاران، اتصالات فولادی قابل تعویض با نسبت‌های طولی مختلف در ستون‌های پیوندی مورد ارزیابی قرار گرفتند [۲۰]. نتایج نشان داد که اتصالات کوتاه‌تر، دارای رفتار برشی غالب، شکل‌پذیری بالا و مقاومت

اضافه‌بار قابل توجه بوده و مدل‌سازی Abaqus از انطباق مناسبی با نتایج آزمایشگاهی برخوردار بوده است. همچنین، امکان بازگشت سریع ساختمان به بهره‌برداری پس از زلزله فراهم شده است.

در مطالعه مین‌رو^۴ و همکاران، سیستم اتصال فولادی قابل تعویض (RSL) به‌عنوان فیوز سازه‌ای در ستون‌های بتن‌آرمه مورد بررسی قرار گرفت [۲۱]. نتایج نشان داد که این سیستم از مقاومت پیشگی مطلوبی برخوردار بوده و کاهش ظرفیت باربری ناشی از افزایش خروج از مرکزیت، تنها حدود ۱۰ درصد بوده است. همچنین، مشخص شد که طول شکاف لغزشی، تأثیر قابل توجهی در کنترل ترک‌ها و رفتار پیشگی سیستم دارد.

در مطالعه پراتاپ^۵ و وسماولا^۶، نشان داده شد که استفاده از اتصالات قابل تعویض با ظرفیت اتلاف انرژی بالا و هزینه تعمیر پایین در قاب‌های خمشی، منجر به تاب‌آوری لرزه‌ای و کاهش زمان بازگشت سازه به بهره‌برداری مجدد شده است [۲۲].

در پژوهش لن^۷ و همکاران، تمرکز بر روی قطعات پیش‌ساخته و تعویض‌پذیر قرار گرفت؛ به‌گونه‌ای که تشکیل مفصل پلاستیک در ناحیه قطعه تعویض‌پذیر متمرکز شود. نتایج نشان داد که اتصالات تعویض‌پذیر، در مقایسه با اتصالات متداول، از شکل‌پذیری و قابلیت اتلاف انرژی بیش‌تری برخوردار هستند [۲۳].

در مطالعه وو^۸ و همکاران، عملکرد تیر بتن‌آرمه پیش‌ساخته با اتصال پیچی تعویض‌پذیر با استفاده از آزمایش تمام‌مقیاس و مدل‌سازی عددی Abaqus بررسی شد. نتایج نشان داد که افزایش قطر پیچ و به‌کارگیری سخت‌کننده‌ها، موجب بهبود ظرفیت باربری و سختی اتصال می‌شود و این سیستم، ضمن برخوردار بودن از عملکرد سازه‌ای مناسب، از دقت بالای مدل عددی نیز پشتیبانی می‌کند [۲۴].

در مطالعه پارک^۹ و همکاران، با بهره‌گیری از تحلیل‌های غیرخطی، تأثیر الزامات طراحی ستون در اتصالات فیوز قابل تعویض SST-YL بر عملکرد لرزه‌ای قاب‌های خمشی ویژه فولادی ارزیابی شد. نتایج نشان داد که رعایت الزامات فشرده‌گی لرزه‌ای ستون، ضمن بهبود عملکرد فروریزش، امکان دستیابی به

^۴ Min Ro

^۵ Pratap

^۶ Vismawala

^۷ Lan

^۸ Wu

^۹ Park

^۱ Yuanal

^۲ Richards

^۳ Xiong

طراحی اقتصادی‌تر را بدون کاهش ایمنی لرزه‌ای فراهم می‌سازد [۲۵].

در مطالعه منگینی^۱ و همکاران، به ارزیابی یک اتصال مهاربندی اتلاف‌کننده انرژی با قابلیت تعویض (DRBrC)، به منظور افزایش سرعت بازسازی ساختمان‌ها پس از زلزله پرداخته شد. محققان با استفاده از بررسی‌های آزمایشگاهی و تحلیل‌های عددی در مقیاس جزء و سازه، عملکرد این اتصال را تحت سطوح مختلف بارگذاری لرزه‌ای ارزیابی نمودند. نتایج بیانگر آن بود که اتصال پیشنهادی ضمن تأمین الزامات آیین‌نامه ۱-EN 1998-1 [۲۶]، از عملکرد لرزه‌ای مطلوب، قابلیت تعمیر و تعویض آسان و مزایای اقتصادی و زیست‌محیطی بیش‌تری نسبت به سیستم‌های متداول برخوردار است [۲۷].

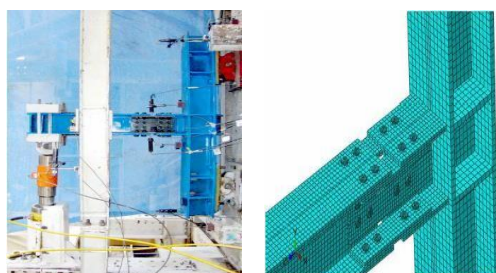
در پژوهش پنگ^۲ و همکاران، عملکرد لرزه‌ای اتصالات صفحه‌ای انتهایی ترمیم‌شده پس از زلزله مورد بررسی قرار گرفت [۲۸]. نتایج نشان داد که این اتصالات از ظرفیت باربری و شکل‌پذیری بیش‌تری برخوردار بوده و افزایش ضخامت ورق ستون موجب بهبود سختی اتصال می‌شود؛ درحالی‌که تأثیر قابل‌توجهی بر عملکرد اتصال نداشت. همچنین، فرمولی برای تعیین ظرفیت باربری و ضریب کاهش در حالت شکست پیچ ارائه شد.

با وجود پیشرفت‌های حاصل‌شده، ارزیابی دقیق رفتار چرخه‌ای، ظرفیت جذب انرژی و نحوه توزیع تنش در این نوع اتصالات، همچنان نیازمند بررسی‌های تکمیلی است. از این‌رو، در پژوهش حاضر، رفتار چرخه‌ای یک اتصال گیردار با قابلیت تعویض‌پذیری مجهز به فیوز شبه‌ناودانی به صورت عددی مورد بررسی قرار گرفت. در این پژوهش، از ناودانی به‌عنوان المان فیوز استفاده شده و چندین نمونه از اتصال پیشنهادی با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود Abaqus مدل‌سازی شد و نتایج حاصل و درنهایت، انطباق نتایج حاصل با الزامات و محدودیت‌های آیین‌نامه‌ای نیز ارزیابی شد.

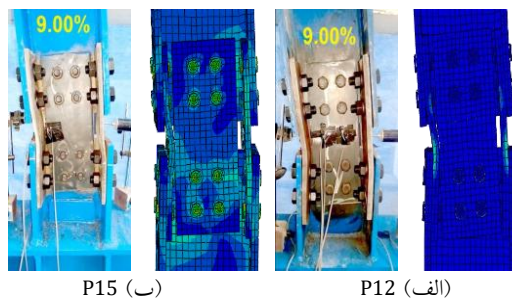
۲- صحت‌سنجی

به‌منظور اعتبارسنجی روش مدل‌سازی عددی در نرم‌افزار اجزای محدود Abaqus، اتصال گیردار دارای قابلیت تعویض‌پذیری که در آن از ورق به‌عنوان المان فیوز استفاده شده و توسط طریقی و همکاران به‌صورت آزمایشگاهی و عددی بررسی شده است [۲۹]، مدل‌سازی شد. پیکربندی آزمایش و مش‌بندی مدل عددی در شکل (۱) ارائه شده است. در آن مطالعه، طول تیر برابر با ۱۴۴۵ میلی‌متر و ارتفاع ستون برابر با ۲۰۰۰ میلی‌متر در نظر گرفته شد.

با توجه به این‌که تمرکز اصلی پژوهش بر بررسی شکست و تغییرشکل تیر قرار داشت، ویژگی‌های ستون و ناحیه اتصال به‌گونه‌ای طراحی شد که تأثیر قابل‌توجهی بر عملکرد کلی نداشته باشند. به‌منظور تحقق این هدف، در ناحیه اتصال از صفحات تقویت‌کننده دوگانه استفاده شد و نسبت ظرفیت خمشی ستون به تیر، بیش از دو در نظر گرفته شد تا تشکیل مفصل پلاستیک و ناحیه تسلیم در تیر تضمین شود. بارگذاری نیز به‌صورت اعمال نیروی متمرکز در انتهای تیر انجام شد. برای نمونه‌های اولیه (P12-01 و P15-01)، آزمایش تا تغییرمکان نسبی ۷ درصد رادیان ادامه یافت. پس از تعویض عضو فیوز در نمونه‌های (P12-02 و P15-02)، بارگذاری چرخه‌ای مجدداً اعمال شد و تا تغییرمکان نسبی ۹ درصد رادیان ادامه داده شد. نتایج نشان داد که کماتش زود هنگام ورق فیوز با ضخامت ۱۲ میلی‌متر موجب شد حدود ۲۲ درصد از ظرفیت خمشی آن مورد بهره‌برداری قرار نگیرد. همچنین، افزایش ۲۰ درصدی ظرفیت فیوز تنها به افزایش ۵/۶ درصد ظرفیت اتصال منجر شد، که این امر به تسلیم بیش‌تر ورق ۱۲ میلی‌متری نسبت به ورق ۱۵ میلی‌متری، با اختلاف ۱۶ درصد، نسبت داده شد. علاوه بر این، بر اساس منحنی‌های به‌دست‌آمده، مشخص شد که پس از تعویض ورق فیوز، سختی الاستیک اتصال در مدل‌های P12 و P15 به‌ترتیب ۸/۶۱ و ۶/۱۴ درصد کاهش یافته بود.



شکل ۱- پیکربندی، مش‌بندی و نحوه اعمال بار در مدل عددی



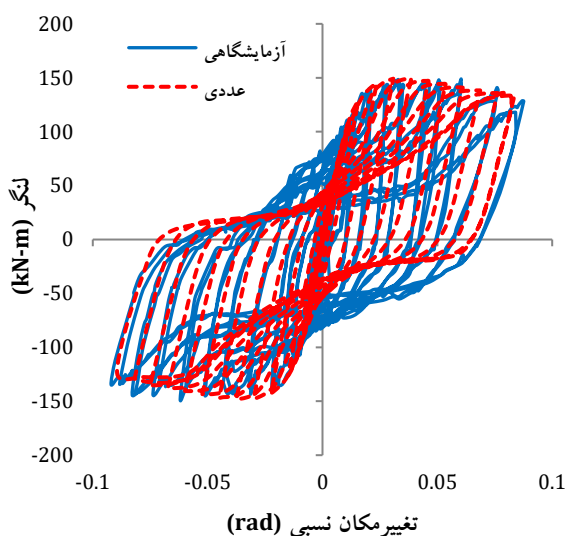
شکل ۲- مقایسه نتایج نمونه‌های آزمایشگاهی و عددی اتصال‌های P12-02 و P15-02

¹ Menghini

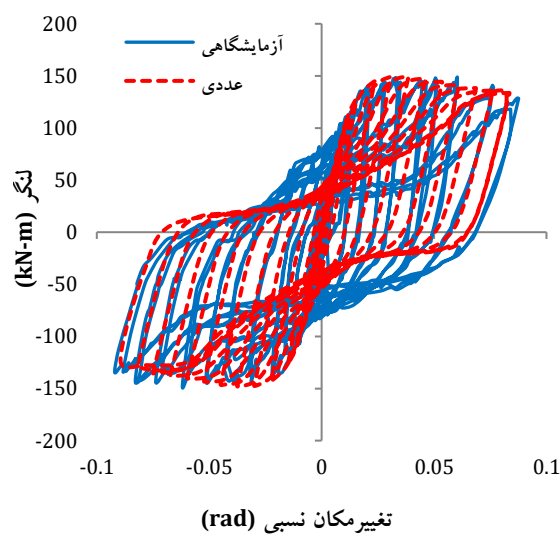
² Peng

جدول ۱- مقایسه نتایج نمونه‌های عددی و آزمایشگاهی نمونه‌های P12-02 و P15-02

جذب انرژی (kJ)	θ_u (rad%)	M_u (kN-m)	K_e (kN/m)	P12-02
۱۰/۲۴	۲/۶۷	۱۴۲/۳۵	۷/۸۳	آزمایشگاهی
۹/۹۹	۲/۳۳	۱۴۴/۵۶	۷/۹۲	عددی
۲/۴۴	۰/۱۲	۱/۵۲	۱/۱۳	اختلاف %
P15-02				
۱۱/۵۶	۳/۱۴	۱۴۸/۶۱	۹/۵۲	آزمایشگاهی
۱۰/۷۳	۳/۸۵	۱۴۹/۰۸	۹/۸۳	عددی
۷/۱۸۰۰	۰/۱۱	۰/۳۱۵	۳/۱۵	اختلاف %



شکل (ب) P12-02



شکل (الف) P15-02

شکل ۳- مقایسه منحنی‌های هیستریزس نتایج عددی و آزمایشگاهی

نیرو را فراهم می‌کند و با هدف تمرکز تغییر شکل‌های غیرالاستیک در یک عضو فداشونده و قابل تعویض به کار گرفته شده است. خود تیر نیز به دو بخش مجزا تقسیم شده است؛ بخش کوتاه‌تر که به وسیله جوش شیار با نفوذ کامل به ستون متصل می‌شود و بخش اصلی تیر که به واسطه فیوزهای شبه‌ناودانی با استفاده از پیچ‌های پر مقاومت به بخش متصل شده به ستون وصل می‌شود. هندسه و ابعاد فیوز به گونه‌ای انتخاب شد که ظرفیت خمشی آن نسبت به اعضای اصلی، کنترل شده و تشکیل تغییر شکل‌های غیرالاستیک در ناحیه فیوز متمرکز شود. اصلی که در الزامات آیین‌نامه بین‌المللی AISC 358-16 برای طراحی لرزه‌ای اتصالات پیش‌تأیید شده تشریح شده است [۳۱]. علاوه بر این، جزئیات اتصال فیوز به تیر به گونه‌ای در نظر گرفته شد که انتقال نیرو میان فیوز و تیر به صورت مناسب انجام شده و از تمرکز نامطلوب

