

Research Article

Seismic Performance of Welded Unreinforced Flange–Welded Web (WUF-W) Connections to Box Columns with Continuity Plates Using Complete Joint Penetration Groove Welds and Electroslag Welding

Seyed Ali Razavi Tabatabaei^{1*}, Amin Kermani²

1- Assistant Professor, Structural Engineering, Faculty of Engineering, University of Science and Culture, Tehran, Iran

2- Master of Science Student in Structural Engineering, Faculty of Engineering, University of Science and Culture, Tehran, Iran



Citation: Razavi Tabatabaei, S.A., and Kermani, A. (2026), "Seismic Performance of Welded Unreinforced Flange–Welded Web (WUF-W) Connections to Box Columns with Continuity Plates Using Complete Joint Penetration Groove Welds and Electroslag Welding", *Journal of Steel & Structures*, 20(54), pp.5-21. (in Persian)

doi <https://doi.org/10.22034/jss.2026.605849.1064>

Article info:

Article History:

Received: 13 August 2026

Revised: 10 October 2026

Accepted: 20 October 2026

Published: 22 December 2026

Keywords:

Beam-to-Box-Column Connection
Internal Continuity Plate
Electroslag Welding
Cyclic Behavior
Plastic Hinge
Steel Moment-Resisting Frame

ABSTRACT

Background: Beam-to-box-column connections are considered among the critical regions of steel moment-resisting frames due to the limitations associated with the installation of internal continuity plates, and their seismic performance depends on the reliability of construction details. In this study, the effect of the installation method of horizontal continuity plates on the cyclic behavior of beam-to-box-column connections and their ability to develop the desirable weak-beam-strong-column mechanism was investigated.

Methods: For this purpose, two full-scale beam-to-box-column connection specimens were designed, fabricated, and subjected to cyclic loading in accordance with the AISC 341-22 loading protocol. Both specimens had similar geometry and structural characteristics, with the main difference being the method used to connect the internal continuity plate to the column wall. Electroslag welding (ESW) was used in specimen N01, whereas shielded metal arc welding (SMAW) was employed in specimen N02. After fabrication, the quality of the welds in the connection region was inspected, and the hysteretic behavior, envelope curves, failure mechanisms, and energy dissipation capacities of the specimens were evaluated.

Results: The results showed that, despite weld quality control, premature damage occurred in the connection region of specimen N01. Fracture of the continuity-plate weld at a drift ratio of approximately 1.5% led to damage concentration in the connection and prevented the development of a significant plastic hinge in the beam. This specimen reached only approximately 0.7 times the nominal plastic moment capacity of the beam (0.7Mp), whereas specimen N02, through the development of plastic deformations in the beam, reached approximately 1.3 times the nominal plastic moment capacity (1.3Mp). In addition, the post-yield stiffness ratios of specimens N01 and N02 were approximately -1% and 7.8%, respectively. The cumulative dissipated energy of specimen N02 was approximately 232 kJ, which was about 1.8 times the 128 kJ obtained for specimen N01.

Conclusion: The results demonstrated that merely providing the required strength of the connection components and confirming the initial weld quality cannot guarantee satisfactory seismic performance of box-column connections. The sensitivity of internal construction details can alter the damage-development path and prevent full utilization of the beam capacity. Therefore, developing connection details with improved quality-control capability and higher reliability can play an important role in enhancing the seismic performance of such connections.

* 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 critical components of steel moment-resisting frames because force transfer, inelastic deformation, and seismic energy dissipation are strongly influenced by the behavior of the connection region. In beam-to-box-column connections, internal continuity plates are commonly used to transfer beam-flange forces to the column walls and to control local deformation. However, the closed geometry of box columns restricts access to the interior of the section and makes fabrication, welding, inspection, and quality control of these internal details more difficult. Previous studies have emphasized the importance of continuity-plate configuration, weld quality, and proper force-transfer mechanisms in achieving reliable cyclic performance. Premature damage within the connection region may prevent the beam from developing its expected plastic capacity and may inhibit the desirable weak-beam-strong-column mechanism. The present study experimentally investigates two full-scale beam-to-box-column connections with identical structural configurations but different methods of connecting the internal horizontal continuity plates to the column walls. The main objective is to evaluate how construction details and weld reliability affect damage development, plastic-hinge formation, post-yield response, and energy dissipation. Particular attention is given to the occurrence of premature damage in a specimen that had undergone weld quality-control inspection, as this issue directly reflects the sensitivity of internal connection details under cyclic loading.

Methods

Two full-scale specimens, designated N01 and N02, were designed and fabricated with the same overall geometry and structural characteristics. Both specimens used a built-up beam section PG300×8-200×15 and a BOX300×300×15 column. Horizontal continuity plates were installed inside the box column at the beam-flange levels. The

main difference between the specimens was the welding procedure used to connect the continuity plates to the column walls. Electroslag welding (ESW) was used in specimen N01, whereas shielded metal arc welding (SMAW) was used in specimen N02. After fabrication, the welds in critical regions were inspected using ultrasonic testing as part of the quality-control procedure. The specimens were then subjected to displacement-controlled reversed cyclic loading according to the AISC 341-22 protocol. Applied forces and displacements were recorded to evaluate hysteretic behavior, moment-rotation envelope curves, strength characteristics, post-yield stiffness, failure mechanisms, and cumulative energy dissipation. The envelope curves were normalized by the nominal plastic moment capacity of the beam, (M_p), to assess the extent to which each specimen mobilized the beam plastic capacity. In addition, a three-dimensional finite-element model of specimen N02 was developed in Abaqus using C3D8R solid elements and a combined isotropic-kinematic hardening model. The numerical model was subjected to boundary conditions and cyclic loading consistent with the experiment, and its moment-rotation response and plastic deformation pattern were compared with the test results.

Results

The two specimens exhibited distinct responses after entering the nonlinear range. Specimen N01 initially showed increasing resistance; however, premature damage developed in the connection region before a stable plastic mechanism could form in the beam. With increasing cyclic deformation, localized deformation of the column face and damage to the connection region progressively increased. At approximately 3% drift, severe damage to the column face was accompanied by significant strength deterioration. Since the internal electroslag weld was not directly monitored during testing, the exact location and sequence of fracture initiation could not be conclusively determined. Post-test observations confirmed that a significant plastic hinge had not developed in the beam, indicating that

the intended weak-beam–strong-column mechanism was not achieved. These findings highlight the sensitivity of the connection response to localized damage despite prior weld quality-control inspection. In contrast, specimen N02 maintained a more stable hysteretic response and allowed inelastic deformation to develop progressively in the beam. Local buckling of the beam flange and expansion of the plastic region were observed at larger drift levels while the connection continued to transfer forces without premature failure. The maximum moment resistance was approximately 164 kN·m for N01 and 324 kN·m for N02. Normalized envelope curves showed that N01 reached only about (0.7Mp), indicating that premature connection failure prevented full mobilization of the beam plastic capacity. In contrast, N02 exceeded the nominal plastic moment and reached about (1.3Mp), demonstrating more effective utilization of the beam capacity and the development of post-yield resistance. The bilinear idealization of the envelope curves further emphasized the difference between the two specimens. The post-yield stiffness ratio was approximately –1% for N01, indicating the onset of strength degradation after yielding, whereas the corresponding value for N02 was approximately 7.8%, reflecting a clear hardening response. The difference was also evident in energy dissipation. The cumulative dissipated energy was approximately 128 kJ for N01 and 232 kJ for N02; therefore, N02 dissipated about 1.8 times more energy. This improvement resulted from preservation of the force-transfer mechanism and development of stable plastic deformation in the beam rather than premature concentration of damage in the connection region. The finite-element model of N02 also reproduced the main experimental features with acceptable agreement, including the initial stiffness, post-yield resistance trend, overall moment–rotation behavior, and concentration of plastic deformation in the beam. The remaining differences can be attributed to simplifications in boundary conditions, idealization of construction details, and uncertainties in actual material and fabrication characteristics.

Conclusion

The results demonstrate that the seismic performance of beam-to-box-column

connections depends not only on the nominal strength of their components but also on the reliability and constructability of internal connection details. Premature damage in N01 prevented the development of a significant beam plastic hinge, limited the response to about (0.7Mp), produced a negative post-yield stiffness ratio, and reduced the energy dissipation capacity. In contrast, N02 developed the intended plastic mechanism in the beam, reached about (1.3Mp), exhibited a post-yield stiffness ratio of 7.8%, and dissipated approximately 1.8 times more cumulative energy. The occurrence of premature damage in N01 despite weld quality-control inspection highlights that inspection alone cannot fully ensure satisfactory seismic performance when critical internal details are highly sensitive to fabrication conditions. These findings underline the importance of developing beam-to-box-column connection details that provide not only sufficient strength, but also improved constructability, inspectability, and reliability under cyclic loading. The validated numerical model of N02 can also serve as a basis for future parametric investigations of improved box-column connection details.

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

During the preparation of this work, the authors used ChatGPT (OpenAI) to assist with language editing, improving clarity, and refining the presentation of the manuscript. The authors reviewed and edited all generated content as needed and take full responsibility for the content of the publication.

Ethical Consideration

Compliance with ethical guidelines

The authors avoided data fabrication, falsification, and plagiarism, and any form of misconduct.

Funding

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

Author's contributions

First Author: Conceptualization, Methodology, Investigation, Review and Editing, Supervision, and Project Administration.

Second Author: Methodology, Investigation, Analysis, and Writing.

Conflicts of interest

The authors declare no conflict of interest.