۳- معرفی اتصال پیشنهادی

در پژوهش حاضر، عملکرد یک اتصال سازه‌ای با هدف تعویض پذیری آسان و مطابق با الزامات آیین‌نامه‌ای بررسی شد. در پیکربندی پیشنهادی، مقاطع ناودانی به عنوان عناصر فیوزی فداشونده به کار گرفته شده‌اند که به وسیله پیچ‌های پر مقاومت گرید (۱۰.۹) و به صورت اتصال اصطکاکی، به جان و بال‌های تیر پیچ می‌شوند. در انتخاب مقاطع تیر و فیوز، سازگاری هندسی دو عضو و امکان استقرار فیوز شبه‌ناودانی در فضای داخلی تیر و اتصال آن به جان و بال‌های تیر مدنظر قرار گرفته است. بنابراین، فیوز مورد استفاده در این پژوهش به صورت یک مقطع ناودانی نورد شده و متناسب با آرایش هندسی اتصال در نظر گرفته شده است. این پیکربندی، در مقایسه با فیوز ورقی مورد استفاده در مرجع (۲۹) امکان استفاده هم‌زمان از جان و بال‌های مقطع فیوز در مسیر انتقال

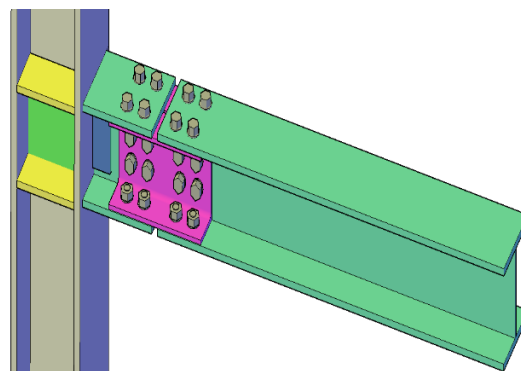
ویژگی‌های ناحیه اتصال با دقت انتخاب شدند تا هیچ‌یک تأثیر قابل‌توجهی بر رفتار کلی اتصال نداشته باشند. از این‌رو، ورق‌های پیوستگی به‌همراه ورق‌های مضاعف در ناحیه اتصال تعبیه شدند که مدول مقطع ستون را به بیش از دو برابر مدول مقطع تیر افزایش داد و بدین ترتیب اطمینان حاصل شد که تشکیل مفصل پلاستیک در تیر رخ خواهد داد. به‌منظور بیان کمی این معیار، نسبت مدول پلاستیک مقطع ستون به تیر، به‌صورت $(Z_{PC}/Z_{PB} > 2)$ در نظر گرفته شد؛ در این رابطه، (Z_{PC}) و (Z_{PB}) به‌ترتیب بیانگر مدول پلاستیک مقطع ستون و تیر هستند. این شرط در طراحی مدل مبنا با هدف ایجاد سلسله‌مراتب مناسب مقاومت اعضای اصلی و جلوگیری از ورود زودهنگام ستون به ناحیه غیرالاستیک در نظر گرفته شد. همچنین، با توجه به وجود فیوز تعویض‌پذیر، هدف نهایی طراحی آن بود که تغییرشکل‌های غیرالاستیک پیش از ایجاد آسیب قابل‌توجه در تیر و ستون، در ناحیه فیوز متمرکز شوند. مشخصات هندسی مقاطع تیر و ستون و ویژگی‌های مصالح مورد استفاده در مدل‌های عددی در جدول (۲) ارائه شده است.

جدول ۲- مشخصات هندسی مقاطع تیر و ستون اتصال پیشنهادی

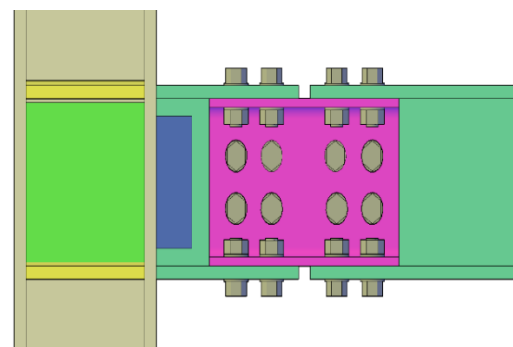
عضو	جان (mm)	بال (mm)
تیر	۱۹۰×۸	۲۰۰×۱۵
ستون	۲۰۰×۱۰	۲۴۰×۲۰

در جریان این پژوهش، ویژگی‌های مکانیکی مصالح تشکیل‌دهنده اعضای قاب فولادی، یعنی مدول الاستیسیته، تنش تسلیم، تنش نهایی و کرنش شکست، بدون هیچ‌گونه تغییر از مطالعه دقیق **طریقی و کافی** استخراج شد تا تحلیل حاضر در هماهنگی کامل با ارزیابی‌های علمی پیشین باقی بماند [۳۲]. آن پژوهش با عنوان «ارزیابی عددی اتصالات گیردار با استفاده از ورق‌های تقویتی فیوزشونده در قاب‌های خمشی فولادی تحت بارگذاری چرخه‌ای» مجموعه‌ای از داده‌های مصالح مستند و دقیق را ارائه می‌دهد که به‌عنوان مبنایی قابل‌اعتماد برای مدل‌سازی رفتار غیرخطی مصالح در پژوهش‌های مشابه به‌کار می‌رود. با توجه به هم‌خوانی نزدیک اهداف و قلمروی مشترک بارگذاری چرخه‌ای که دو پژوهش را به یکدیگر پیوند می‌دهد، تمامی پارامترها بدون تغییر پذیرفته شدند؛ بدین ترتیب، هم انطباق مدل با شواهد آزمایشگاهی موجود و هم انسجام و تداوم لازم در مبانی تحلیلی آن تضمین شد. ویژگی‌های مصالح به‌کاررفته در جدول (۳) ارائه شده‌اند.

تغییرشکل در اعضای اصلی جلوگیری شود و محل وقوع رفتار پلاستیک را به ناحیه‌ای منتقل می‌کند که درگیر مستقیم جان و بال‌ها نیست. روش‌های رایج مانند تقویت اتصال در سطح ستون یا ایجاد کاهش مقاومت تیر در فاصله‌ای مشخص از ستون، سال‌ها است که در اتصالاتی که از پیش تأییدشده هستند، به‌کار گرفته می‌شوند. از نظر هدف کنترل محل تشکیل مفصل پلاستیک، این اتصال با رویکرد اتصالات دارای ناحیه تضعیف‌شده، قابل‌مقایسه است؛ با این حال، مکانیزم پیشنهادی حاضر بر استفاده از یک فیوز شبه‌ناودانی تعویض‌پذیر استوار است. در نتیجه، تنها با بازنمودن پیچ‌ها و جایگزین کردن فیوز جدید به‌جای فیوز تغییرشکل‌یافته، سازه می‌تواند به وضعیت اولیه خود بازگردانده شده و دوباره مورد بهره‌برداری قرار گیرد. چنین اقدامی به‌طور چشم‌گیری، مدت‌زمان و هزینه تعمیرات پس از زلزله را کاهش می‌دهد. جزئیات دقیق اتصال پیشنهادی که بر اساس روش طراحی ارائه شده، در شکل (۴) نشان داده شده است.



(الف) نمای سه‌بعدی



(ب) نمای جلویی اتصال

شکل ۴- نمای کلی از اتصال پیشنهادی

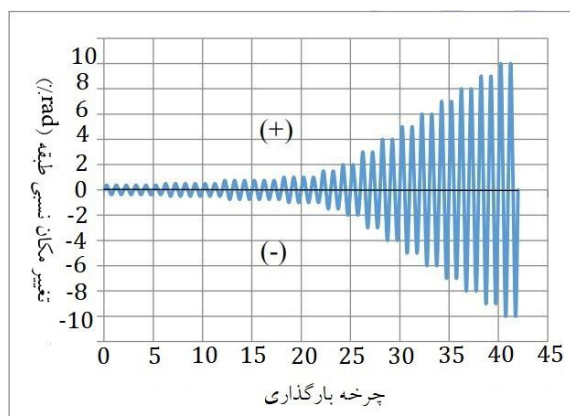
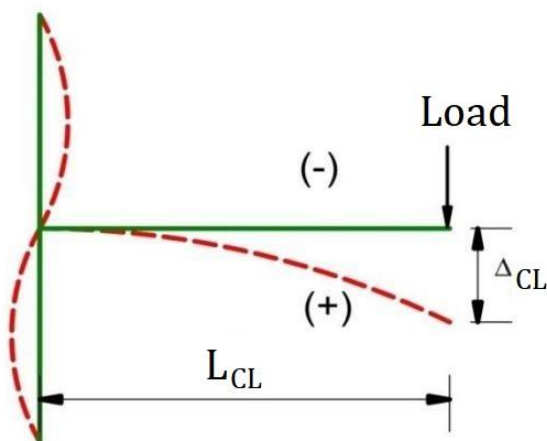
۴- مشخصات نمونه

در تمامی نمونه‌های مورد بررسی، ستون دارای طول کامل ۲۰۰۰ میلی‌متر بود، درحالی‌که تیر از مرکز تا محل اعمال بار به طول ۱۴۴۵ میلی‌متر امتداد داشت. از آنجایی‌که بررسی، عمدتاً بر سازوکارهای شکست تیر متمرکز بود، ابعاد مقطع عرضی ستون و

جدول ۳- مشخصات مکانیکی مصالح مورد استفاده در مدل عددی

کرنش شکست (%)	تنش نهایی (MPa)	تنش تسلیم (MPa)	مدل الاستیسیته (GPa)	ماده
۲۹/۸	۳۷۲/۱	۲۴۰/۱	۳۹۱/۷	ST-37
۱۳/۰	۱۰۴۶/۶	۸۲۱/۶	۲۱۱/۱	اتصال دهنده‌ها (۱۰.۹)

تمامی مدل‌های پارامتریک به صورت یکسان حفظ شد تا مقایسه نتایج صرفاً بر اساس تغییر پارامتر مورد بررسی انجام گیرد. شکل (۵) نحوه ایده‌آل‌سازی تکیه‌گاه‌های مفصلی، محل اعمال بار در انتهای تیر و تاریخچه بارگذاری چرخه‌ای مورد استفاده در تحلیل عددی را نشان می‌دهد.



شکل ۵- پروتکل بارگذاری و نحوه اعمال دوران به اتصال مطابق پروتکل FEMA 350

۶- طراحی اتصال پیشنهادی

در بخش حاضر، طراحی اتصال پیشنهادی به صورت گام به گام ارائه شده است.

گام ۱: محاسبه حداکثر لنگر خمشی محتمل در محل تشکیل مفصل پلاستیک (Mpr) مطابق با آیین‌نامه AISC 358-16 (رابطه (۱))

$$M_{pr} = C_{pr} R_y F_y Z_x \quad (1)$$

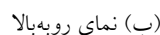
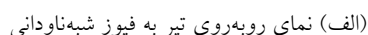
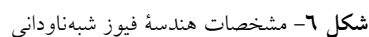
که C_{pr} ضریب سخت‌شدگی کرنش، R_y نسبت تنش تسلیم مورد انتظار به حداقل تنش تسلیم مشخص‌شده مصالح، F_y تنش تسلیم فولاد و Z_x مدول پلاستیک مقطع حول محور X هستند.

با توجه به ماهیت چرخه‌ای تحلیل، رفتار غیرخطی مصالح در نرم‌افزار Abaqus با در نظر گرفتن رفتار الاستوپلاستیک فولاد و سخت‌شوندگی پس از تسلیم مدل‌سازی شد. در تعریف رفتار پلاستیک فولاد ST-37، نقطه تسلیم برابر با ۲۴۰ مگاپاسکال در نظر گرفته شد و ادامه رفتار پلاستیک بر اساس داده‌های تنش-کرنش تعریف‌شده در مدل عددی لحاظ شد. برای اتصال دهنده‌های رده ۱۰.۹ نیز مشخصات مکانیکی مطابق جدول (۳) در مدل اعمال شد. همچنین، برای شبیه‌سازی رفتار اتصال پیچی، پیش‌تندگی پیچ‌ها با استفاده از قابلیت Bolt Load، تماس سخت بین سطوح و ضریب اصطکاک ۰/۳۰ در نظر گرفته شد. بدین ترتیب اثر پیش‌تندگی و تماس اصطکاکی در انتقال نیرو بین اجزای اتصال در تحلیل چرخه‌ای لحاظ شد.

۵- پروتکل بارگذاری

در این پژوهش، به منظور ارزیابی رفتار چرخه‌ای اتصال پیشنهادی، پروتکل بارگذاری چرخه‌ای ارائه‌شده در آیین‌نامه FEMA 350 مورد استفاده قرار گرفت [۳۳]. این پروتکل شامل شش چرخه در دریف‌های بین طبقه‌ای ۰/۰۰۳۷۵، ۰/۰۰۵ و ۰/۰۰۷۵ رادیان و پس از آن، به ترتیب ۲، ۴ و ۲ چرخه در دریف‌های ۰/۰۱، ۰/۰۱۵ و ۰/۰۲ رادیان افزایش یافته و در هر سطح، دو چرخه اعمال می‌شود. در مدل‌های عددی این پژوهش، بارگذاری چرخه‌ای تا دریف ۰/۰۸ رادیان ادامه داده شد و پس از آن، روند بارگذاری متوقف شد. از نظر شرایط مرزی، دو انتهای ستون به صورت تکیه‌گاه‌های مفصلی، ایده‌آل‌سازی شدند تا امکان انتقال لنگر خمشی در محل تکیه‌گاه‌ها محدود شده و رفتار اتصال تیر به ستون در ناحیه مورد مطالعه ارزیابی شود. بار چرخه‌ای نیز در انتهای آزاد تیر و تغییر مکان انتهای تیر مطابق با تاریخچه دریف تعریف‌شده در پروتکل FEMA 350 به صورت رفت‌وبرگشتی اعمال شد. در مدل‌سازی هندسی، طول ستون ۲۰۰۰ میلی‌متر و فاصله محور ستون تا محل اعمال بار در انتهای تیر ۱۴۴۵ میلی‌متر در نظر گرفته شد. این شرایط مرزی و نحوه اعمال بارگذاری در

پلاستیک مقطع آن مطابق رابطه (۲) محاسبه می‌شود:


$$Z_X = [b * t_f(\frac{h}{2} - \frac{t_f}{2}) + (\frac{h}{2} - t_f) * t_w * (\frac{h}{4} - \frac{t_f}{2})] * 4 \quad (2)$$
$$V_{pr} = \frac{2M_{pr}}{L_h} + \frac{W_u L_h}{2} \quad (3)$$
$$M_f = M_{pr} + V_{pr}S_h \quad (\textcolor{blue}{\S})$$
$$M_F \leq \Phi d M_{p-Beam} \quad (\Phi_d = 1) \quad (5)$$

در روابط ارائه شده در بالا، (M_u) بیانگر بار ثقلی ضریب یافته، (L_h) فاصله بین مفصل پلاستیک، (M_F) لنگر در وجه ستون، (M_{P-Beam}) ظرفیت خمشی تیر، (V_{pr}) نیروی برشی ایجاد شده در مفصل پلاستیک و (S_h) فاصله ستون تا خود مفصل است.

در اتصال پیشنهادی، فیوز شبه‌ناودانی با رعایت دقیق محدودیت‌های مقررات آیین‌نامه درخصوص حداقل فاصله مجاز بین سوراخ‌های پیچ و همچنین فاصله لازم آن‌ها از لبه فیوز و تیر، ابعادگذاری شد. فاصله میان دو بخش تیر، که پارامتری با تأثیر

نیوتن (۱۷۹ کیلونیوتن) تعیین شد. تماس بین سطوح متصل‌شونده با استفاده از Hard Contact در راستای نرمال و ضریب اصطکاک ۰/۳۰ در راستای مماسی تعریف شد. در نتیجه، در مرحله اولیه بارگذاری، نیروی پیش‌تندگی پیچ‌ها موجب ایجاد نیروی فشاری و انتقال نیرو از طریق اصطکاک بین سطوح می‌شود. با افزایش بار چرخه‌ای و وقوع لغزش نسبی، در صورت تماس بدنه پیچ با جداره سوراخ، انتقال نیرو از حالت اصطکاکی به حالت اتکایی نیز در مدل لحاظ می‌شود.

Bolt Load و در صفحه عمود بر محور پیچ، در ناحیه بین سرپیچ و مهره، اعمال شد. در مدل‌سازی اتصال پیچی، از پیچ‌های پرمقاومت گرید ۱۰.۹ استفاده شد. مطابق مشخصات مصالح ارائه‌شده در جدول (۳)، مدول الاستیسیته پیچ‌ها برابر با ۲۱۱/۱ گیگاپاسکال، تنش تسلیم ۸۲۱/۶ مگاپاسکال، تنش نهایی ۱۰۶۶/۶ مگاپاسکال و کرنش شکست ۱۳ درصد در نظر گرفته شد. پیش‌تندگی پیچ‌ها با استفاده از قابلیت Bolt Load در نرم‌افزار Abaqus اعمال شد و نیروی پیش‌تندگی هر پیچ برابر با ۱۷۹۰۰۰

جدول ۴- نتایج تحلیل عددی مدل مبنای اتصال پیشنهادی P20

مدل	t (mm)	M_f (kN.m)	M_{p-beam} (kN.m)	$\frac{M_f}{M_{p-beam}}$	M (kN.m)	M_{pr} (kN.m)	$\frac{M}{M_f}$
P20	۱۰	۱۸۹/۳۵	۱۹۴/۱۵	۰/۹۸	۱۶۹/۱	۱۵۲/۷۰	۰/۸۹

باقی‌مانده اتصال پس از پایان بارگذاری چرخه‌ای مورد توجه قرار گرفت. در مدل مبنای P20 بیشینه مقدار PEEQ در فیوز شبه‌ناودانی برابر با ۳/۳۲۶ به دست آمد، در حالی که بیشینه PEEQ در پیچ‌های پرمقاومت گرید ۱۰.۹ برابر با ۰/۱۰۹۹ بود. بنابراین، مقدار بیشینه PEEQ در پیچ‌ها حدود ۳۰۳ برابر کمتر از مقدار متناظر در فیوز است. توزیع این پارامتر در پیچ‌ها نشان داد که تغییر شکل پلاستیک به ناحیه‌ای محدود شده است، در حالی که بخش عمده بدنه پیچ در محدوده الاستیک باقی‌مانده است. نواحی اطراف سوراخ‌های اتصال نیز از نظر تمرکز تغییر شکل پلاستیک بررسی شدند. نتایج نشان داد که تمرکز اصلی تغییر شکل‌های غیرالاستیک در عضو فیوز قرار داشته و گسترش قابل توجه تغییر شکل پلاستیک به نواحی اصلی اتصال، مشاهده نشد. همچنین تیر و ستون در مدل P20 در محدوده الاستیک باقی‌ماندند؛ موضوعی که با هدف طراحی اتصال بر مبنای تمرکز آسیب در عضو فداشونده سازگار است.

در مورد ناحیه جوش، با توجه به مدل‌سازی جوش شیاری با نفوذ کامل به صورت جسم پیوسته، وضعیت آن بر اساس توزیع تنش و تغییر شکل پلاستیک در نواحی مجاور اتصال ارزیابی شد. نتایج، گسترش قابل توجه تغییر شکل پلاستیک از ناحیه فیوز به ناحیه اتصال جوشی و اجزای اصلی را نشان داد. برای تکمیل ارزیابی قابلیت تعمیرپذیری، تغییر شکل باقی‌مانده اتصال پس از تخلیه بار نیز بررسی شد. مقدار تغییر شکل باقی‌مانده در نقطه کنترل اتصال برابر با عدد واقعی میلی‌متر به دست آمد. این مقدار در کنار تمرکز تغییر شکل پلاستیک در فیوز و در محدود بودن تغییر شکل پلاستیک در سایر اجزاء، مبنای ارزیابی قابلیت جداسازی و جایگزینی فیوز

۷- نتایج

۷-۱- تأثیر ظرفیت خمشی فیوز بر عملکرد اتصال

در پژوهش حاضر، پاسخ چرخه‌ای اتصال توسط روش‌های عددی بررسی شد و توزیع کرنش پلاستیک معادل و مشخصه لنگر-دوران اتصال پیشنهادی P20 در شکل (۹)، ارائه شده است. هرگاه یک مقطع تحت نیروهای برشی یا لنگرهای خمشی فراتر از ظرفیت خود قرار گیرد، مفصل پلاستیک در آسیب‌پذیرترین بخش آن تشکیل می‌شود و آن ناحیه دچار تغییر شکل قابل ملاحظه و دائمی می‌شود. در مطالعات آزمایشگاهی اعضای فولادی، تشکیل چنین مفصل‌هایی معمولاً به وسیله کرنش‌سنج‌ها آشکار می‌شود که اندازه‌گیری‌های آن‌ها با کرنش تسلیم به دست آمده از آزمون‌های کشش مقایسه می‌شود؛ در مواردی که کرنش‌سنج وجود نداشته باشد، وجود تغییر شکل دائمی، خود بیانگر آن است که ماده وارد محدوده پلاستیک شده است. شبیه‌سازی‌های عددی، شاخصی مشابه فراهم می‌آورند؛ میدان مقدار عددی کرنش پلاستیک معادل (PEEQ) تغییر شکل غیرالاستیک انباشته را ثبت می‌کند و در این پژوهش به عنوان شاخص قطعی برای شناسایی مفصل‌های پلاستیک درون اجزای اتصال به کار گرفته می‌شود.

۷-۲- ارزیابی آسیب اجزای اتصال و قابلیت تعویض فیوز پس از بارگذاری چرخه‌ای

به منظور ارزیابی دقیق‌تر قابلیت تعویض‌پذیری اتصال پیشنهادی، علاوه بر بررسی تمرکز کرنش پلاستیک معادل در فیوز، وضعیت اجزای غیرقابل تعویض شامل پیچ‌ها، نواحی اطراف سوراخ‌ها، تیر، ستون و ناحیه جوش نیز بررسی شد. همچنین تغییر شکل

بررسی نتایج تحلیل عددی اتصال دارای فیوز شبه‌ناودانی نشان داد که مدل P20 با ضخامت بال فیوز ۱۰ میلی‌متر، عملکرد خمشی مناسبی دارد. در این مدل، لنگر نهایی اتصال (M_F) برابر با ۱۸۹/۳۵ کیلونیوتن متر و لنگر پلاستیک تیر (M_{p-beam}) برابر با ۱۹۴/۱۵ کیلونیوتن متر بود. مقایسه این دو مقدار نشان داد که اتصال ۹۸ درصد از ظرفیت پلاستیک تیر را تأمین کرد و تنها ۲ درصد افت ظرفیت داشت. همچنین، مقدار لنگر M برابر با ۱۶۹/۱ کیلونیوتن متر بود که معادل ۸۹ درصد مقاومت نهایی اتصال محسوب شد. این نتیجه نشان داد که اتصال حتی در مراحل پایانی بارگذاری نیز بخش عمده ظرفیت مقاومتی خود را حفظ کرد. افزون بر این، مقدار (M_{pr}) برابر ۱۵۳/۷۰ کیلونیوتن متر بود که حدود ۸۱ درصد لنگر نهایی اتصال را تشکیل داد و بیانگر شکل‌پذیری مناسب مفصل پلاستیک و پایداری رفتار غیرخطی اتصال پیش از دستیابی به مقاومت نهایی بود. در مجموع، نتایج حاصل نشان داد که مدل P20 از ظرفیت خمشی مناسب، افت مقاومت اندک و عملکرد لرزه‌ای مطلوب برخوردار بود و گزینه‌ای مناسب برای استفاده در اتصالات تعویض‌پذیر قرار گیرد.

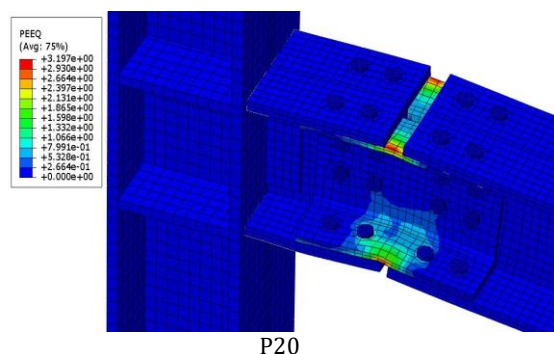
۷-۳- تأثیر ابعاد مقطع تیر بر عملکرد اتصال پیشنهادی

با توجه به هدف اصلی اتصال پیشنهادی، یعنی تمرکز تغییرشکل‌های غیرالاستیک در عضو تعویض‌پذیر و حفظ اعضای اصلی در محدوده الاستیک، پارامترهای مطالعات پارامتریک بر اساس میزان تأثیرگذاری آن‌ها بر مکانیزم تشکیل مفصل پلاستیک و قابلیت تعویض‌پذیری انتخاب شدند. در این راستا، علاوه بر بررسی الزامات ناحیه اتصال، اثر پارامترهای مرتبط با عضو تعویض‌پذیر و موقعیت آن، شامل ضخامت بال و جان تیر و فاصله بین لبه‌های آزاد تیر، بر توزیع کرنش پلاستیک معادل (PEEQ)، ظرفیت خمشی، پایداری موضعی و حفظ مکانیزم خرابی هدف مورد ارزیابی قرار گرفت. هدف از این بررسی، تعیین شرایطی است که ضمن تأمین ظرفیت مورد نیاز اتصال، تشکیل تغییرشکل‌های غیرالاستیک را در ناحیه فیوز تعویض‌پذیر متمرکز نماید.

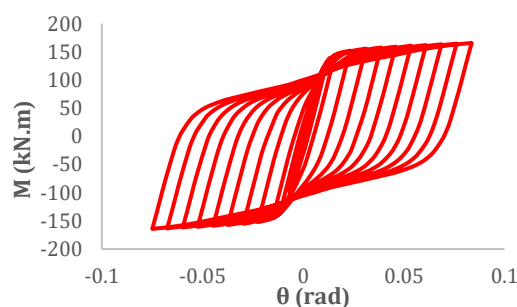
بر اساس الزامات آیین‌نامه AISC 358-16، تیرهای به‌کاررفته در قاب‌های خمشی ویژه باید در گروه مقاطع فشرده لرزه‌ای انتخاب شوند؛ به‌گونه‌ای که نسبت پهنا به ضخامت اجزای آن‌ها از مقدار حدی λ_{hd} مندرج در جدول (۵) فراتر نرود. به‌منظور بررسی این الزام آیین‌نامه‌ای و ارزیابی تأثیر احتمالی عدم رعایت آن بر عملکرد اتصال پیشنهادی، ضخامت‌های متفاوتی برای بال و جان تیر در نظر گرفته شد. نمونه‌های مورد بررسی در جدول (۶)، ارائه شده‌اند.

پس از بارگذاری چرخه‌ای قرار گرفت. بر این اساس، نتایج مدل P20 نشان می‌دهد که مکانیزم آسیب، عمدتاً در فیوز قابل تعویض متمرکز شده است؛ درحالی‌که آسیب پلاستیک قابل‌توجهی در تیر، ستون و سایر اجزای اصلی اتصال ایجاد نشده است. بنابراین، امکان جداسازی فیوز آسیب‌دیده از طریق بازکردن اتصال پیچی و جایگزینی آن به‌عنوان راهکار تعمیر اتصال قابل طرح است.