Acknowledgements

The authors gratefully acknowledge the Structural Engineering Laboratory of the University of Science and Culture for providing the experimental facilities and technical support required for conducting the tests presented in this study. The authors also sincerely appreciate Zarrin Souleh Jam and Machine Sazi Isfahan for their valuable support and cooperation in the fabrication and preparation of the test specimens.

مقاله پژوهشی

بررسی عملکرد لرزه‌ای اتصال مستقیم جوشی تقویت نشده (WUF-W) به ستون قوطی شکل در دو حالت اجرای ورق پیوستگی با جوش شیاری نفوذ کامل و جوشکاری به روش الکترواسلاگ

سید علی رضوی طباطبائی^{۱*}، امین کرمانی^۲

۱- استادیار، مهندسی سازه، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه علم و فرهنگ، تهران

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی سازه، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه علم و فرهنگ، تهران



Citation: Razavi Tabatabaei, S.A., and Kermani, A. (2026), "Seismic Performance of Welded Unreinforced Flange-Welded Web (WUF-W) Connections to Box Columns with Continuity Plates Using Complete Joint Penetration Groove Welds and Electroslag Welding", *Journal of Steel & Structures*, 20(54), pp.5-21. (in Persian)

doi <https://doi.org/10.22034/jss.2026.605849.1064>

چکیده

زمینه پژوهش: اتصالات تیر به ستون جعبه‌ای به دلیل محدودیت اجرای ورق‌های پیوستگی داخلی، از نواحی حساس قاب‌های خمشی فولادی محسوب می‌شوند و عملکرد لرزه‌ای آن‌ها به قابلیت اطمینان جزئیات اجرایی وابسته است. در این پژوهش، تأثیر نحوه اجرای ورق پیوستگی افقی بر رفتار چرخه‌ای اتصال تیر به ستون جعبه‌ای و توانایی آن در ایجاد مکانیزم مطلوب تیر ضعیف-ستون قوی بررسی شده است.

روش پژوهش: به این منظور، دو نمونه اتصال تیر به ستون جعبه‌ای در مقیاس واقعی طراحی، ساخته و مطابق پروتکل AISC 341-22 تحت بارگذاری چرخه‌ای قرار گرفتند. هر دو نمونه دارای هندسه و مشخصات سازه‌ای مشابه بودند و تفاوت اصلی آن‌ها در روش اتصال ورق پیوستگی داخلی به جداره ستون بود؛ به‌طوری‌که در نمونه N01 از جوش الکترواسلاگ (ESW) و در نمونه N02 از جوشکاری قوس الکتریکی دستی (SMAW) استفاده شد. پس از ساخت، کیفیت جوش‌های ناحیه اتصال بررسی و رفتار هیستریزس، منحنی‌های پوش، مکانیزم خرابی و ظرفیت اتلاف انرژی نمونه‌ها ارزیابی شد.

یافته‌ها: نتایج نشان داد که در نمونه N01، با وجود انجام کنترل کیفیت جوش، آسیب زود هنگام در ناحیه اتصال رخ داد. در نمونه N01، آسیب زود هنگام در ناحیه اتصال و متعاقب آن پارگی جوش اتصال بال تیر به وجه ستون و تغییر شکل موضعی جداره ستون مشاهده شد. تمرکز آسیب در ناحیه اتصال، مانع از توسعه قابل توجه مفصل پلاستیک در تیر شد. این نمونه تنها به حدود ۰/۷ برابر ظرفیت پلاستیک اسمی تیر (۰/۷ Mp) دست یافت؛ در حالی که نمونه N02 با توسعه تغییر شکل‌های پلاستیک در تیر توانست به حدود ۱/۳ برابر ظرفیت پلاستیک اسمی تیر (۱/۳ Mp) برسد. همچنین ضریب سخت‌شوندگی پس از تسلیم برای نمونه‌های N01 و N02 به ترتیب حدود ۱- و ۷/۸ درصد به دست آمد. انرژی تلف‌شده تجمعی نمونه N02 حدود ۲۳۲ کیلوژول بود که نسبت به مقدار ۱۲۸ کیلوژول نمونه N01، حدود ۱/۸ برابر بیش‌تر است.

نتیجه‌گیری: نتایج نشان داد که صرف تأمین مقاومت اجزای اتصال و تأیید کیفیت اولیه جوش، تضمین‌کننده عملکرد لرزه‌ای مطلوب اتصالات ستون جعبه‌ای نیست. حساسیت جزئیات اجرایی داخلی می‌تواند مسیر توسعه آسیب را تغییر داده و مانع فعال شدن ظرفیت واقعی تیر شود. بنابراین، توسعه جزئیاتی با قابلیت کنترل کیفیت بهتر و اطمینان‌پذیری بالاتر، می‌تواند نقش مهمی در بهبود عملکرد لرزه‌ای این نوع اتصالات داشته باشد.

اطلاعات مقاله:

سابقه مقاله:

تاریخ دریافت: ۲۲ مرداد ماه ۱۴۰۵
تاریخ بازنگری: ۱۸ مهر ماه ۱۴۰۵
تاریخ پذیرش: ۲۸ مهر ماه ۱۴۰۵
تاریخ انتشار: ۱ دی ماه ۱۴۰۵

واژگان کلیدی:

اتصال تیر به ستون جعبه‌ای
ورق پیوستگی داخلی
جوش الکترواسلاگ
رفتار چرخه‌ای
مفصل پلاستیک
قاب خمشی فولادی

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



اجرا و کیفیت جوش را در دست یابی به رفتار قابل اطمینان مورد تأکید قرار دادند [۶].

به دلیل مشکلات اجرایی ورق های پیوستگی داخلی، مطالعات متعددی به بررسی روش های حذف، جایگزینی یا اصلاح مسیر انتقال نیرو در اتصالات تیر به ستون جعبه ای پرداخته اند. کافی و طریق نشان دادند که حذف ورق های پیوستگی بدون تأمین مسیر مناسب انتقال نیرو، می تواند موجب کاهش مقاومت، سختی و ظرفیت جذب انرژی اتصال شود [۷].

همچنین آقارفعی و حسینی عملکرد اتصالات ورق انتهایی با پیچ های بلند را بررسی کرده و نشان دادند که تغییر مسیر انتقال نیرو می تواند بر محل تمرکز تنش و رفتار اتصال تأثیرگذار باشد [۸].

صفاری و همکاران، میرقادر و همکاران و ترابی و همکاران نیز جزئیات مختلفی برای ایجاد مسیر جایگزین انتقال نیرو و بهبود رفتار لرزه ای اتصالات تیر به ستون جعبه ای پیشنهاد و بررسی کردند [۹-۱۱].

مطالعات دیگری نیز بر استفاده از سخت کننده های خارجی، اصلاح جزئیات اتصال و کنترل محل تشکیل مفصل پلاستیک تمرکز داشته اند. تینگ^۴ و همکاران نشان دادند که استفاده از سخت کننده های خارجی می تواند موجب کاهش تمرکز تنش در وجه ستون و بهبود توزیع نیرو در اجزای اتصال شود [۱۲].

همچنین پورعلی و حسین زاده اصل و رضایی فر و همکاران نشان دادند که اصلاح جزئیات اتصال و هدایت رفتار غیرخطی به نواحی مورد انتظار می تواند موجب بهبود شکل پذیری و افزایش ظرفیت اتلاف انرژی شود [۱۳ و ۱۴]. مطالعات انجام شده بر روی اتصالات اصلاح شده تیر به ستون نیز نشان داده اند که کنترل محل تشکیل مفصل پلاستیک یکی از عوامل اصلی در دست یابی به رفتار لرزه ای مطلوب است [۱۵-۱۷].

با وجود مطالعات گسترده انجام شده در زمینه بهبود عملکرد اتصالات تیر به ستون جعبه ای، همچنان بررسی تجربی اثر جزئیات اجرایی واقعی، کیفیت ساخت و نحوه خرابی ناحیه اتصال بر رفتار چرخه ای این اتصالات از اهمیت زیادی برخوردار است. به ویژه، در مواردی که خرابی در اجزای اتصال پیش از توسعه کامل ظرفیت پلاستیک تیر رخ دهد، مکانیزم مطلوب تیر ضعیف-ستون قوی محقق نشده و ظرفیت بالقوه اتصال در جذب و استهلاک انرژی کاهش می یابد. از این رو، ارزیابی دقیق روند تشکیل مفصل

اتصالات تیر به ستون در قاب های خمشی فولادی یکی از مهم ترین نواحی مؤثر بر عملکرد لرزه ای سازه ها محسوب می شوند؛ زیرا انتقال نیروهای جانبی، توسعه تغییر شکل های غیرالاستیک و ایجاد ظرفیت اتلاف انرژی در هنگام زلزله در این نواحی انجام می شود. مطالعات انجام شده در زمینه طراحی لرزه ای سازه های فولادی، نشان داده اند که دست یابی به عملکرد شکل پذیر، نیازمند کنترل محل تشکیل مفصل پلاستیک و جلوگیری از خرابی زودهنگام اجزای اتصال است [۱ و ۲].

در اتصالات تیر به ستون با مقطع جعبه ای، ورق های پیوستگی داخلی یکی از جزئیات متداول برای انتقال نیروهای ناشی از بال تیر به جداره ستون و کنترل تغییر شکل های موضعی ستون هستند. این اجزا می توانند موجب کاهش تمرکز تنش و بهبود رفتار ناحیه اتصال شوند. با این حال، بسته بودن مقطع ستون جعبه ای، محدودیت دسترسی به داخل ستون و دشواری اجرای جوش های داخلی، فرآیند ساخت و کنترل کیفیت این نوع اتصالات را با چالش هایی همراه می کند.