همان‌گونه که در شکل (۸) نشان داده شده است، مفصل پلاستیک منحصراً در فیوز شبه‌ناودانی تشکیل شده است، درحالی‌که تیر و ستون رفتار الاستیک خود را حفظ کرده‌اند. بیش‌ترین تمرکز کرنش پلاستیک در ناحیه مرکزی بال فیوز متمرکز شده است. این تمرکز موضعی، تضمین می‌کند که اتصال پیشنهادی پس از وقوع فعالیت لرزه‌ای به‌آسانی قابل تعویض است. همچنین در جدول (۴)، مقادیر به‌دست‌آمده به‌صورت عددی گزارش شده است. افزایش طول فیوز در قسمت‌های بعدی مورد ارزیابی قرار گرفته است.



شکل ۸- توزیع کرنش پلاستیک معادل (PEEQ) در اتصال پیشنهادی P20



شکل ۹- منحنی هیستریزیس لنگر-دوران اتصال پیشنهادی P20

(M) حداکثر لنگر خمشی حاصل از تحلیل سازه در محل برخورد با ستون، (M_F) حداکثر لنگر خمشی پیش‌بینی‌شده برای ستون بر اساس رابطه (۴)، (M_{pr}) حداکثر لنگر خمشی پلاستیک در محل ایجاد مفصل پلاستیکی مطابق رابطه (۱) و (t) ضخامت بال فیوز شبه‌ناودانی است.

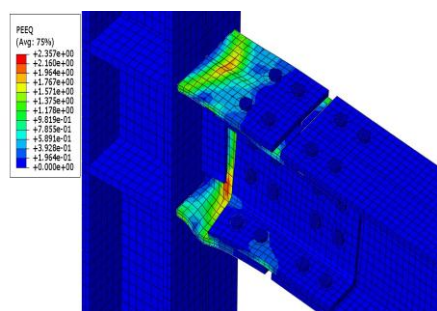
جدول ۵- محدودیت نسبت پهنا به ضخامت برای مقاطع فشرده لرزه‌ای

شرح اجزا	نسبت پهنا به ضخامت	حداکثر نسبت پهنا به ضخامت اعضا با شکل پذیری زیاد (λ_{hd})
بال مقطع ناودانی	$\frac{b}{t_f}$	$0.3 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$
جان مقاطع I شکل		$C_a \leq 0.125$
وقتی به عنوان تیر یا ستون به کار می‌روند.	$\frac{h}{t_w}$	$2.45 \sqrt{\frac{E}{F_y}} (1 - 0.93 C_a)$
		$C_a = \frac{P_u}{\phi P_v}$

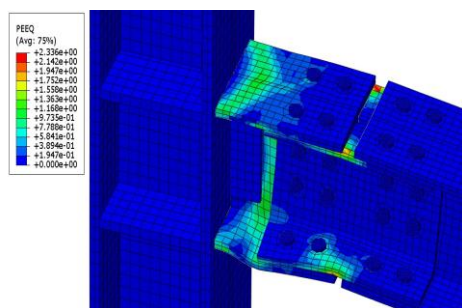
جدول ۶- مشخصات هندسی و نتایج اولیه مدل‌های مورد بررسی در مطالعه پارامتریک ضخامت بال و جان تیر

مدل	(λ_{hd})	t (mm)	t_f (mm)	t_w (mm)	$\frac{b}{t_f}$	$\frac{h}{t_w}$	$\frac{b}{t_f} \text{ or } \frac{h}{\lambda_{hd}}$	اتلاف انرژی (kN-m)
P20	۸/۸۷	۱۰	۱۵	۸	۱۳/۳۳۳	۲۳/۷۵	۱/۵	۱۲/۴۸۳
P20-tf10	۸/۸۷	۱۰	۱۰	۸	۲۰	۲۵	۲/۲۵	۱۰/۷۹۲
P20-tf12	۸/۸۷	۱۰	۱۲	۸	۱۶/۶۶۶	۲۴/۵	۱/۸۸	۱۱/۹۲۹

تیر از مقاومت فیوز بیش‌تر در نظر گرفته شود تا تغییر شکل‌های غیرالاستیک و آسیب، به‌طور کامل در فیوز متمرکز شده و اعضای اصلی سازه از آسیب مصون بماند. همچنین نتایج نشان داد که با افزایش ضخامت بال تیر، عملکرد اتصال و ظرفیت استهلاک انرژی بهبود می‌یابد. در میان مدل‌های بررسی‌شده، مدل مینا با ضخامت بال تیر ۱۵ میلی‌متر، بهترین عملکرد را از خود نشان داد و بیش‌ترین میزان استهلاک انرژی را به ثبت رساند.



P20-tf10

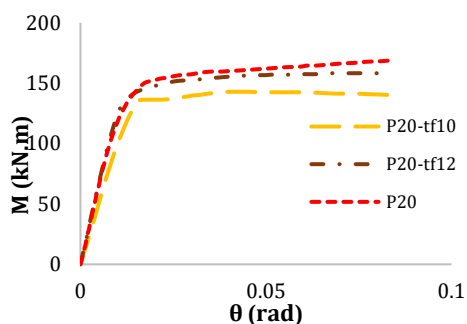


P20-tf12

شکل ۱۰- توزیع کرنش پلاستیک معادل (PEEQ) در مدل‌های P20-tf10 و P20-tf12 با ضخامت‌های متفاوت بال تیر

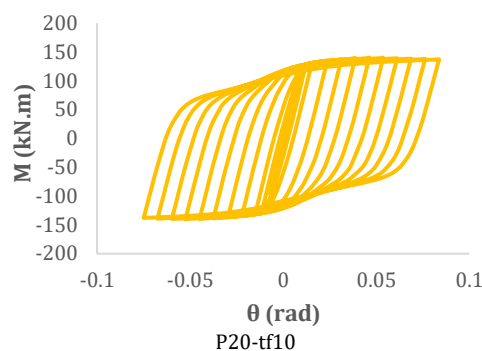
در این بخش، تغییر ضخامت بال تیر با هدف بررسی تأثیر ظرفیت و سختی عضو اصلی بر نحوه توزیع تغییر شکل‌های غیرالاستیک در اتصال، مورد بررسی قرار گرفته است. لازم به ذکر است که این مطالعه، بررسی مستقل نسبت پهنا به ضخامت اجزای مقطع در شرایط ثابت بودن ظرفیت تیر را دنبال نمی‌کند؛ از این‌رو، نتایج مدل‌های P20-tf10 و P20-tf12 باید در چارچوب اثر تغییر ضخامت و ظرفیت بال تیر بر مکانیزم تسلیم اتصال تفسیر شوند. نتایج نشان می‌دهد که کاهش ضخامت بال تیر می‌تواند ظرفیت عضو اصلی را کاهش داده و موجب انتقال بخشی از تغییر شکل‌های پلاستیک از فیوز به تیر شود؛ موضوعی که اهمیت رعایت اصل طراحی بر مبنای ظرفیت و تأمین مقاومت کافی عضو اصلی نسبت به فیوز را نشان می‌دهد.

بررسی اثر نسبت پهنا به ضخامت بال تیر تحت بارگذاری چرخه‌ای نشان داد که مطابق شکل (۱۰)، در مدل‌های P20-tf10 و P20-tf12 کرنش پلاستیک معادل در بال تیر ایجاد شده که این رفتار ناشی از ناکافی بودن ضخامت بال تیر در هدایت تغییر شکل‌های پلاستیک به فیوز است. به‌منظور ارزیابی تأثیر ضخامت بال تیر بر عملکرد اتصال دارای فیوز ناودانی، دو مدل عددی بررسی شد. در مدل P20-tf10 که ضخامت بال تیر برابر با ضخامت بال فیوز و معادل ۱۰ میلی‌متر در نظر گرفته شد، کرنش پلاستیک معادل به‌جای تمرکز در فیوز، در بال تیر تشکیل و موجب افزایش اعوجاج موضعی در بال تیر نیز شد. این وضعیت سبب آسیب دیدگی عضو اصلی و از بین رفتن قابلیت تعویض پذیری اتصال شد. در مقابل، در مدل P20-tf12 با افزایش ضخامت بال تیر به ۱۲ میلی‌متر و در حالی که ضخامت بال فیوز همچنان ۱۰ میلی‌متر باقی ماند، عملکرد اتصال اندکی بهبود یافت ولی بخش عمده کرنش پلاستیک همچنان در بال تیر مشاهده شد. بر این اساس، رعایت اصل طراحی بر مبنای ظرفیت ضروری است؛ به‌گونه‌ای که مقاومت

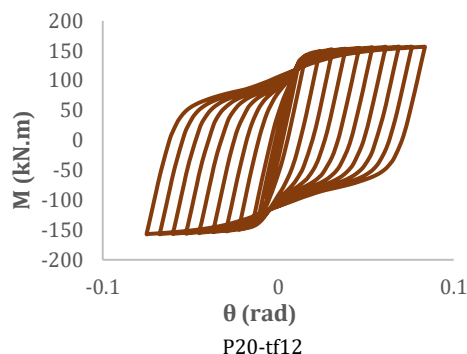


شکل ۱۲- منحنی پوش لنگر-دوران مدل‌های P20-tf10 و P20-tf12

بر اساس نتایج ارائه شده از شکل‌های (۱۱) و (۱۲)، مدل P20 با دست‌یابی به ظرفیت خمشی که در جدول (۷) هم نشان داده شده، حدود ۱۶۹/۱ کیلونیوتن متر، مطلوب‌ترین عملکرد را از نظر سختی، مقاومت و پایداری از خود نشان داد. در مقابل، کاهش ضخامت بال تیر به ۱۲ و ۱۰ میلی‌متر به ترتیب موجب کاهش ظرفیت خمشی در حدود ۱۵۸/۲ و ۱۴۲/۸۲ کیلونیوتن متر شد. این نتایج بیانگر آن است که مدل‌های P20-tf10 و P20-tf12 در مقایسه با مدل مبنا با افت عملکرد مواجه شدند و بیش‌ترین کاهش ظرفیت و عملکرد به مدل P20-tf10 اختصاص داشت. بنابراین، مدل P20 به‌عنوان مناسب‌ترین گزینه برای تأمین عملکرد لرزه‌ای مطلوب اتصال قابل معرفی است.



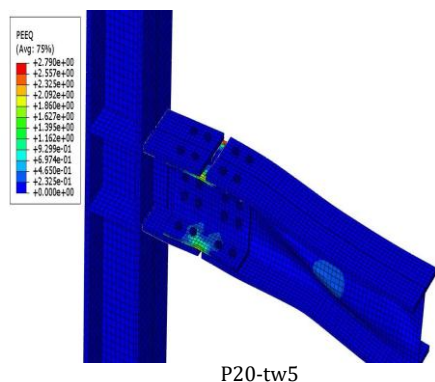
شکل ۱۱- منحنی‌های هیستریزیس لنگر-دوران مدل‌های P20-tf10 و P20-tf12 با ضخامت‌های متفاوت بال تیر



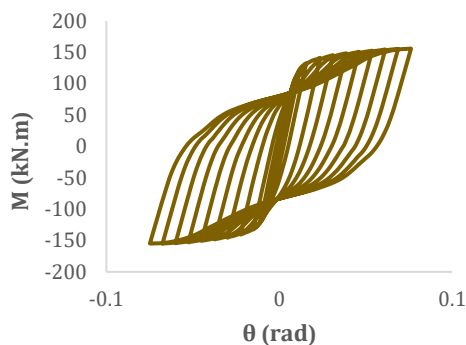
جدول ۷- نتایج تحلیل عددی مدل‌های اتصال با ضخامت‌های متفاوت بال تیر

مدل	t (mm)	M_f (kN.m)	M_{p-beam} (kN.m)	$\frac{M_f}{M_{p-beam}}$	M (kN.m)	M_{pr} (kN.m)	$\frac{M}{M_f}$
P20	۱۰	۱۸۹/۳۵	۱۹۴/۱۵	۰/۹۸	۱۶۹/۱	۱۵۲/۷۰	۰/۸۹
P20-tf10	۱۰	۲۰۳/۰۵	۱۴۱/۲۶	۱/۴۴	۱۴۲/۸۲	۱۶۳/۷۵	۰/۷۰
P20-tf12	۱۰	۱۸۹/۳۵	۱۶۲/۷۵	۱/۲۱	۱۵۸/۲	۱۵۹/۳۰	۰/۸۰

تغییر شکل‌های نامطلوب و بهبود عملکرد کلی اتصال می‌شود. بنابراین، به‌منظور دستیابی به عملکرد لرزه‌ای مطلوب و حفظ قابلیت تعویض‌پذیری اتصال، رعایت محدودیت نسبت پهنا به ضخامت جان تیر مطابق آیین‌نامه و محدود نمودن آن به حداکثر مقدار مجاز ۳۳ درصد، ضروری است.

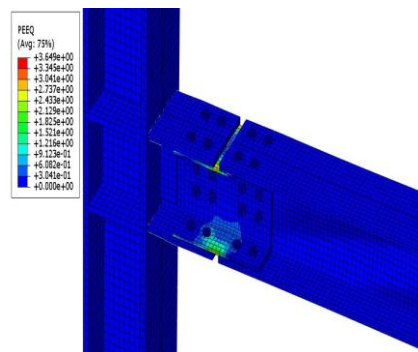


بر اساس نتایج تحلیل ارائه شده در شکل (۱۳)، عملکرد دو مدل P20-tw5 و P20-tw6 از نظر توزیع کرنش پلاستیک معادل و میزان اعوجاج جان تیر مورد بررسی قرار گرفت. در مدل P20-tw5 با کاهش ضخامت جان تیر به ۵ میلی‌متر، اگرچه تمرکز کرنش پلاستیک معادل در فیوز شبه‌ناودانی حفظ شد، اما کاهش سختی جان تیر موجب افزایش چشم‌گیر اعوجاج موضعی و بروز تغییر شکل‌های نامطلوب در تیر شد. در مقابل، در مدل P20-tw6 با افزایش ضخامت جان تیر به ۶ میلی‌متر، ضمن تداوم تشکیل کرنش پلاستیک معادل در فیوز ناودانی، اعوجاج جان تیر به‌طور محسوسی کاهش یافت و رفتار سازه‌ای اتصال رو به بهبود پیدا کرد. این نتایج نشان می‌دهد که افزایش ضخامت جان تیر از ۵ به ۶ میلی‌متر، بدون ایجاد اختلال در مکانیزم جاری شدن فیوز ناودانی، موجب افزایش پایداری موضعی جان تیر، کاهش



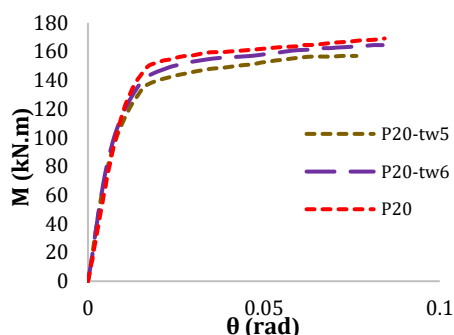
P20-tw5

شکل ۱۴- منحنی‌های هیستریزیس لنگر-دوران مدل‌های P20-tw5 و P20-tw6 با ضخامت‌های متفاوت جان تیر

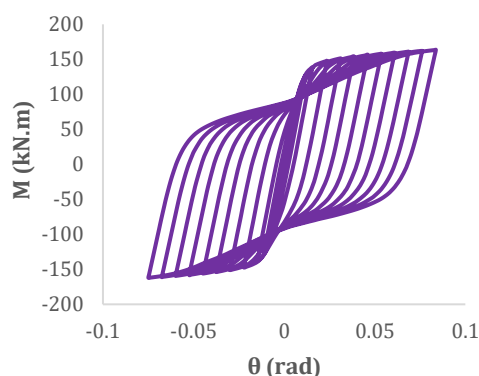


P20-tw6

شکل ۱۳- توزیع کرنش پلاستیک معادل (PEEQ) در مدل‌های P20-tw5 و P20-tw6 با ضخامت‌های متفاوت جان تیر



شکل ۱۵- منحنی پوش لنگر-دوران مدل‌های P20-tw5 و P20-tw6



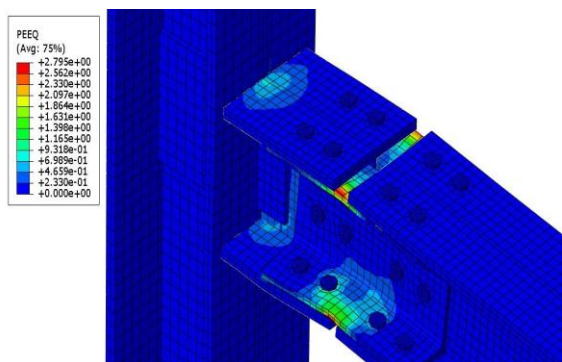
P20-tw6

بررسی نتایج شکل‌های (۱۴) و (۱۵) نشان داد که کاهش ضخامت جان عضو با افت تدریجی ظرفیت خمشی اتصال همراه است. مدل P20-tw6 با وجود کاهش ضخامت جان، عملکردی نزدیک به مدل مبنا داشته و تنها ۲/۴ درصد کاهش در ظرفیت خمشی را نشان داد. در مقابل، کاهش ضخامت جان به ۵ میلی‌متر موجب کاهش ۶/۵ درصدی ظرفیت خمشی اتصال شد. این نتایج بیانگر آن است که افزایش ضخامت جان عضو، موجب بهبود عملکرد خمشی اتصال می‌شود؛ از این‌رو، افزایش ضخامت جان به ۸ میلی‌متر به منظور دستیابی به عملکرد نزدیک به مدل مبنا توصیه می‌شود. همچنین ظرفیت خمشی مدل‌ها در جدول (۸)، ارائه شده است.

جدول ۸- نتایج تحلیل عددی مدل‌های اتصال با ضخامت‌های متفاوت جان تیر

مدل	t (mm)	M_f (kN.m)	M_{p-beam} (kN.m)	$\frac{M_f}{M_{p-beam}}$	M (kN.m)	M_{pr} (kN.m)	$\frac{M}{M_f}$
P20	۱۰	۱۸۹/۳۵	۱۹۴/۱۵	۰/۹۸	۱۶۹/۱	۱۵۲/۷۰	۰/۸۹
P20-tw5	۱۰	۱۸۹/۳۵	۱۸۶/۵۰	۱/۰۲	۱۵۶/۹	۱۵۲/۷۰	۰/۸۳
P20-tw6	۱۰	۱۸۹/۳۵	۱۸۹/۰۵	۱/۰۰	۱۶۴/۵	۱۵۲/۷۰	۰/۸۷

پیوستگی نقش مهمی در افزایش سختی موضعی ستون، کاهش تمرکز تنش و بهبود عملکرد لرزه‌ای اتصال ایفا می‌کند.



P20-C

شکل ۱۶- توزیع کرنش پلاستیک معادل (PEEQ) در اتصال پیشنهادی P20-C

۷-۴-۲- عدم تعبیه ورق‌های مضاعف جان ستون

در صورتی که ظرفیت برشی چشمه اتصال توانایی تحمل نیروهای اعمال شده را نداشته باشد، باید با استفاده از روش‌های مناسب، این ناحیه را تقویت نمود تا از ایجاد تغییرشکل‌های نامطلوب جلوگیری شود. راهکارهای متداول برای افزایش مقاومت چشمه اتصال شامل موارد زیر است:

الف: افزایش ابعاد مقطع ستون برای بالا بردن ظرفیت مقاومتی

ناحیه چشمه اتصال

ب: استفاده از ورق‌های مضاعف در ناحیه چشمه اتصال برای

افزایش ضخامت مؤثر جان ستون و بهبود ظرفیت برشی آن

ج: استفاده از سخت‌کننده‌های قطری برای افزایش سختی

موضعی و کنترل تغییرشکل‌های ایجاد شده در ناحیه اتصال

در پژوهش حاضر، با توجه به ارزیابی ظرفیت برشی چشمه

اتصال، از دو ورق مضاعف با ضخامت ۱۵ میلی‌متر در جان ستون

استفاده شد تا عملکرد این ناحیه بهبود یابد. همچنین، برای بررسی

تأثیر ورق‌های مضاعف، مدل P20-D بدون استفاده از این ورق‌ها

تحلیل شد و توزیع کرنش پلاستیک معادل آن در شکل (۱۷) ارائه

شده است و نشان می‌دهد که حذف ورق‌های مضاعف موجب

افزایش تمرکز کرنش پلاستیک معادل در ناحیه چشمه اتصال و

ایجاد اعوجاج قابل توجه در جان ستون می‌شود. این رفتار به دلیل

انتقال نیروهای کششی و فشاری ایجاد شده در فیوز شبه‌ناودانی به

جان تیر و سپس جان ستون رخ داد؛ به گونه‌ای که جان ستون

توانایی تحمل این نیروها را نداشت و در نتیجه تغییرشکل‌های

موضعی و اعوجاج در این ناحیه افزایش یافت. نتایج نشان داد که

استفاده از ورق‌های مضاعف نقش مؤثری در افزایش ظرفیت

برشی چشمه اتصال و کنترل آسیب‌های موضعی جان ستون دارد.

۷-۴-۱- تأثیر ورق‌های پیوستگی و مضاعف ستون در عملکرد

اتصال

در این بخش از پژوهش به ارزیابی نقش ورق‌های پیوستگی و مضاعف ستون در عملکرد اتصال پیشنهادی مورد بررسی قرار گرفت.

۷-۴-۱- عدم تعبیه ورق‌های پیوستگی

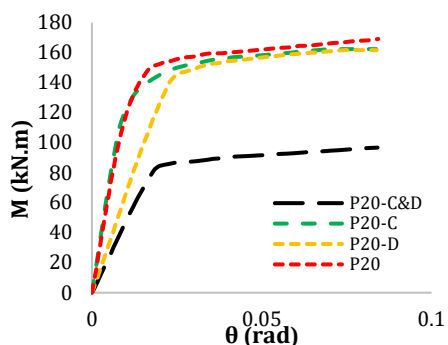
ورق‌های پیوستگی به منظور انتقال نیروهای ناشی از لنگر تیر به ستون و همچنین جلوگیری از خمش بال ستون، ایجاد چین‌خوردگی و لهیدگی جان ستون در ناحیه تماس با بال‌های بالا و پایین تیر، در داخل ستون نصب می‌شوند. بر اساس استاندارد FEMA 350، به منظور بررسی نیاز یا عدم نیاز به استفاده از ورق‌های پیوستگی در ستون‌های با مقطع H، ضخامت بال ستون باید از مقادیر تعیین شده در رابطه‌های (۶) و (۷) بیش‌تر باشد. در صورتی که این شرط تأمین نشود، استفاده از یک جفت ورق پیوستگی در ستون الزامی خواهد بود.

$$t_{cf} = 0.04 \sqrt{0.8 b_{bf} t_{bf} \frac{F_{yb} R_{yb}}{F_{yc} R_{yc}}} \quad (6)$$

$$t_{cf} \geq \frac{b_{bf}}{6} \quad (7)$$

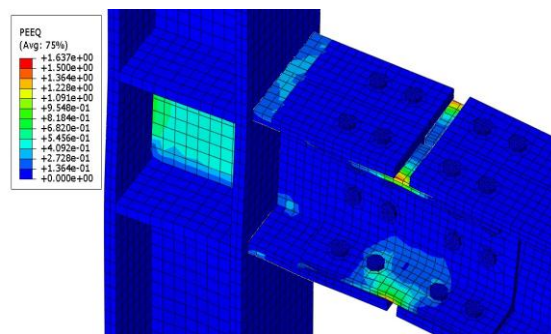
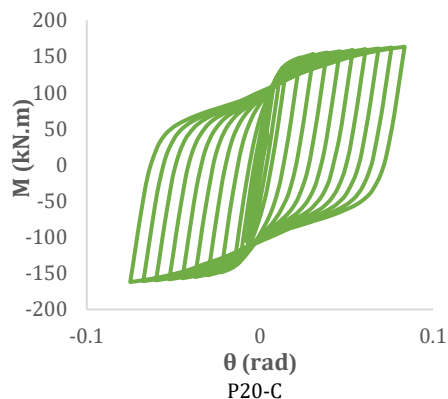
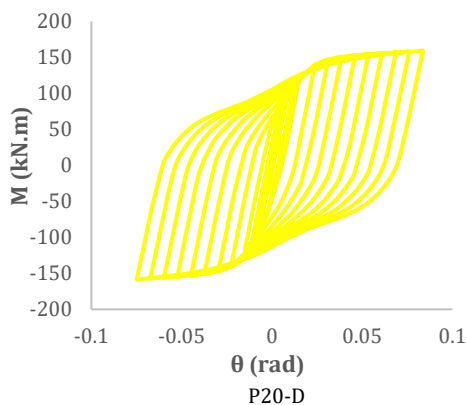
که (t_{cf}) و (t_{bf}) به ترتیب نشان‌دهنده ضخامت بال ستون و ضخامت بال تیر هستند. همچنین (b_{bf}) بیانگر پهنا یا عرض بال تیر است. مقادیر (F_{yb}) و (F_{yc}) نیز به تنش تسلیم ماده به کاررفته در تیر و ستون اشاره دارند. پارامترهای (R_{yb}) و (R_{yc}) نیز نسبت تنش تسلیم مورد انتظار به حداقل تنش تسلیم مشخص شده برای مصالح تیر و ستون تعریف هستند.

در این بخش، تأثیر حذف ورق‌های پیوستگی بر رفتار اتصال پیشنهادی بررسی می‌شود. مطابق نتایج تحلیل عددی ارائه شده در شکل (۱۶)، در مدل P20-C که ورق‌های پیوستگی در ناحیه داخلی ستون حذف شده‌اند، مقدار کرنش پلاستیک معادل در محدوده اتصال تیر به ستون به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. این افزایش تمرکز کرنش، ظرفیت ناحیه اتصال را کاهش داده و احتمال ایجاد آسیب‌های موضعی و گسیختگی زود هنگام را افزایش می‌دهد. علت اصلی این رفتار، ضعف بال ستون در تحمل نیروهای کششی و فشاری منتقل شده از فیوز شبه‌ناودانی به بال تیر است. در این شرایط، تمرکز نیروها در محل اتصال، موجب ایجاد کماتش موضعی بال ستون می‌شود و در نهایت، گسترش ناحیه آسیب دیده می‌تواند به شکست در ناحیه بر ستون منجر شود. از این رو، وجود ورق‌های



شکل ۱۹- منحنی پوش لنگر-دوران مدل‌های P20-D, P20-C و P20-C&D با و بدون ورق‌های پیوستگی و مضاعف

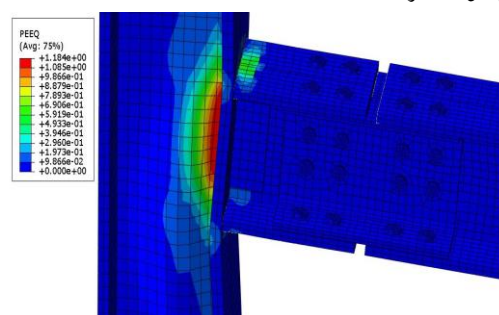
نتایج نمودار شکل (۱۹)، نشان می‌دهد که مدل P20 بهترین عملکرد را از نظر سختی اولیه و مقاومت خمشی نهایی از خود ارائه می‌دهد و حداکثر لنگر حدود ۱۶۹/۱ کیلونیوتن متر را تحمل می‌کند. مدل‌های P20-C و P20-D با کاهش ظرفیت تنها ۴ تا ۵ درصدی نسبت به مدل مرجع، رفتار بسیار نزدیک و قابل قبولی از نظر شکل پذیری دارند و در مقابل، مدل P20-C&D با افت حدود ۴۲/۸۲ درصدی ظرفیت خمشی و کاهش محسوسی در سختی اولیه، ضعیف‌ترین عملکرد را داشته و برای کاربردهای لرزه‌ای گزینه مطلوبی محسوب نمی‌شود. همچنین، مدل P20-C با افت ۴ درصدی، بهترین و نزدیک‌ترین عملکرد را نسبت به مدل مرجع از خود نشان داده است.