رجایی و رضوی طباطبایی با بررسی عددی حذف ورق پیوستگی افقی در اتصالات تیر به ستون جعبه ای نشان دادند که حذف این جزئیات بدون در نظر گرفتن مسیر مناسب انتقال نیرو می تواند بر رفتار اتصال تأثیرگذار باشد [۳].

همچنین هجار و همکاران با بررسی الزامات ورق های پیوستگی نشان دادند اگرچه این اجزا نقش مهمی در کنترل تغییر شکل های موضعی دارند، اما افزایش بیش از حد سختی یا ضخامت آن ها الزاماً موجب بهبود متناسب عملکرد اتصال نمی شود [۴].

یکی از مسائل مهم در اتصالات دارای ستون جعبه ای، عملکرد جوش های داخلی و تأثیر کیفیت اجرای آن ها بر رفتار چرخه ای اتصال است. اومدا^۱ و همکاران تأثیر عمق نفوذ جوش الکترواسلاگ (ESW^۲) بر شکل پذیری اتصالات تیر به ستون فولادی را بررسی کردند و نشان دادند که پارامترهای اجرایی جوش می توانند نقش مهمی در عملکرد نهایی اتصال داشته باشند [۵].

همچنین هارادا^۳ و همکاران با بررسی کاربردهای جوش الکترواسلاگ در ساخت سازه های فولادی، اهمیت کنترل فرآیند

^۴ Ting

^۱ Umeda

^۲ Electro slag welding

^۳ Harada

۲-۱- مشخصات هندسی و جزئیات اتصال نمونه‌ها

نمونه‌های آزمایشگاهی شامل دو اتصال تیر به ستون فولادی با ستون جعبه‌ای هستند. در هر دو نمونه، از تیر فولادی با ارتفاع ۳۰۰ میلی‌متر، طول بال ۲۰۰ میلی‌متر و ضخامت بال و جان ۱۵ و ۸ میلی‌متر و ستون جعبه‌ای با طول و عرض ۳۰۰ میلی‌متر و ضخامت ۱۵ میلی‌متر استفاده شد. همچنین، جزئیات کلی ناحیه اتصال شامل آرایش تیر نسبت به ستون، ابعاد ورق‌های اتصال و موقعیت ورق پیوستگی افقی در دو نمونه، مشابه در نظر گرفته شد. ورق پیوستگی افقی در داخل ستون جعبه‌ای و در امتداد بال تیر قرار گرفت تا انتقال نیروهای ناشی از بال تیر به جداره ستون و کنترل تغییرشکل‌های موضعی ناحیه اتصال تأمین شود. تفاوت اصلی نمونه‌ها در نحوه اتصال این ورق به جداره داخلی ستون بود؛ به طوری که در نمونه N01، اتصال ورق پیوستگی توسط فرآیند جوش ESW و در نمونه N02، توسط فرآیند جوشکاری SMAW اجرا شد. مشخصات اصلی هندسی نمونه‌ها شامل مقاطع تیر و ستون، ضخامت اجزا، ابعاد ورق پیوستگی و سایر پارامترهای مرتبط با ناحیه اتصال در جدول (۱) ارائه شده است. همچنین طول تیر ۱/۶۵ متر و طول ستون ۲/۷ متر است.

جدول ۱- مشخصات هندسی نمونه‌های آزمایشگاهی

نمونه	مقطع تیر	مقطع ستون	جزئیات ورق پیوستگی
N01			جوش ESW
		BOX300×300×15 PG300×8-200×15	
N02			جوش SMAW

۲-۲- مشخصات مصالح

به منظور تعیین خواص مکانیکی واقعی مصالح مورد استفاده در نمونه‌های آزمایشگاهی، آزمایش کشش بر روی نمونه‌های تهیه شده از اعضای مختلف اتصال انجام شد. مقادیر تنش تسلیم و مقاومت نهایی کششی بر اساس سطح مقطع اولیه نمونه‌ها محاسبه شدند. نتایج آزمایش کشش مصالح فولادی مورد استفاده در نمونه‌های آزمایشگاهی در جدول (۲) ارائه شده است. همچنین نمونه‌های فولادی حین و پس از انجام آزمایش کشش در شکل (۱) نشان داده شده‌اند. لازم به ذکر است که ورق‌های مصرفی هر دو نمونه از یک سری مصالح مشترک تأمین شده‌اند.

پلاستیک، تغییرات مقاومت، شکل پذیری و مکانیزم خرابی نمونه‌های آزمایشگاهی می‌تواند در شناخت عوامل مؤثر بر عملکرد لرزه‌ای اتصالات ستون جعبه‌ای نقش مهمی داشته باشد. در پژوهش حاضر، رفتار چرخه‌ای دو نمونه اتصال تیر به ستون جعبه‌ای با جزئیات اجرایی متفاوت، شامل اتصالات اجرا شده با روش‌های جوشکاری قوس الکتریکی با الکتروود روکش دار (SMAW)^۱ و جوشکاری الکترواسلاگ (ESW)، تحت بارگذاری رفت و برگشتی بررسی شده است. هدف این مطالعه، ارزیابی رفتار هیستریزس، بررسی روند تشکیل مفصل پلاستیک، تحلیل مکانیزم‌های خرابی و مقایسه ظرفیت مقاومتی، سختی، شکل پذیری و ظرفیت اتلاف انرژی نمونه‌ها با تمرکز بر تأثیر روش جوشکاری بر عملکرد چرخه‌ای اتصالات است.

۲- برنامه آزمایشگاهی و معرفی نمونه‌ها

به منظور بررسی رفتار لرزه‌ای اتصالات تیر به ستون فولادی دارای ستون جعبه‌ای و ارزیابی تأثیر جزئیات اجرایی ورق‌های پیوستگی بر عملکرد چرخه‌ای اتصال، یک برنامه آزمایشگاهی شامل دو نمونه اتصال در مقیاس واقعی طراحی، ساخته و تحت بارگذاری چرخه‌ای قرار گرفت. نمونه‌های مورد مطالعه بر اساس یک طرح سازه‌ای یکسان و با هدف بررسی توانایی اتصال در ایجاد مکانیزم مطلوب تیر ضعیف-ستون قوی طراحی شدند.

در هر دو نمونه، مشخصات اصلی اعضای سازه‌ای شامل تیر، ستون و هندسه کلی اتصال، مشابه در نظر گرفته شد و تفاوت اصلی نمونه‌ها به نحوه اجرای اتصال ورق پیوستگی افقی به ستون جعبه‌ای مربوط بود. در نمونه N01، ورق پیوستگی با استفاده از فرآیند جوش الکترواسلاگ اجرا شد؛ در حالی که در نمونه N02، همان جزئیات اتصال با استفاده از جوشکاری قوس الکتریکی دستی ساخته شد.

پیش از انجام آزمایش‌های چرخه‌ای، نمونه‌ها مطابق فرآیندهای اجرایی مورد نظر ساخته شده و کنترل‌های اولیه مرتبط با کیفیت ساخت و آماده‌سازی اتصال انجام گرفت. هدف اولیه از این برنامه آزمایشگاهی، بررسی رفتار لرزه‌ای این دو جزئیات اجرایی و مقایسه عملکرد آن‌ها تحت تغییرشکل‌های چرخه‌ای ناشی از زلزله بود. مشخصات هندسی، جزئیات ساخت و ویژگی‌های مصالح نمونه‌ها در بخش‌های بعدی ارائه می‌شود.

^۱ Shielded Metal Arc Welding

جدول ۲- نتایج آزمایش کشش مصالح فولادی مورد استفاده در

نمونه‌های آزمایشگاهی

نمونه	ضخامت (mm)	F_y (MPa)	F_u (MPa)
PL-10	10	246.2	376.9
PL-15	15	205.1	289.7
PL-20	20	315.4	500.0



شکل ۲- مونتاژ اولیه ستون جعبه‌ای



شکل ۳- نمونه اتصال درختی تیر به ستون پس از ساخت در کارگاه



شکل ۴- تیرهای ساخته شده و آماده اتصال به بخش درختی نمونه

عملیات جوشکاری نمونه‌ها توسط مجموعه سازنده متخصص و بر اساس رویه‌های اجرایی متداول انجام پذیرفت. پس از تکمیل عملیات ساخت و جوشکاری، کیفیت جوش‌های نواحی حساس اتصال با استفاده از آزمون غیرمخرب اولتراسونیک (UT)^۱ بررسی شد. نمونه‌ای از فرآیند کنترل کیفیت جوش در شکل (۵) ارائه شده است.



(ب)

(الف)

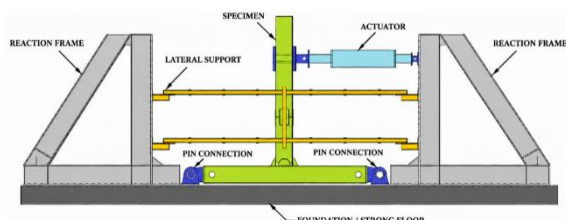
شکل ۱- نمونه فولادی (الف) حین انجام آزمایش کشش و (ب) پس از انجام آزمایش کشش و وقوع شکست

۲-۳- فرآیند ساخت و کنترل کیفیت نمونه‌ها

پس از نهایی شدن نقشه‌های اجرایی، مقاطع و ورق‌های فولادی مورد نیاز مطابق ابعاد طراحی شده، برش داده شده و عملیات آماده‌سازی، مونتاژ و جوشکاری نمونه‌ها انجام شد. در مرحله مونتاژ اولیه، موقعیت اجزای داخلی ستون و ورق‌های پیوستگی پیش از تکمیل جوشکاری کنترل شد. در نمونه N02، به منظور تأمین دسترسی به محل اتصال ورق پیوستگی داخلی به جداره ستون جعبه‌ای، سوراخ‌های دسترسی در بدنه ستون تعبیه شد و جوشکاری ورق پیوستگی از طریق این بازشوها با استفاده از روش SMAW انجام گرفت. نمایی از فرآیند مونتاژ اولیه ستون نمونه‌های آزمایشگاهی در شکل (۲) ارائه شده است. به منظور تسهیل فرآیند ساخت و انتقال نمونه‌ها، اتصال تیر به ستون به صورت درختی در کارگاه ساخته شد. در این روش، بخش اتصال تیر به ستون به صورت یکپارچه ساخته شده و ادامه تیر پس از انتقال نمونه‌ها به محل آزمایش به این بخش متصل شد. نمای نمونه اتصال درختی ساخته شده در کارگاه و تیرهای آماده اتصال در شکل‌های (۳) و (۴) نشان داده شده است.

^۱ Ultrasonic Testing

آزمایش، ستون نمونه‌ها به صورت افقی در قاب آزمایش تثبیت شده و بار جانبی در انتهای تیر توسط جک هیدرولیکی اعمال شد. سیستم بارگذاری شامل یک عملگر هیدرولیکی، سلول بارگذاری^۱ و تجهیزات ثبت داده بود که امکان اعمال تغییر مکان‌های کنترل شده و ثبت نیروی متناظر را فراهم می‌کرد. انتهای تیر به عملگر متصل شده و تغییر مکان‌های رفت و برگشتی مطابق پروتکل بارگذاری اعمال شد. نمای کلی آرایش آزمایش و تجهیزات مورد استفاده در شکل (۷) ارائه شده است. در طول آزمایش، نیروی اعمالی توسط سلول بارگذاری و تغییر مکان‌های نمونه توسط تجهیزات اندازه‌گیری، ثبت شد. این داده‌ها برای استخراج منحنی‌های نیرو-تغییر مکان، بررسی رفتار هیستریزس، تعیین مشخصات مقاومتی و ارزیابی مکانیزم خرابی نمونه‌ها مورد استفاده قرار گرفتند.



شکل ۷- نمای کلی آرایش آزمایشگاهی و تجهیزات بارگذاری نمونه‌های مورد مطالعه

۲-۳- پروتکل بارگذاری چرخه‌ای

به منظور ارزیابی رفتار لرزه‌ای نمونه‌ها، آزمایش‌های چرخه‌ای تحت کنترل تغییر مکان انجام شد. پروتکل بارگذاری مورد استفاده مطابق پیوست K استاندارد AISC 341-22 انتخاب شد [۱۸]. این پروتکل با هدف ارزیابی عملکرد لرزه‌ای اتصالات قاب‌های خمشی فولادی، شامل چرخه‌های متوالی با دامنه دوران افزایشی است که امکان بررسی رفتار نمونه از محدوده الاستیک تا مراحل توسعه یافته تغییر شکل‌های غیرالاستیک را فراهم می‌کند. پروتکل بارگذاری شامل چندین مرحله با دامنه‌های افزایشی تغییر مکان بود که امکان ارزیابی مقاومت، سختی، شکل‌پذیری و ظرفیت اتلاف انرژی اتصال را فراهم کرد. تاریخچه بارگذاری اعمال شده در شکل (۸) ارائه شده است.



شکل ۵- انجام آزمون غیرمخرب اولتراسونیک برای کنترل کیفیت جوش‌های نمونه

به منظور تأمین شرایط مرزی مورد نظر در دو انتهای ستون از مفاصل فولادی ساخته شده برای مجموعه آزمایش استفاده شد. این مفاصل امکان دوران ستون در محل تکیه‌گاه را فراهم می‌کنند. جزئیات مفاصل ساخته شده و نحوه نصب آن‌ها در مجموعه آزمایش، در شکل (۶) نشان داده شده است.



شکل ۶- جزئیات تکیه‌گاه‌های مفصلی نمونه: (الف) مفاصل ساخته شده برای آزمایش و (ب) نحوه نصب مفصل در محل اتصال ستون به مجموعه آزمایش

۳- روش انجام آزمایش و پروتکل بارگذاری

به منظور ارزیابی رفتار لرزه‌ای نمونه‌های آزمایشگاهی، دو اتصال تیر به ستون تحت بارگذاری چرخه‌ای قرار گرفتند. آزمایش‌ها با هدف بررسی پاسخ غیرخطی اتصال، نحوه توسعه تغییر شکل‌های پلاستیک و ارزیابی مکانیزم خرابی نمونه‌ها انجام شد. در این بخش، آرایش آزمایش، نحوه اعمال بار، پروتکل بارگذاری و سیستم اندازه‌گیری مورد استفاده، ارائه می‌شود.

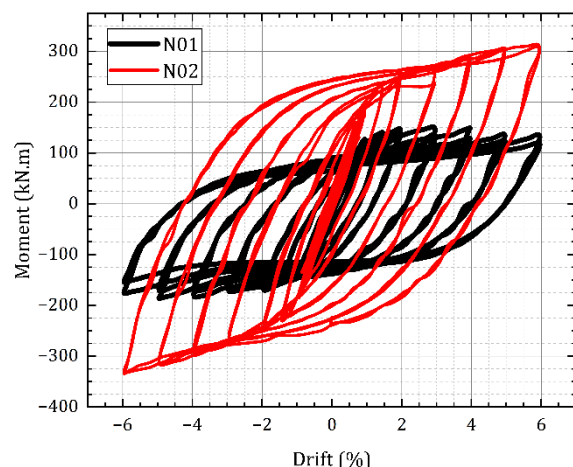
۳-۱- آرایش و تجهیزات آزمایش

آرایش آزمایش به گونه‌ای طراحی شد که شرایط عملکرد اتصال تیر به ستون در یک قاب خمشی فولادی شبیه‌سازی شود. در این

^۱ Load Cell

پایدار و روند افزایشی ظرفیت را نشان داد و به حداکثر لنگر خمشی حدود 164 (kN.m) رسید. با افزایش دامنه تغییر مکان، این نمونه توانست تا حدود دررفت $\pm 4\%$ درصد ظرفیت خود را حفظ کند؛ اما در ادامه افزایش دررفت با کاهش پایداری حلقه‌های هیستریزس و افت ظرفیت همراه شد.

در مقابل، نمونه N02 ظرفیت خمشی بیش‌تری از خود نشان داد و حداکثر لنگر خمشی آن به حدود 324 (kN.m) رسید. این نمونه در محدوده دررفت‌های بالاتر نیز رفتار پایدار خود را حفظ نموده و بدون افت محسوس مقاومت، توانایی تحمل تغییر شکل‌های چرخه‌ای بزرگ‌تری را نشان داد.

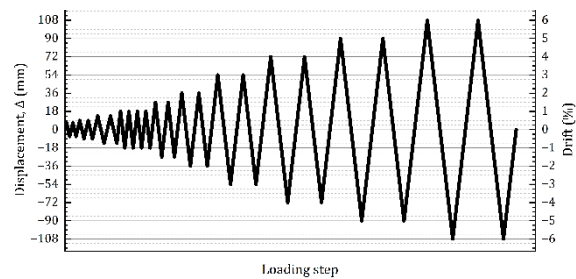


شکل ۱۰- منحنی‌های هیستریزس نمونه‌های N01 و N02

مقایسه منحنی‌های هیستریزس دو نمونه نشان می‌دهد که نمونه N02 علاوه بر ظرفیت خمشی بالاتر، از پایداری چرخه‌ای و سطح محصورشدگی بیش‌تری در حلقه‌های هیستریزس برخوردار است. در مقابل، نمونه N01 پیش از دستیابی به یک رفتار پلاستیک پایدار، کاهش ظرفیت و محدودیت در توسعه تغییر شکل‌های غیرالاستیک را تجربه کرده است.

۴-۲- بررسی مکانیزم خرابی و روند تشکیل مفصل پلاستیک

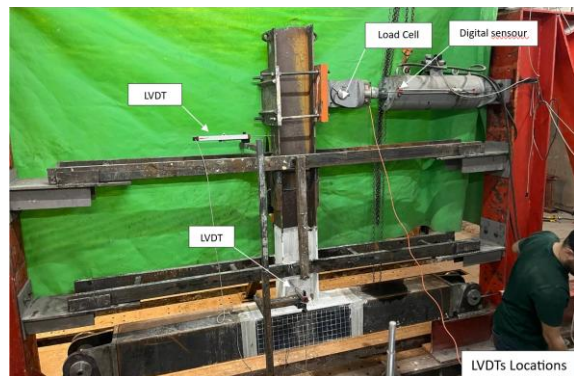
یکی از مهم‌ترین معیارهای ارزیابی عملکرد لرزه‌ای اتصالات تیر به ستون فولادی، نحوه توسعه تغییر شکل‌های غیرالاستیک و محل تشکیل مفصل پلاستیک است. در قاب‌های خمشی، انتظار می‌رود تغییر شکل‌های پلاستیک عمدتاً در تیر متمرکز شده و اتصال، توانایی انتقال نیرو را حفظ نماید. به منظور مقایسه مکانیزم خرابی نمونه‌ها، مشاهدات مراحل مختلف بارگذاری در جدول (۳) ارائه شده است. مطابق نتایج، هر دو نمونه تا دررفت حدود ۱٪ رفتار



شکل ۸- تاریخچه بارگذاری چرخه‌ای اعمال‌شده به نمونه‌های آزمایشگاهی مطابق استاندارد AISC 341-22 [۱۸]

۳-۳- سیستم اندازه‌گیری و ثبت داده‌ها

به منظور ثبت پاسخ نمونه‌ها، نیروی اعمالی توسط سلول بارگذاری و تغییر مکان‌های ایجادشده در نقاط مختلف نمونه توسط LVDT^۱ها ثبت شد. داده‌های ثبت‌شده برای استخراج منحنی‌های نیرو-تغییر مکان، بررسی رفتار هیستریزس، تعیین مشخصات لرزه‌ای اتصال و ارزیابی روند تشکیل آسیب در نمونه‌ها مورد استفاده قرار گرفتند. موقعیت تجهیزات اندازه‌گیری نصب‌شده بر روی نمونه در شکل (۹) ارائه شده است.