شکل ۱۷- توزیع کرنش پلاستیک معادل (PEEQ) در اتصال پیشنهادی P20-D

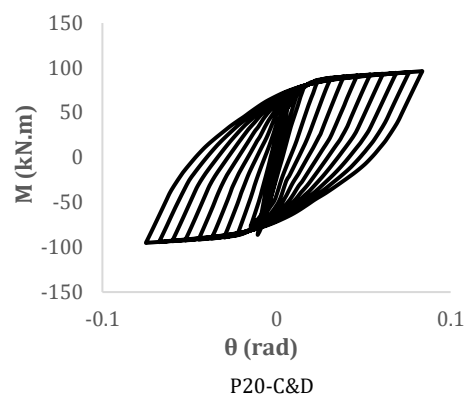
۷-۴-۳- عدم تعبیه هم‌زمان ورق‌های پیوستگی و مضاعف در ستون

در این بخش، تأثیر حذف هم‌زمان ورق‌های پیوستگی و ورق‌های مضاعف جان ستون بر عملکرد اتصال مورد بررسی قرار گرفت. در شکل (۱۸)، توزیع کرنش پلاستیک معادل نمونه P20-C&D نشان داده شده است. نتایج این بخش، اهمیت رعایت سلسله‌مراتب مقاومت در طراحی اتصال را نیز تأیید می‌کند. در مدل مینا، افزایش ظرفیت مؤثر ستون از طریق مقطع مناسب و استفاده از ورق‌های پیوستگی و مضاعف با هدف جلوگیری از تمرکز تغییر شکل‌های غیرالاستیک در ستون انجام شد. در مقابل، حذف هم‌زمان این اجزای تقویتی موجب کاهش ظرفیت خمشی اتصال به میزان ۴۲/۸۲ درصد و کاهش جذب انرژی به میزان ۴۵/۵۶ درصد شد و مطابق توزیع کرنش پلاستیک، تمرکز آسیب از ناحیه فیوز به ستون انتقال یافت. بنابراین، در اتصال پیشنهادی، کنترل نسبت ظرفیت اعضای اصلی و تقویت مناسب ناحیه اتصال، بخش جدایی‌ناپذیر طراحی بر اساس اصل ظرفیت و تحقق مکانیزم مورد نظر اتصال است.



شکل ۱۸- توزیع کرنش پلاستیک معادل (PEEQ) در اتصال پیشنهادی P20-C&D

این اجزا به‌تنهایی تنها کاهش محدودی در عملکرد ایجاد می‌کند، اما حذف هم‌زمان آن‌ها باعث افت چشمگیر مقاومت و عملکرد لرزه‌ای اتصال می‌گردد. بر این اساس، مدل P20 در میان مدل‌های بررسی‌شده، رفتار هیستریزیس پایدار و ظرفیت خمشی بالای نشان داد.



شکل ۲۰- منحنی‌های هیستریزیس لنگر-دوران مدل‌های P20،

P20-C&D و P20-D، P20-C

نتایج نمودار هیستریزیس شکل (۲۰)، نشان می‌دهد که حضور هم‌زمان اجزای ورق‌های پیوستگی و ورق‌های مضاعف (C و D) نقش اساسی در تأمین ظرفیت خمشی، حفظ سختی اولیه، افزایش شکل‌پذیری و بهبود اتلاف انرژی اتصال دارد. حذف هر یک از

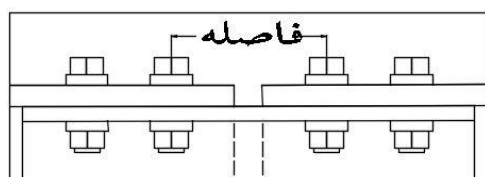
جدول ۹- مقایسه ظرفیت خمشی و انرژی جذب‌شده در مدل‌های دارای ورق‌های پیوستگی و مضاعف

مدل	ورق‌های پیوستگی	ورق‌های مضاعف	جذب انرژی (kN.m)	کاهش جذب انرژی نسبت به مدل مبنا (%)	ظرفیت خمشی (kN.m)	کاهش ظرفیت خمشی نسبت به مدل مبنا (%)
P20	☑	☑	۱۲/۴۸۳	-	۱۶۹/۱	-
P20-C&D	☒	☒	۶/۷۹۵	۴۵/۵۶	۹۶/۶۹	۴۲/۸۲
P20-C	☒	☑	۱۲/۱۰۵	۳/۰۲۸	۱۶۲/۳۲	۴/۰۰۹
P20-D	☑	☒	۱۱/۲۱۸	۱۰/۱۳۴	۱۶۱/۶۸	۴/۳۹

*منظور از نمونه مبنا، P20 است.

۷-۵- بررسی میزان فاصله میان دو لبه آزاد تیر

در طراحی اتصال، طول ناحیه تضعیف‌شده برابر با فاصله از مرکز نزدیک‌ترین پیچ تا انتهای تیر در نظر گرفته می‌شود. این فرض بر این مبنا استوار است که نیروی پیش‌تندگی پیچ‌ها، که تماس فشرده میان اجزای اتصال را تأمین می‌کند، با افزایش فاصله از مرکز پیچ به‌تدریج کاهش می‌یابد. این فاصله به‌عنوان یکی از پارامترهای هندسی مؤثر بر رفتار ناحیه اتصال در نظر گرفته شد و اثر آن بر ظرفیت خمشی، جذب انرژی و توزیع کرنش پلاستیک بررسی شد. این فاصله در شکل (۲۱) ارائه شده است.

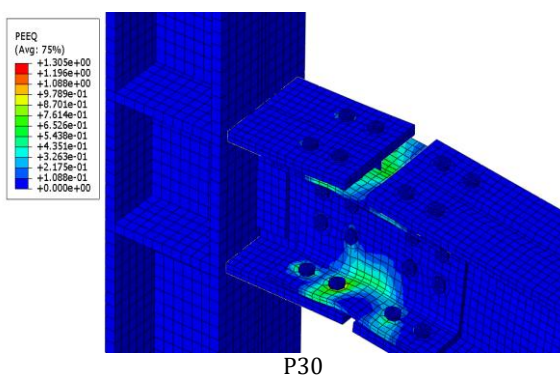
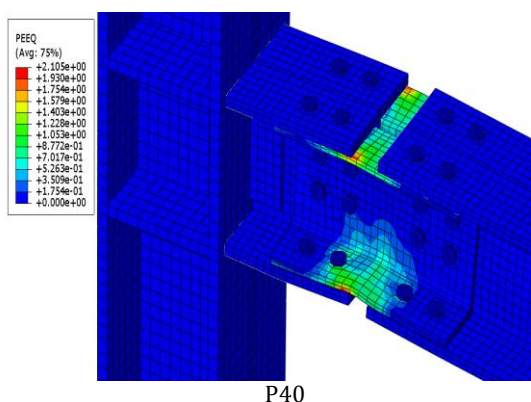


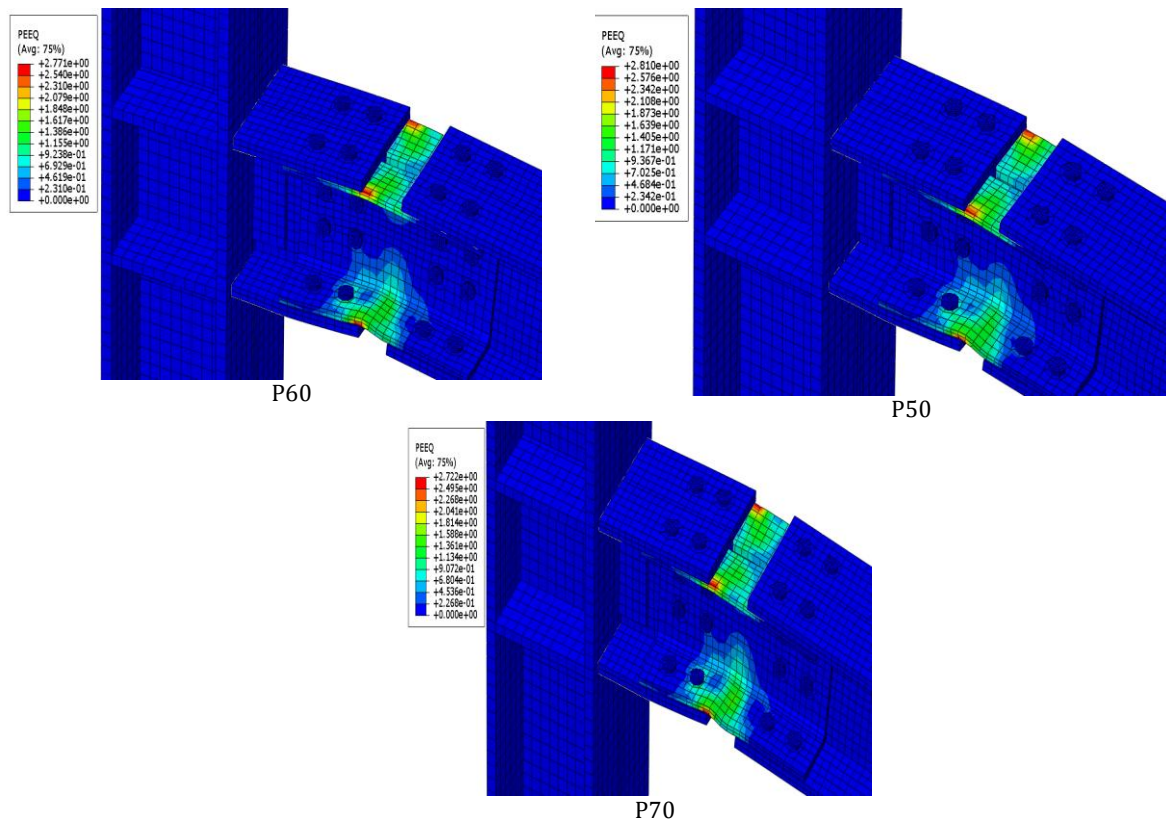
شکل ۲۰- نمایش از فاصله میان دو لبه آزاد تیر

بر اساس نتایج تحلیل انجام‌شده، حذف هم‌زمان ورق‌های پیوستگی و مضاعف مدل P20-C&D به‌ترتیب موجب کاهش ۴۵/۵۶ درصدی جذب انرژی و ۴۲/۸۲ درصدی ظرفیت خمشی نسبت به مدل مبنا می‌شود که بیانگر تأثیر هم‌زمان این دو مؤلفه است. همچنین حذف انفرادی ورق‌های پیوستگی مدل P20-C تأثیر ناچیزی حدود ۳/۰۲۸ درصد بر هر دو معیار دارد؛ درحالی‌که حذف انفرادی ورق‌های مضاعف مدل P20-D حدود ۱۰/۱۳۴ درصدی کاهش جذب انرژی را به‌همراه دارد. بنابراین در طراحی بهینه، ورق‌های مضاعف نقش کلیدی‌تری در جذب انرژی ایفا می‌کنند؛ درحالی‌که برای حفظ ظرفیت خمشی، وجود حداقل یکی از دو نوع ورق، ضروری است. در شرایط محدودیت وزن یا اجراء حذف ورق‌های پیوستگی نسبت به حذف ورق‌های مضاعف با افت عملکرد کم‌تری همراه خواهد بود.