شکل ۹- موقعیت تجهیزات اندازه‌گیری و ثبت داده‌ها در نمونه آزمایشگاهی

۴-۱- ارزیابی عملکرد نمونه‌های آزمایشگاهی

در این بخش، نتایج حاصل از آزمایش‌های چرخه‌ای نمونه‌های N01 و N02 ارائه و مقایسه می‌شوند. رفتار هیستریزس، ظرفیت اتصال و مکانیزم خرابی نمونه‌ها به منظور ارزیابی عملکرد لرزه‌ای اتصالات مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۴-۱- رفتار هیستریزس نمونه‌ها

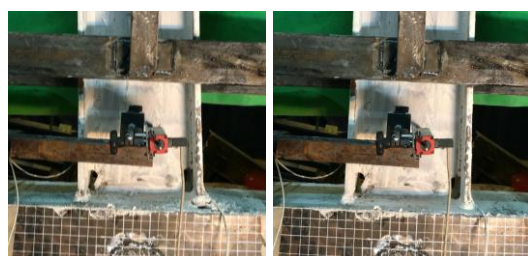
منحنی‌های هیستریزس نمونه‌های N01 و N02 در شکل (۱۰) ارائه شده است. نمونه N01 در مراحل ابتدایی بارگذاری، رفتار

^۱ Linear Variable Differential Transformer



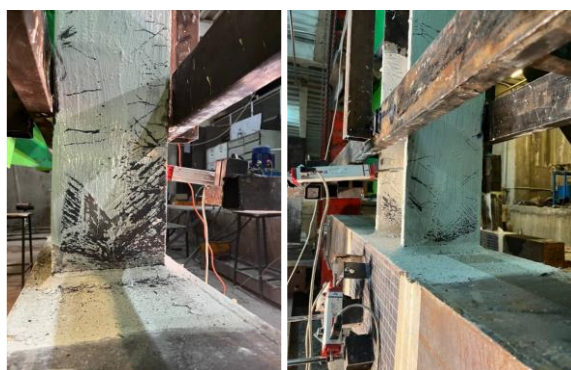
شکل ۱۲- عدم تشکیل مفصل پلاستیک تیر در پایان آزمایش نمونه N01

همچنین، شکل (۱۳) تغییر شکل خارج از صفحه و بلندشدگی موضعی ورق وجه ستون در ناحیه اتصال تیر را نشان می دهد.



شکل ۱۳- مقایسه وضعیت ورق وجه ستون در ناحیه اتصال نمونه N01: الف) ابتدای آزمایش و ب) انتهای آزمایش

در در مقابل، نمونه N02 رفتار متفاوتی از خود نشان داد. این نمونه پس از ورود به محدوده غیرخطی در حدود ۱/۵٪ رادیان، با افزایش دررفت توانست تغییر شکل های پلاستیک را در تیر توسعه دهد. در دررفت های بالاتر، کمناش موضعی بال تیر و گسترش ناحیه پلاستیک مشاهده شد؛ درحالی که اتصال توانست رفتار چرخه ای خود را حفظ نماید. روند تشکیل و توسعه ناحیه پلاستیک در نمونه N02 در شکل (۱۴) ارائه شده است.



شکل ۱۴- روند پلاستیک شدن تیر در نمونه N02: الف) دوران ۲٪ رادیان و ب) دوران ۶٪ رادیان

عمدتاً خطی داشتند. با افزایش بارگذاری، در نمونه N01 آسیب در ناحیه اتصال متمرکز شد و در دررفت حدود ۳٪، پارگی وجه ستون و افت شدید مقاومت رخ داد. با توجه به عدم پایش مستقیم جوش الکترواسلاگ داخل ستون، تعیین قطعی محل آغاز شکست امکان پذیر نیست. با این حال، تمرکز آسیب در ناحیه اتصال مانع از توسعه کامل مفصل پلاستیک تیر و تحقق مکانیزم مطلوب تیر ضعیف-ستون قوی در نمونه N01 شد.

بررسی نمونه پس از پایان آزمایش نیز این موضوع را تأیید کرد. در نمونه N01، پارگی جوش اتصال بال تیر به بال ستون در شکل (۱۱) مشاهده شد. همچنین، مطابق شکل (۱۲) برخلاف انتظار طراحی، مفصل پلاستیک قابل توجهی در ناحیه تیر تشکیل نشد و آسیب اصلی در ناحیه اتصال متمرکز باقی ماند.

جدول ۳- روند رخداد نمونه های N01 و N02 در مراحل بارگذاری

دررفت (%)	نمونه N01	نمونه N02
۰/۳۷۵	رفتار خطی	رفتار خطی
۰/۵	رفتار خطی	رفتار خطی
۰/۷۵	رفتار خطی	رفتار خطی
۱	رفتار خطی	رفتار خطی
۱/۵	شروع آسیب در ناحیه اتصال	شروع رفتار غیر خطی و ریزش آب آهک ها
۲	ایجاد تغییر شکل وجه ستون	ادامه رفتار غیر خطی
۳	پارگی وجه ستون و افت شدید مقاومت	شروع کمناش موضعی
۴	گسترش تغییر شکل وجه ستون و ادامه افت مقاومت	افزایش کمناش موضعی بال تیر
۵	گسترش آسیب و ادامه کاهش مقاومت	توسعه تغییر شکل های
۶	ادامه کاهش مقاومت	پلاستیک در تیر



شکل ۱۱- پارگی جوش اتصال بال تیر به بال ستون در نمونه N01

۳-۴- سختی و ظرفیت اتلاف انرژی

پارامترهای مشخصه نمونه‌ها با استفاده از منحنی‌های پوش لنگر-دوران استخراج شدند. به‌منظور تعیین مشخصات رفتاری اتصال، منحنی‌های پوش حاصل از بارگذاری چرخه‌ای با استفاده از روش دوخطی‌سازی ایده‌آل شدند. در این روش، نقطه تسلیم معادل از تقاطع دو بخش الاستیک و پس از تسلیم منحنی دوخطی‌شده، تعیین شده و مقادیر (M_y) و (θ_y) به‌ترتیب به‌عنوان لنگر و دوران متناظر با شروع رفتار غیرالاستیک در نظر گرفته شدند. همچنین، سختی اولیه دورانی (K_θ) از شیب بخش الاستیک منحنی دوخطی‌شده و پارامتر (α) از نسبت سختی پس از تسلیم به سختی اولیه محاسبه شد.

مطابق جدول (۴)، نمونه N02 علاوه بر دست‌یابی به ظرفیت نهایی بالاتر، سختی اولیه بیش‌تری نسبت به نمونه N01 نشان داده است. همچنین افزایش مقاومت پس از تسلیم در این نمونه، بیانگر توانایی آن در توسعه رفتار غیرالاستیک پایدارتر است. در مقابل، نمونه N01 با وجود رسیدن به دوران تسلیم مشابه، به‌دلیل محدودشدن روند توسعه تغییرشکل‌های پلاستیک، ظرفیت کم‌تری در ادامه بارگذاری ایجاد کرده است. پارامتر α نیز تفاوت رفتار پس از تسلیم دو نمونه را نشان می‌دهد. مقدار ۱- برای نمونه N01، بیانگر کاهش اندک سختی پس از تسلیم و آغاز روند افت مقاومت است؛ درحالی‌که مقدار ۷/۸ برای نمونه N02 نشان‌دهنده توسعه مقاومت پس از تسلیم و رفتار سخت‌شوندگی اتصال است.

جدول ۴- پارامترهای مشخصه حاصل از دوخطی‌سازی منحنی

لنگر-دوران نمونه‌ها

نمونه	M_{max} (kN.m)	M_y (kN.m)	θ_y (rad)	K_θ (kN.m/rad)	α (%)
N01	۱۶۴/۲	۱۶۰/۶	۰/۰۰۹۳۹	۱۷۰۶۲/۴	-۱/۰
N02	۳۲۴/۸	۲۳۱/۲	۰/۰۰۹۸۹	۲۳۴۱۷/۱	۷/۸

انرژی تلف‌شده تجمعی از مجموع مساحت حلقه‌های هیستریزس در چرخه‌های مختلف نمونه‌های N01 و N02 در شکل (۱۶) ارائه شده است. مطابق نتایج، نمونه N02 با انرژی تلف‌شده تجمعی حدود (۲۳۲ kJ)، عملکرد بهتری نسبت به نمونه N01 با مقدار (۱۲۸ kJ) داشته است. این اختلاف نشان‌دهنده توانایی بیش‌تر نمونه N02 در حفظ رفتار چرخه‌ای و اتلاف انرژی در تغییرشکل‌های بزرگ‌تر است.

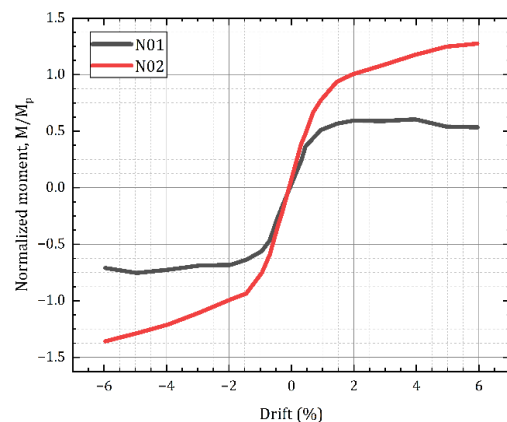
در مجموع، تفاوت عملکرد دو نمونه ناشی از تفاوت محل توسعه آسیب و مسیر تشکیل مکانیزم پلاستیک است؛ به‌طوری‌که N02 تغییرشکل‌های غیرالاستیک را در ناحیه مورد انتظار تیر توسعه داد، درحالی‌که N01 به‌دلیل آسیب زودهنگام اتصال، پیش از بسیج کامل ظرفیت پلاستیک تیر، با افت عملکرد مواجه شد.

۳-۴- منحنی‌های پوش و مشخصات مقاومتی

به‌منظور حذف اثر تفاوت ظرفیت پلاستیک اسمی مقاطع تیر و فراهم‌نمودن امکان مقایسه مستقیم‌تر عملکرد نمونه‌ها، منحنی‌های پوش بر اساس لنگر پلاستیک اسمی مقطع تیر (M_p) نرمال‌سازی شده و به‌صورت M/M_p در شکل (۱۵) ارائه شده است. این نمایش امکان ارزیابی میزان بهره‌گیری هر نمونه از ظرفیت پلاستیک تیر و بررسی رفتار پس از تسلیم را فراهم می‌کند. مطابق منحنی‌های نرمال‌شده، نمونه N01 حداکثر ظرفیتی در حدود $0.7M_p$ را تجربه کرده است. بنابراین، این نمونه پیش از رسیدن به ظرفیت پلاستیک اسمی تیر به بیشینه پاسخ خود رسیده و به‌دلیل ایجاد آسیب در ناحیه اتصال، امکان توسعه کامل ظرفیت پلاستیک تیر را پیدا نکرده است.

در مقابل، نمونه N02 توانسته است از ظرفیت پلاستیک اسمی تیر عبور کرده و به حدود $1.3M_p$ برسد. این رفتار نشان‌دهنده توانایی نمونه N02 در توسعه مقاومت پس از تسلیم و حفظ عملکرد مقاومتی در محدوده غیرالاستیک است.

مقایسه منحنی‌های پوش نشان می‌دهد که تفاوت عملکرد دو نمونه تنها ناشی از اختلاف ظرفیت اسمی اعضا نیست، بلکه مکانیزم خرابی و نحوه توسعه تغییرشکل‌های غیرالاستیک در ناحیه اتصال، نقش تعیین‌کننده‌ای در ظرفیت نهایی نمونه‌ها دارد. درحالی‌که نمونه N02 توانسته است ظرفیت پلاستیک تیر را فعال کرده و مقاومت اضافی پس از تسلیم ایجاد کند، نمونه N01 پیش از دست‌یابی به این مرحله با محدودیت در توسعه ظرفیت مواجه شده است.



شکل ۱۵- منحنی‌های پوش لنگر-دوران نمونه‌های N01 و N02

اجرایی ناحیه اتصال، نقش اساسی در حفظ مکانیزم مورد انتظار تیر ضعیف-ستون قوی دارد.

۲-۵- پیامدهای شکست ناحیه اتصال بر عملکرد قاب خمشی

در قاب‌های خمشی فولادی، عملکرد لرزه‌ای به توانایی اتصالات در انتقال نیرو و توسعه تغییرشکل‌های پلاستیک وابسته است. خرابی زود هنگام اتصال می‌تواند موجب کاهش ظرفیت اتلاف انرژی و شکل‌پذیری سیستم شود. نتایج آزمایش نمونه N01 نشان داد که آسیب در ناحیه اتصال، پیش از توسعه کامل رفتار پلاستیک تیر رخ داده است. در این حالت، اگرچه ظرفیت اعضای اصلی اتصال در مراحل اولیه بارگذاری فعال بود، اما خرابی ناحیه اتصال موجب کاهش توانایی نمونه در تحمل تغییرشکل‌های بزرگ و جلوگیری از شکل‌گیری مکانیزم مطلوب تیر ضعیف-ستون قوی شد. این نوع خرابی می‌تواند با تمرکز آسیب در اتصال، ظرفیت اتلاف انرژی و قابلیت اطمینان لرزه‌ای قاب را کاهش دهد؛ بنابراین، ارزیابی عملکرد واقعی جزئیات اتصال تحت بارگذاری چرخه‌ای، در کنار کنترل مقاومت اجزا، ضروری است.

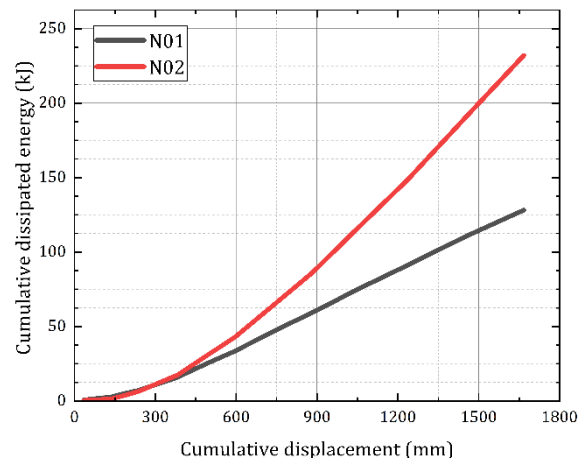
۳-۵- ضرورت توسعه جزئیات اجرایی جایگزین برای اتصالات ستون جعبه‌ای

اتصالات تیر به ستون با ستون جعبه‌ای به دلیل محدودیت دسترسی به فضای داخلی ستون، از نظر اجرای ورق‌های پیوستگی و کنترل کیفیت فرآیند ساخت با چالش‌های ویژه‌ای همراه است. نتایج این پژوهش نشان داد که حتی در شرایطی که فرآیند ساخت تحت کنترل‌های اولیه قرار گرفته است، عملکرد چرخه‌ای ناحیه اتصال می‌تواند تحت تأثیر جزئیات اجرایی قرار گیرد.

مشاهده شکست نمونه N01 و عدم توسعه مفصل پلاستیک مطلوب در تیر، ضرورت بررسی و توسعه جزئیات اجرایی با قابلیت اطمینان بالاتر را نشان می‌دهد. جزئیات جایگزین باید علاوه بر تأمین مقاومت مورد نیاز، امکان انتقال مناسب نیرو، کنترل بهتر کیفیت ساخت و حفظ مکانیزم مطلوب تغییرشکل پلاستیک را فراهم کند. بر این اساس، توسعه روش‌های اجرایی جدید برای اتصالات ستون جعبه‌ای می‌تواند گامی موثر در افزایش اطمینان‌پذیری عملکرد لرزه‌ای این نوع اتصالات باشد.

۶- مدل‌سازی عددی و صحت‌سنجی

به منظور بررسی توانایی مدل عددی در بازتولید رفتار آزمایشگاهی نمونه‌ها، مدل‌سازی اجزای محدود اتصال تیر به ستون انجام شد. در این بخش، مشخصات مدل عددی، فرضیات تحلیل و مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی با نتایج آزمایشگاهی ارائه می‌شود.



شکل ۱۶- انرژی تلف‌شده تجمعی نمونه‌های N01 و N02 بر حسب جابه‌جایی تجمعی

۵- تحلیل و بحث نتایج

نتایج آزمایش‌ها نشان داد که تفاوت در جزئیات اجرایی اتصال می‌تواند تأثیر قابل‌توجهی بر مسیر توسعه آسیب، محل تشکیل مفصل پلاستیک و عملکرد لرزه‌ای اتصال داشته باشد. در این بخش، اثر عملکرد اتصال بر مکانیزم خرابی نمونه‌ها و پیامدهای آن بر رفتار چرخه‌ای اتصالات مورد بحث قرار می‌گیرد.

۱-۵- تأثیر عملکرد اتصال بر مکانیزم خرابی لرزه‌ای

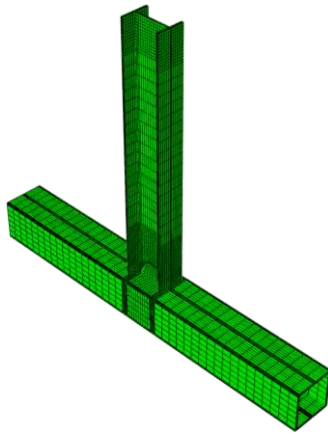
یکی از الزامات اصلی در طراحی لرزه‌ای قاب‌های خمشی فولادی، هدایت تغییرشکل‌های غیرالاستیک به ناحیه تیر و جلوگیری از ایجاد خرابی زود هنگام در اجزای اتصال است. نتایج آزمایش‌های انجام‌شده نشان داد که عملکرد ناحیه اتصال، نقش تعیین‌کننده‌ای در دستیابی به این مکانیزم دارد.