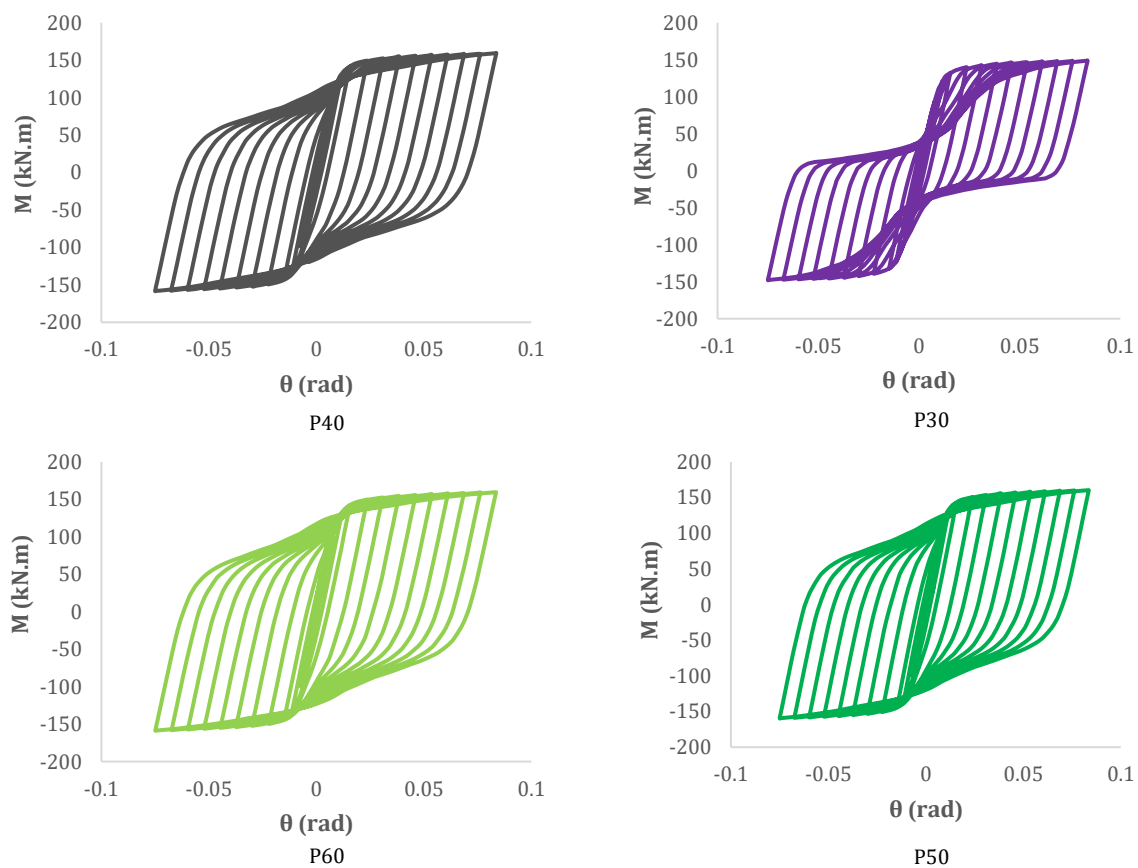
مدل‌های بررسی شده نشان می‌دهد. ظرفیت خمشی این مدل برابر $148/02$ کیلونیوتن متر است؛ درحالی‌که ظرفیت خمشی مدل مبنا P20 برابر با $169/1$ کیلونیوتن متر به‌دست آمده است. همچنین، جذب انرژی در P30 برابر $10/918$ کیلونیوتن متر و در مدل P20 برابر $12/483$ کیلونیوتن متر است. این نتایج نشان می‌دهد که تغییر فاصله از مقدار مبنای 20 میلی‌متر به 30 میلی‌متر، صرفاً یک تغییر هندسی ساده نبوده و بر پاسخ کلی اتصال اثرگذار است. در مدل‌های P40 تا P70 تغییرات ظرفیت خمشی و جذب انرژی، روند کاملاً یکنواختی نشان نمی‌دهد. بر اساس نتایج، ظرفیت خمشی P40، P50، P60 و P70 به‌ترتیب برابر $162/55$ ، $163/47$ و $160/2$ کیلونیوتن متر و جذب انرژی آن‌ها به‌ترتیب برابر $11/987$ ، $12/171$ ، $12/267$ و $11/930$ کیلونیوتن متر است. بنابراین، افزایش فاصله پس از 30 میلی‌متر، الزاماً موجب افزایش یکنواخت ظرفیت خمشی یا جذب انرژی نمی‌شود و اثر این پارامتر باید هم‌زمان از نظر ظرفیت، سختی و نحوه توزیع کرنش پلاستیک ارزیابی شود. در مجموع، نتایج نشان می‌دهد که تغییر فاصله بین دو لبه آزاد تیر در محدوده بررسی شده، ضمن حفظ تمرکز اصلی کرنش پلاستیک در فیوز ناودانی، بر سختی اولیه، ظرفیت خمشی و جذب انرژی اتصال نیز اثرگذار است. رفتار متفاوت P30 نسبت به مدل P20 و سایر مدل‌ها را می‌توان در چارچوب اثر هندسی این فاصله بر نحوه انتقال نیرو و توزیع تغییرشکل در ناحیه تعویض‌پذیر تفسیر نمود. از این رو، تفاوت مشاهده‌شده در P30 در این مطالعه به‌عنوان بخشی از پاسخ پارامتریک اتصال در نظر گرفته شده است.

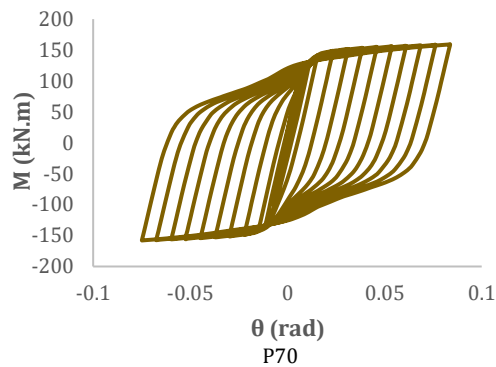
این فاصله با توجه به قطر پیچ و ضرورت رعایت حداقل فاصله مناسب از مرکز سوراخ تا لبه فیوز شبه‌ناودانی و همچنین فراهم‌سازی فضای کافی برای چرخش تیر حول محور فیوز، در مدل مبنا P20 برابر 20 میلی‌متر در نظر گرفته شده است. به‌منظور بررسی اثر این پارامتر بر رفتار اتصال، فاصله بین دو لبه آزاد تیر در مدل‌های P30، P40، P50، P60 و P70 به‌ترتیب برابر 30 ، 40 ، 50 ، 60 و 70 میلی‌متر در نظر گرفته شد. در این بررسی سایر مشخصات هندسی، مصالح، شرایط تماس و بارگذاری مدل‌ها ثابت نگه داشته شد. شکل (۲۲) توزیع کرنش پلاستیک معادل را در مدل‌های مختلف نشان می‌دهد. در مدل P30 با فاصله 30 میلی‌متر، کرنش پلاستیک معادل عمدتاً در ناحیه فیوز شبه‌ناودانی متمرکز شده و تیر و ستون اصلی در محدوده الاستیک باقی مانده‌اند. باین‌حال، نحوه توزیع کرنش پلاستیک در این مدل با مدل‌های دارای فاصله بیشتر، متفاوت است. با افزایش فاصله به 40 میلی‌متر در مدل P40، تمرکز کرنش پلاستیک در ناحیه فیوز منظم‌تر شده و این روند در مدل P50 نیز مشاهده می‌شود. در مدل‌های P60 و P70 نیز، با وجود تغییر فاصله، تمرکز اصلی کرنش پلاستیک در ناحیه مرکزی فیوز حفظ شده است. تفاوت مشاهده‌شده در رفتار P30 را می‌توان با توجه به اثر تغییر هندسی فاصله بین دو لبه آزاد تیر بر ناحیه انتقال نیرو و نحوه گسترش تغییرشکل در مجاورت عضو تعویض‌پذیر تفسیر نمود. این تغییر هندسی می‌تواند بر سختی اولیه، ظرفیت خمشی و نحوه توزیع کرنش پلاستیک در ناحیه فیوز اثرگذار باشد. بر اساس منحنی‌های لنگر-دوران شکل (۲۳)، مدل P30 کم‌ترین سختی اولیه و پایین‌ترین ظرفیت خمشی را در میان



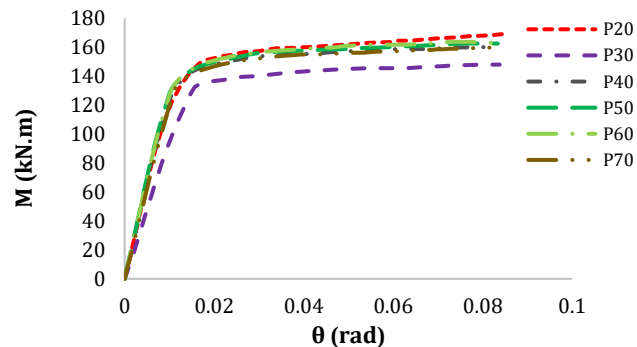


شکل ۲۱- توزیع کرنش پلاستیک مدل‌های P30, P40, P50, P60 و P70





شکل ۲۲- نمودار چرخه‌ای مدل‌های P30, P40, P50, P60 و P70



شکل ۲۳- نمودار پوش از مدل‌های P20, P30, P40, P50, P60 و P70 با فواصل بین دو لبه آزاد تیر

تا ۱۵ درصد کم‌تر از P20 است. همچنین، نمونه‌های P50, P60, P40 و P70 عملکرد بسیار نزدیک به یکدیگر داشته و ظرفیت نهایی آن‌ها در بازه ۱۵۸ تا ۱۶۴ کیلونیوتن متر قرار می‌گیرد؛ به‌طوری‌که اختلاف ظرفیت بین این چهار نمونه، کم‌تر از ۴ درصد است. بنابراین، افزایش پارامتر فاصله پس از مقدار ۴۰ بهبود قابل توجهی در ظرفیت خمشی ایجاد نمی‌کند و P20 به‌عنوان گزینه بهینه، مناسب‌ترین ترکیب از مقاومت، پایداری و شکل‌پذیری را در بین نمونه‌های مورد بررسی ارائه داده است.

نتایج منحنی‌های لنگر-دوران شکل (۲۴) نشان می‌دهد که تغییر پارامتر فاصله، تأثیر مستقیمی بر عملکرد خمشی اتصال دارد. در میان تمامی نمونه‌ها، نمونه P20 با دست‌یابی به بیش‌ترین ظرفیت خمشی نهایی (حدود ۱۷۰ کیلونیوتن متر) و حفظ روند سخت‌شدگی تا پایان بارگذاری، بهترین عملکرد را از نظر مقاومت و پایداری نشان داده است. در مقابل، P30 با ظرفیت نهایی حدود ۱۴۸ کیلونیوتن متر، کم‌ترین سختی اولیه و پایین‌ترین مقاومت خمشی را داشته و ضعیف‌ترین رفتار را ارائه می‌کند؛ به‌گونه‌ای که ظرفیت آن حدود ۱۳

جدول ۱۰- نتایج تحلیل عددی اتصال پیشنهادی

مدل	t (mm)	M_f (kN.m)	M_{p-beam} (kN.m)	$\frac{M_f}{M_{p-beam}}$	M (kN.m)	M_{pr} (kN.m)	$\frac{M}{M_f}$
P30	۱۰	۱۷۷/۳۱	۱۹۴/۱۵	۰/۹۱	۱۴۸/۰۲	۱۵۲/۷۰	۰/۸۴
P40	۱۰	۱۷۱/۰۲	۱۹۴/۱۵	۰/۸۸	۱۶۰/۳	۱۵۲/۷۰	۰/۹۲
P50	۱۰	۱۶۷/۳۶	۱۹۴/۱۵	۰/۸۶	۱۶۲/۵۵۵	۱۵۲/۷۰	۰/۹۷
P60	۱۰	۱۶۴/۹۲	۱۹۴/۱۵	۰/۸۵	۱۶۳/۴۷	۱۵۲/۷۰	۰/۹۹
P70	۱۰	۱۶۳/۱۷	۱۹۴/۱۵	۰/۸۴	۱۶۰/۲	۱۵۲/۷۰	۰/۹۸

اتصال (M_f) از ۱۷۷/۱۳ به ۱۶۳/۱۷ کیلونیوتن متر کاهش یافته و نسبت ($\frac{M_f}{M_{p-beam}}$) نیز از ۰/۹۱ به ۰/۸۴ رسیده است که بیانگر کاهش تدریجی ظرفیت نسبی اتصال نسبت به ظرفیت پلاستیک

در تمامی مدل‌ها ضخامت بال فیوز برابر با ۱۰ میلی‌متر بوده و تنها پارامتر فواصل بین دو لبه آزاد تیر تغییر نموده است. نتایج نشان داد که با افزایش شماره مدل P30 به P70، ظرفیت خمشی

پژوهش، مدل P20 بهترین عملکرد کلی را از نظر رفتار سازه‌ای و شاخص‌های ارزیابی از خود نشان داده است و مدل‌های ارائه‌شده در جدول (۱۱) نسبت به آن عملکرد ضعیف‌تری داشتند.

تیر است. در مقابل، مقدار لنگر نهایی (M) تا مدل P60 افزایش یافته و سپس در مدل P70 اندکی کاهش یافته است. همچنین نسبت $(\frac{M}{M_{pr}})$ از ۰/۸۴ در مدل P30 و در مدل P70 ۰/۹۹ افزایش یافته که نشان‌دهنده بهبود بهره‌برداری از ظرفیت اتصال در این بازه است. با این حال، با در نظر گرفتن نتایج تمامی مدل‌های

جدول ۱۱- میزان جذب انرژی و ظرفیت باربری نمونه‌ها با فواصل بین دو لبه آزاد تیر ۲۰ الی ۷۰ میلی‌متر

ظرفیت خمشی (kN.m)	جذب انرژی (kN.m)	فاصله بین دو لبه آزاد تیر (mm)	نمونه‌ها
۱۶۹/۱	۱۲/۴۸۳	۲۰	P20
۱۴۸/۰۲	۱۰/۹۱۸	۳۰	P30
۱۶۰/۳	۱۱/۹۸۷	۴۰	P40
۱۶۲/۵۵۵	۱۲/۱۷۱	۵۰	P50
۱۶۳/۴۷	۱۲/۲۶۷	۶۰	P60
۱۶۰/۲	۱۱/۹۳۰	۷۰	P70

مکانیزم تشکیل مفصل پلاستیک: نتایج تحلیل‌ها نشان داد که در اتصال پیشنهادی، مفصل پلاستیک عمدتاً در المان فیوز (ناودانی) متمرکز می‌شود و تیر و ستون در محدوده الاستیک باقی ماندند. این موضوع که با استفاده از شاخص کرنش پلاستیک معادل (PEEQ) در نرم‌افزار Abaqus تأیید شد، نشان‌دهنده تحقق هدف اصلی طراحی یعنی قابلیت تعویض‌پذیری اتصال پس از زلزله شد.

اهمیت طراحی بر اساس اصل ظرفیت: بال تیر؛ در نمونه‌هایی که ضخامت بال تیر کمتر از بال فیوز بود (مانند P20-tf10)، کرنش‌های پلاستیک به جای فیوز در بال تیر متمرکز شدند که منجر به آسیب در عضو اصلی و از بین رفتن قابلیت تعویض‌پذیری شد. با افزایش بال تیر (P20-tf12)، تمرکز تنش به سمت فیوز هدایت شد. این امر ضرورت محکم‌تر بودن اعضای اصلی نسبت به فیوز را تأیید می‌نماید.