در نمونه N02، اتصال توانست تا تغییرشکل‌های بزرگ‌تر، انتقال نیرو بین تیر و ستون را حفظ کرده و امکان توسعه تدریجی تغییرشکل‌های پلاستیک در تیر را فراهم کند. این رفتار موجب دستیابی نمونه به ظرفیت بالاتر، پایداری بیش‌تر حلقه‌های هیستریزس و افزایش ظرفیت اتلاف انرژی شد.

در مقابل، در نمونه N01، آسیب زود هنگام در ناحیه اتصال موجب تغییر مسیر انتقال نیرو و محدود شدن توسعه مفصل پلاستیک در تیر شد. اگرچه اعضای اصلی نمونه در ابتدا توانایی تحمل بارگذاری را داشتند، اما خرابی ناحیه اتصال سبب شد ظرفیت بالقوه تیر به‌طور کامل فعال نشود و کاهش مقاومت پیش از دستیابی به یک مکانیزم پلاستیک مطلوب رخ دهد.

این نتایج نشان می‌دهد که در اتصالات دارای ستون جعبه‌ای، صرف تأمین مقاومت اسمی اجزای اتصال برای دستیابی به عملکرد لرزه‌ای مطلوب کافی نیست و قابلیت اطمینان جزئیات

۱-۶- معرفی مدل عددی



شکل ۱۷- مدل اجزای محدود نمونه N02

۲-۶- تعریف مشخصات مصالح و شرایط مرزی

رفتار غیرخطی فولاد با استفاده از مدل سخت‌شوندگی ترکیبی ایزوتروپیک-سینماتیک تعریف شد [۲۰]. این مدل با در نظر گرفتن هم‌زمان مؤلفه‌های سخت‌شوندگی ایزوتروپیک و سینماتیک، امکان شبیه‌سازی تغییر اندازه و انتقال سطح تسلیم را فراهم می‌کند و از این‌رو برای شبیه‌سازی رفتار فولاد تحت بارگذاری چرخه‌ای و لحاظ نمودن اثر پوشینگر مناسب است. پارامترهای مورد استفاده برای تعریف رفتار مصالح در مدل‌های N02 به ترتیب در جدول (۵) ارائه شده است.

شرایط مرزی مدل مطابق با آرایش آزمایشگاهی تعریف شد؛ به‌طوری‌که محدودیت‌های اعمال‌شده در ناحیه تکیه‌گاه ستون و نحوه اعمال بار در انتهای تیر مشابه شرایط آزمایش در نظر گرفته شدند. بارگذاری چرخه‌ای نیز به‌صورت کنترل تغییر مکان و مطابق پروتکل آزمایشگاهی به مدل اعمال شد.

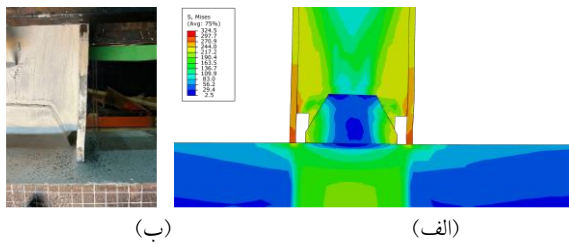
جدول ۵- مشخصات اصلی مدل اجزای محدود نمونه N02

پارامتر	مقدار	واحد
Young's Modulus, E	۲۰۰	GPa
Poisson's Ratio, ν	۰/۳	-
Density, ρ	$7/85 \times 10^{-9}$	ton/mm ³
Initial Yield Stress, σ_0	۲۶۰	MPa
Kinematic Hardening Parameter, C ₁	۴۰۰۰	MPa
Recovery Parameter, γ_1	۱/۷	-
Kinematic Hardening Parameter, C ₂	۲۹۵۰	MPa
Recovery Parameter, γ_2	۵۰۰	-
Saturation Stress, Q _∞	۵۰	MPa
Isotropic Hardening Parameter, b	۲	-

به‌منظور بررسی قابلیت مدل اجزای محدود در شبیه‌سازی رفتار اتصال و صحت‌سنجی نتایج آزمایشگاهی، مدل عددی نمونه N02 توسعه داده شد. انتخاب این نمونه به‌دلیل حفظ مکانیزم مطلوب تشکیل مفصل پلاستیک در تیر و دستیابی به رفتار چرخه‌ای پایدارتر در آزمایش صورت گرفت. هدف از مدل‌سازی، بازتولید رفتار کلی نمونه آزمایشگاهی و بررسی میزان انطباق پاسخ عددی و آزمایشگاهی از نظر ظرفیت مقاومتی، روند تغییر شکل‌های غیرالاستیک و مکانیزم خرابی بود.

مدل‌سازی اجزای محدود با استفاده از نرم‌افزار Abaqus انجام شد [۱۹]. در این مدل، اجزای اصلی اتصال شامل تیر، ستون، ورق‌های پیوستگی و سایر اجزای ناحیه اتصال مطابق هندسه واقعی نمونه آزمایشگاهی ایجاد شدند. تمامی اجزای فولادی با استفاده از المان حجمی هشت‌گره‌ای C3D8R مدل شدند. با توجه به اهمیت ناحیه اتصال در انتقال نیرو و توسعه تغییر شکل‌های غیرالاستیک، شبکه‌بندی مش در این ناحیه با تراکم بیشتری نسبت به بخش‌های دورتر از اتصال انجام شد. پس از انجام تحلیل حساسیت مش، اندازه المان‌ها در ناحیه چشمه اتصال در محدوده ۵ تا ۱۵ میلی‌متر انتخاب شد؛ درحالی‌که در نواحی دورتر از اتصال، اندازه مش تا حدود ۶۰ میلی‌متر افزایش یافت. این تغییر تدریجی اندازه مش، باعث می‌شود که از افزایش غیرضروری حجم محاسبات در بخش‌هایی که تغییرات پاسخ محدودتری دارند، جلوگیری شود.

درنهایت، مدل عددی نمونه N02 شامل حدود ۳۴ هزار المان بود. شبکه‌بندی مش انتخاب‌شده ضمن فراهم‌نمودن جزئیات کافی برای بررسی رفتار ناحیه اتصال و ناحیه تشکیل تغییر شکل‌های پلاستیک، از نظر حجم محاسباتی نیز در محدوده قابل قبول قرار گرفت. نمای کلی شبکه‌بندی مدل اجزای محدود نمونه N02 در شکل (۱۷) ارائه شده است. در مدل عددی، جوش‌ها به‌صورت مجزا مدل نشده و اتصال اجزا با استفاده از قید Tie برقرار شد. بنابراین، مدل حاضر برای بازتولید رفتار کلی اتصال توسعه یافته و قابلیت شبیه‌سازی آسیب و شکست موضعی جوش‌ها را ندارد.



شکل ۱۹- مقایسه ناحیه خرابی ایجاد شده در تیر: (الف) مدل عددی نمونه N02، (ب) نمونه آزمایشگاهی N02

۷- نتیجه گیری

در این پژوهش، رفتار چرخه ای دو نمونه اتصال تیر به ستون فولادی با ستون جعبه ای تحت بارگذاری چرخه ای مورد بررسی قرار گرفت. هر دو نمونه دارای هندسه، مصالح و مشخصات سازه ای مشابه بودند و تفاوت اصلی آن ها به نحوه اجرای اتصال ورق پیوستگی افقی داخل ستون جعبه ای مربوط بود. در نمونه N01، ورق پیوستگی با استفاده از فرآیند جوش الکترواسلاگ (ESW) و در نمونه N02، همان جزئیات اتصال با استفاده از جوشکاری قوس الکتریکی دستی (SMAW) اجرا شد. هدف اصلی این مطالعه، بررسی تأثیر جزئیات اجرایی ناحیه اتصال و قابلیت اطمینان فرآیند ساخت بر شکل گیری مکانیزم مطلوب لرزه ای و توسعه مفصل پلاستیک در تیر بود.

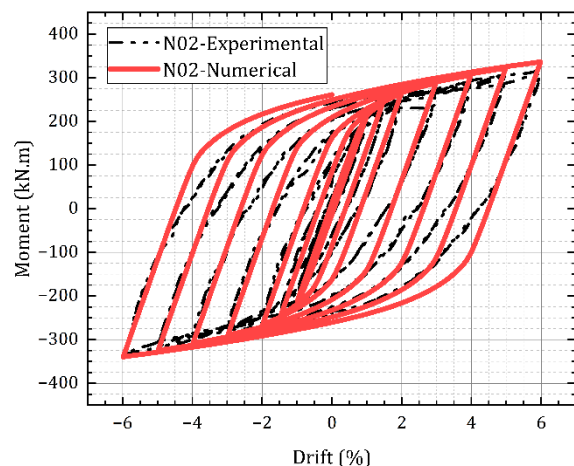
نتایج آزمایش ها نشان داد که عملکرد لرزه ای اتصالات تیر به ستون جعبه ای تنها به تأمین مقاومت اسمی اجزا وابسته نیست، بلکه کیفیت اجرا و قابلیت اطمینان ناحیه اتصال نقش تعیین کننده ای در مسیر توسعه آسیب دارد. در نمونه N01، با وجود انجام کنترل های اولیه ساخت و ارزیابی کیفیت جوش های ناحیه اتصال با استفاده از آزمون غیرمخرب اولتراسونیک (UT)، آسیب زود هنگام در ناحیه اتصال تحت بارگذاری چرخه ای رخ داد. آسیب زود هنگام در ناحیه اتصال نمونه N01 موجب تمرکز تغییر شکل ها، خرابی موضعی وجه ستون و افت مقاومت پیش از توسعه کامل مفصل پلاستیک تیر شد. این رفتار نشان داد که حتی تأیید کیفیت اجرایی جوش بر اساس کنترل های ساخت، لزوماً تضمین کننده عملکرد لرزه ای مطلوب اتصال نیست و جزئیات اجرایی حساس در ناحیه اتصال می تواند نقش تعیین کننده ای در حفظ مکانیزم مطلوب تیر ضعیف-ستون قوی داشته باشد.