جان تیر؛ کاهش ضخامت جان تیر (P20-tw5) علی‌رغم تشکیل مفصل در فیوز، منجر به اعوجاج قابل توجه در جان تیر شد. افزایش ضخامت جان به (P20-tw6) ضمن حفظ مکانیزم جاری شدن در فیوز، پایداری جان را بهبود بخشید. بر این اساس، رعایت نسبت‌های پهنا به ضخامت (حداکثر ۳۳٪ مطابق آیین‌نامه) برای جلوگیری از ناپایداری موضعی ضروری است.

نقش حیاتی ورق‌های پیوستگی و مضاعف در ستون: عدم استفاده از ورق پیوستگی، در مدل P20-C نشان داد که باعث کم‌انرژی موضعی بال ستون در اثر نیروهای کششی و فشاری وارده از تیر شد. عدم استفاده از ورق مضاعف در مدل P20-D نشان داد

تفاوت رفتار مدل P30 با مدل مینا P20 و سایر مدل‌ها را می‌توان با توجه به اثر تغییر فاصله بین دو لبه آزاد تیر بر هندسه ناحیه انتقال نیرو و نحوه گسترش تغییر شکل در اطراف عضو تعویض‌پذیر تفسیر نمود. نتایج منحنی‌های لنگر-دوران نشان می‌دهد که P30 دارای کم‌ترین سختی اولیه و پایین‌ترین ظرفیت خمشی در میان مدل‌های بررسی شده است. همچنین، اگرچه کرنش پلاستیک معادل در P30 عمدتاً در ناحیه فیوز ناودانی متمرکز باقی می‌ماند، نحوه تعویض آن با مدل‌های P40 و P50 متفاوت است. ظرفیت خمشی و جذب انرژی P30 به ترتیب ۱۴۸/۰۲ کیلو نیوتن متر و ۱۰/۹۱۸ کیلو نیوتن متر بوده، در حالی که این مقادیر برای مدل مینا P20 به ترتیب ۱۶۹/۱ کیلو نیوتن متر و ۱۲/۴۸۳ کیلو نیوتن متر است. با افزایش فاصله به مقادیر بالاتر، توزیع کرنش پلاستیک در ناحیه فیوز منظم‌تر شده است. بنابراین، تفاوت پاسخ P30 را می‌توان در چارچوب اثر هندسی فاصله بین لبه‌های آزاد تیر بر نحوه انتقال نیرو، سختی اولیه و توزیع تغییر شکل در ناحیه تعویض‌پذیر تفسیر کرد.

۸- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، عملکرد لرزه‌ای یک اتصال خمشی فولادی با قابلیت تعویض‌پذیری، با استفاده از المان فیوز ناودانی، تحت بارگذاری چرخه‌ای مورد بررسی عددی قرار گرفت. منظور از این پژوهش، ارزیابی امکان تمرکز خرابی در فیوز و حفظ رفتار الاستیک در تیر و ستون بود. نتایج این مطالعه را می‌توان در محورهای زیر خلاصه نمود:

که منجر به اعوجاج شدید در جان ستون در ناحیه چشمه اتصال شد و حذف هم‌زمان هر دو ورق در مدل P20-G&D نشان داد که سبب تمرکز کامل خرابی در ستون و باقی‌ماندن فیوز در محدوده الاستیک شد که عملکرد کاملاً مغایر با هدف طراحی داشت.

بر اساس نتایج کمی، حذف ورق‌های مضاعف و پیوستگی به‌ترتیب موجب کاهش $10/13$ و $3/02$ درصدی در جذب انرژی و کاهش $4/39$ و $4/00$ درصدی در ظرفیت خمشی نسبت به مدل مبنا P20 دارد. در مدل P20-G&D، این کاهش به‌ترتیب به $45/56$ و $42/82$ درصدی رسید که نشان‌دهنده تأثیر چشم‌گیر این المان‌ها در عملکرد کلی اتصال است.

درنهایت، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که اتصال پیشنهادی با فیوز ناودانی، در صورت رعایت ضوابط طراحی مبتنی بر اصل ظرفیت به‌ویژه بالاتر بودن ظرفیت اعضای اصلی نسبت به ظرفیت فیوز و استفاده از ورق‌های پیوستگی و مضاعف در ناحیه چشمه اتصال، می‌تواند به‌عنوان یک اتصال خمشی با قابلیت تعویض‌پذیری بالا، رفتار لرزه‌ای مطلوبی از خود نشان داده و هزینه‌های تعمیرات پس از زلزله را به‌طور قابل‌توجهی کاهش دهد.

نتایج فاصله بین دو لبه آزاد تیر نشان داد که افزایش این فاصله از 20 به 60 میلی‌متر موجب بهبود عملکرد اتصال شده است. ظرفیت خمشی از $169/1$ به $163/74$ کیلونیوتن متر تغییر کرد و درعین حال تمرکز کرنش پلاستیک همچنان در فیوز حفظ شد. در بین نمونه‌های بررسی‌شده، مدل P60 با جذب انرژی $12/27$ کیلونیوتن متر و ظرفیت خمشی $163/74$ کیلونیوتن متر مناسب‌ترین رفتار را از نظر تعادل میان مقاومت، شکل‌پذیری و تمرکز آسیب نشان داد. پس از آن، افزایش فاصله تا 70 میلی‌متر سبب کاهش نسبی عملکرد شد.

۹- تقدیر و تشکر

بدین‌وسیله از راهنمایی‌های ارزشمند و بی‌دریغ جناب آقای دکتر پیام طریقی در طول انجام این پژوهش صمیمانه قدردانی و سپاس‌گذاری می‌نمایم.

- [12] Kamgar, R., Mahmoudy, S.A., and Zakavi, R. (2024), "Evaluation of Steel Frame Equipped with the Replaceable Shear Link Made of Shape Memory Alloy under the Impact Load", *Journal of Rehabilitation in Civil Engineering*, 12(4), pp.66–85.
- [13] Mahmoudi, F., and Tehrani, P. (2020), "A Technique for Seismic Rehabilitation of Damaged Steel Moment Resisting Frames", *Journal of Rehabilitation in Civil Engineering*, 8(4), pp.106–117.
- [14] He, X., Chen, Y., Eatherton, M.R., and Shao, T. (2018), "Experimental Evaluation of Replaceable Energy Dissipation Connection for Moment-Resisting Composite Steel Frames", *Journal of Structural Engineering*, 144(6), p.04018042.
- [15] Chen, X., Li, S., Liang, G., and He, M. (2024), "Numerical Parameter Analysis of High-Strength Steel Frame with Y-Eccentric Brace Using Variable Replaceable Link", *Buildings*, 14(9), p.2149.
- [16] Yuanal, P.S., Moestopo, M., Kusumastuti, D., and Suarjana, M. (2025), "Improving the Seismic Performance of Steel Moment Connections Using an Interlock Mechanism as a Replaceable Fuse Element: Numerical Study", *Research Square*. (Preprint).
- [17] Goshtaei, S.M., Moradi, S., and Hossain, K.M.A. (2024), "Multi-Objective Optimization of Energy-Dissipating Steel Plate Fuse Links Using Response Surface Method", *Structures*, 62, p.106224.
- [18] Richards, P.-W., and Lee, H. (2024), "Special Moment Frame Connections with Shear-Yielding Haunches", *Engineering Structures*, 304, p.117635.
- [19] Jalali, M.A., and Rafiee, A. (2024), "Performance Evaluation of Bolted Moment Frame with Reduced Beam Section", *Scientific-Research Journal of Structural Engineering & Construction*, 11(2), pp.168–185. (In Persian)
- [20] Xiong, L., Guo, Z., Cai, J., Jiang, K., and Li, L. (2024), "Seismic Performance of the Replaceable Steel Links with Different Short Length Ratios", *Scientific Reports*, 14, p.29976.
- [21] Min Ro, K., Kim, M.S., and Lee, Y.H. (2024), "An Experimental Study on the Seismic Performance of a Replaceable Steel Link System Acting as a Structural Fuse", *Applied Sciences*, 14, p.2358.
- [22] Pratap, M., and Vesmawala, G.R. (2023), "The State-of-the-Art Review on Development of Replaceable Fuse Components in Resilient Moment-Resisting Frame", *Structures*, 56, p.104888.
- [23] Lan, T., Li, R., Jiang, Z.Q., Zhang, H., and Wang, H.W. (2020), "Experimental Study of Earthquake-Resistant Steel Channel Beam-Column Joint with Double FCPs", *Journal of Constructional Steel Research*, 175, p.106356.
- [24] Wu, D., Liang, Y., Liu, H., and Peng, S. (2025), "Behavior of Demountable and Replaceable Fabricated RC Beam with Bolted Connection under Mid-Span Compression", *Buildings*, 15(15), p.2589.
- [25] Park, S., Gilroy, J., Clayton, P., Dundore, A., and Acevedo, S. (2026), "Effects of Column Design Variations on Seismic Performance of Steel
- [1] Kafi, M.A., and Ebrahimi, F. (2023), "Numerical Evaluation of Fixed Connection with Replaceable Corners in Tree-Shaped Bending Frames", *Scientific & Research Journal of Structures and Steel*, 32(39). (In Persian)
- [2] Gharaili, A.R., Saroghad Moghadam, A.R., Darwishan, A., and Kowsarieh, H. (2022), "Laboratory and Numerical Study of Steel Flexural Frames with Fuse Pins & Frictional Screw-Type Damping Connections", *Scientific and Research Journal of Structures and Steel*, 28(35). (In Persian)
- [3] Zarfam, P., Javadi, P., and Safarizadeh, B. (2022), "Laboratory Study of RBS Connection Using Interchangeable Can-Shaped Joints at the Joint Formation Site", *Scientific Research Journal of Structural & Manufacturing Engineering*, 9(1), pp.95–113. (In Persian)
- [4] Soltani, S., Javaheri Tafti, M.R., and Weter, M.Q. (2023), "Numerical Analysis of Fuses with Simple Interchangeability in Divergent Frames and Determination of Behavior Coefficient by Energy Method", *Scientific & Research Journal of Structures and Steel*, 32(39). (In Persian)
- [5] Zarfam, P., Golnavaz, A., and Azimi-Nejad, A. (2023), "Laboratory Evaluation of Reduced Beam Section Connection in Flexural Frames Using Interchangeable I-Shaped Links", *Journal of Earthquake Science & Engineering*, 10(2). (In Persian)
- [6] Bawandi, M., Saroghad Moghadam, A.R., Mansouri, M.R., and Azimi Nejad, A. (2021), "Proposed Repairability Index for Steel Flexural Frames with Centripetal Post-Tensioned Connections under Off-Fault Earthquakes", *Scientific & Research Journal of Structures and Steel*, 24(31). (In Persian)
- [7] Rasaie, B., and Mosaddegh, I. (2025), "Hysteretic Behavior of Replaceable Connectors in Steel Frames with Reduced Section Methods", *TechRxiv*. (Preprint).
- [8] Özkılıç, Y.O. (2020), "A New Replaceable Fuse for Moment Resisting Frames: Replaceable Bolted Reduced Beam Section Connection", *Steel & Composite Structures*, 35(3), pp.353–370.
- [9] Li, T., Men, J., Zhang, Q., Li, J., and Huang, C.H. (2024), "Seismic Fragility and Resilience Assessment of Steel Frame with Replaceable T-Stub Connection Components", *Engineering Structures*, 314, p.118396.
- [10] Sun, D., and Yang, Y. (2021), "Experimental Study on Seismic Performance of Prefabricated Replaceable Beam-Column Connectors Using Double-Sided Angle Steel", *The 17th World Conference on Earthquake Engineering*, Sendai, Japan.
- [11] Sweeney, N., and Siah Polo, N. (2021), "Study of the Effect of Geometry Parameters of Replaceable Bolted Shear Connection Beam with Web Connection against Cyclic Loading", *Scientific-Research Journal of Structural Engineering & Construction*, 8(9), pp.31–48. (In Persian)

Moment-Resisting Frames with Fuse Connections', Thin-Walled Structures, 222, p.114565.

- [26] European Committee for Standardization (CEN) (2018), EN 1998-1: Eurocode 8: Design of Structures for Earthquake Resistance – Part 1: General Rules, Seismic Actions and Rules for Buildings. Working Draft. Brussels: European Committee for Standardization.
- [27] Menghini, A., Kanyilmaz, A., Castiglioni, C.A., and Calado, L. (2025), "A Dissipative Replaceable Bracing Component for Steel-Composite Building Frames", Structures, 76, p.108941.
- [28] Peng, X., Li, Z., Rong, B., Wang, K., Zhang, R., Liu, J., Sun, Y., Zhang, W., and Wu, H. (2025), "Seismic Performance of Post-Earthquake Repaired End-Plate Connections", Structures, 80, p.109687.
- [29] Tarighi, P., Kafi, M.A., and Vahdani, R. (2024), "Experimental Investigation of the Performance of Replaceable-Rigid Connection", Sharif Journal of Civil Engineering, 39(4), pp.3–17. (In Persian)
- [30] Road, Housing and Urban Development Research Center (2022), Topic 10 of the National Building Regulations: Design and Construction of Steel Buildings. 5th edn. Tehran: Road, Housing and Urban Development Research Center. (In Persian)
- [31] Prequalified Connections for Special and Intermediate Steel Moment Frames for Seismic Applications, An American National Standard, ANSI/AISC 358-16.
- [32] Tarighi, P., and Kafi, M.A. (2025), "Numerical Evaluation of the Behavior of Fixed Connection Using Fusible Splice Plates in Steel Flexural Frames under Cyclic Loading", Journal of Structural & Construction Engineering, 12(5), pp.198–224. (In Persian)
- [33] FEMA-350 (2000). "Recommended Seismic Design Criteria For New Steel Moment – Frame Buildings", Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C.