بررسی منحنی های پوش نرمال شده بر اساس ظرفیت پلاستیک اسمی تیر، نشان داد که نمونه N01 تنها توانست به حدود ۰/۷ برابر ظرفیت پلاستیک اسمی تیر ($0.7V_{Mp}$) دست یابد. در این نمونه، خرابی زود هنگام ناحیه اتصال پیش از بسیج کامل

۶-۳- مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی

به منظور ارزیابی صحت مدل اجزای محدود، نتایج حاصل از تحلیل عددی نمونه N02 با نتایج آزمایشگاهی آن مقایسه شد. این مقایسه بر اساس رفتار لنگر-دوران، ظرفیت مقاومتی و نحوه توسعه تغییر شکل های غیرالاستیک انجام گرفت.

مقایسه منحنی لنگر-دوران حاصل از تحلیل عددی و آزمایشگاهی در شکل (۱۸) ارائه شده است. مدل عددی توانسته است رفتار کلی نمونه شامل سختی اولیه و روند افزایش ظرفیت پس از تسلیم در مراحل نهایی بارگذاری را با تطابق قابل قبول بازتولید کند. اختلافات موجود میان نتایج عددی و آزمایشگاهی را می توان به عواملی مانند ساده سازی شرایط مرزی، ایده آل سازی جزئیات اجرایی و تفاوت های موجود در رفتار واقعی مصالح نسبت داد. همچنین می توان تفاوت نتایج نمونه آزمایشگاهی و عددی را در چرخه بازگشت، به جابه جایی محل تکیه گاه مفصلی در دو انتهای ستون نسبت داد.



شکل ۱۸- مقایسه منحنی لنگر-دوران حاصل از مدل عددی و آزمایشگاهی نمونه N02

بررسی نتایج نشان داد که مدل عددی توانسته است روند کلی رفتار نمونه، شامل توسعه ناحیه پلاستیک در تیر و مکانیزم خرابی مشاهده شده در آزمایش را بازتولید کند. مقایسه ناحیه خرابی ایجاد شده در تیر مدل عددی و نمونه آزمایشگاهی N02 در شکل (۱۹) ارائه شده است. همان طور که مشاهده می شود، در هر دو حالت، تغییر شکل های پلاستیک عمدتاً در ناحیه تیر متمرکز شده و مکانیزم خرابی مشابهی در عضو تیر ایجاد شده است.

ظرفیت پلاستیک تیر رخ داد و در نتیجه، ظرفیت واقعی عضو تیر به طور کامل مورد استفاده قرار نگرفت. در مقابل، نمونه N02 توانست از ظرفیت پلاستیک اسمی تیر عبور کرده و به حدود $1/3$ برابر M_p برسد. این موضوع نشان دهنده توانایی نمونه N02 در توسعه مقاومت پس از تسلیم و فعال سازی ظرفیت اضافی تیر در محدوده تغییر شکل های غیرالاستیک است.

مقایسه پارامتر سخت شوندگی پس از تسلیم نیز تفاوت قابل توجهی در رفتار دو نمونه نشان داد. مقدار ضریب سخت شوندگی پس از تسلیم برای نمونه N01 برابر با حدود $1-1/2$ به دست آمد که بیانگر آغاز کاهش مقاومت پس از ورود به محدوده غیرالاستیک و ناتوانی اتصال در توسعه رفتار پایدار پس از تسلیم است. در مقابل، نمونه N02 دارای مقدار $7/8$ بود که نشان دهنده توانایی اتصال در حفظ مقاومت و توسعه سخت شوندگی پس از تسلیم در تغییر شکل های بزرگ تر است.

از نظر ظرفیت اتلاف انرژی نیز اختلاف قابل توجهی بین دو نمونه مشاهده شد. انرژی تلف شده تجمعی نمونه N01 حدود 128 کیلوژول و برای نمونه N02 حدود 232 کیلوژول به دست آمد. بنابراین نمونه N02 توانست حدود $1/8$ برابر انرژی بیشتری نسبت به نمونه N01 مستهلک کند. افزایش ظرفیت اتلاف انرژی در نمونه N02 ناشی از حفظ عملکرد اتصال، توسعه تدریجی تغییر شکل های پلاستیک در تیر و جلوگیری از تمرکز آسیب زود هنگام در ناحیه اتصال بود.

در مجموع، نتایج این پژوهش نشان داد که عملکرد لرزه ای اتصالات تیر به ستون جعبه ای علاوه بر مقاومت اجزا، به حفظ یکپارچگی مسیر انتقال نیرو در ناحیه اتصال وابسته است. نتایج مشاهده شده بیانگر ضعف ذاتی فرآیند جوشکاری الکترواسلاگ نیست، بلکه نشان می دهد آسیب زود هنگام در ناحیه اتصال می تواند مانع از توسعه مفصل پلاستیک تیر و تحقق مکانیزم مطلوب لرزه ای شود. از این رو، بررسی و توسعه جزئیات اجرایی جایگزین برای ورق های پیوستگی داخلی، با هدف کاهش حساسیت اتصال به آسیب های احتمالی و بهبود قابلیت اجرا و کنترل کیفیت، از اهمیت ویژه ای برخوردار است. با توجه به محدود بودن تعداد نمونه های آزمایشگاهی، نتایج این پژوهش صرفاً بیانگر رفتار اتصالات مورد مطالعه بوده و تعمیم آن ها به سایر اتصالات، نیازمند انجام آزمایش های تکمیلی با تعداد نمونه های بیش تر است.

- [14] Rezaeian, A., Jahanbakhti, E., and Fanaie, N. (2022), "Numerical Study of Panel Zone in a Moment Connection without Continuity Plates", *Journal of Earthquake Engineering*, 26, pp.930-948.
- [15] Chen, C.C., Lin, C.C., and Lin, C.H. (2006), "Ductile Moment Connections used in Steel Column-Tree Moment-Resisting Frames", *Journal of Constructional Steel Research*, 62, pp.793-801.
- [16] Saneei Nia, Z., Mazroi, A., Ghassemieh, M., and Pezeshki, H. (2014), "Seismic Performance and Comparison of Three Different I-Beam to Box-Column Joints", *Earthquake Engineering & Engineering Vibration*, 13, pp.717-729.
- [17] Ghassemieh, M., and Mirghaderi, S.R. (2021), "Cyclic Dependency Assessment of RBS Moment Connection in Box-Column", *Journal of Constructional Steel Research*, 177, p.106472.
- [18] American Institute of Steel Construction (AISC), (2022), AISC 341-22: Seismic Provisions for Structural Steel Buildings, American Institute of Steel Construction, Chicago, IL.
- [19] Smith, M. (2009), ABAQUS/Standard User's Manual, Version 6.9, Dassault Systèmes Simulia Corp., Providence, RI.
- [20] Chaboche, J.L. (1991), "On Some Modifications of Kinematic Hardening to Improve the Description of Ratchetting Effects", *International Journal of Plasticity*, 7, pp.661-678.
- [1] Bruneau, M., Uang, C.M., and Whittaker, A.S. (1998), "Ductile Design of Steel Structures", McGraw-Hill, New York.
- [2] Building Seismic Safety Council (BSSC), (2003), NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures (FEMA 450), Building Seismic Safety Council, Washington, D.C., USA.
- [3] Rajaiee, M., and Razavi Tabatabaei, A. (2026), "Numerical Investigation of Removing Horizontal Continuity Plate in Beam to Column Connection in the Box Columns in Moment Resisting Frame Systems (MRFs)", *Modares Civil Engineering Journal*, 26, pp.43-57.
- [4] Hajjar, J.F., Dexter, R.J., Ojard, S.D., Ye, Y., and Cotton, S.C. (2003), "Continuity Plate Detailing for Steel Moment-Resisting Connections", *Engineering Journal*, 40(4), pp.189-211.
- [5] Umeda, T., Ishii, T., Fujisawa, S., and Shimokawa, H. (2022), "Effect of Penetration Depth of Electro-Slag Welding on Ductility of Beam-to-Column Connection", *Journal of Constructional Steel Research*, 189, p.107081.
- [6] Harada, Y., Iyama, J., Matsumoto, Y., and Oki, K. (2023), "Electroslag Welding Applications for Steel Building Construction in Japan: A State-of-the-Art Review", *Engineering Journal*, 60, pp.93-110.
- [7] Kafi, M., and Tariqi, P. (2018), "Suggestions for Removing Continuity Plates in Box Columns", *Sharif Civil Engineering Journal*, 34(2), pp.143-151. (in Persian)
- [8] Agharafee, A., and Hosseini, M. (2017), "Seismic Performance of Long-Bolted End-Plate Connections with Removal of Continuity Plates", *Structure and Steel Journal*. (in Persian)
- [9] Saffari, H., Hedayat, A.A., and Soltani Goharrizi, N. (2015), "New Alternatives for Continuity Plates in I-Beam to Box Columns Connections", *Asian Journal of Civil Engineering*, 16, pp.219-233.
- [10] Mirghaderi, S.R., Torabian, S., and Keshavarzi, F. (2010), "I-beam to Box-Column Connection by a Vertical Plate Passing through the Column", *Engineering Structures*, 32, pp.2034-2048.
- [11] Torabian, S., Mirghaderi, S.R., and Keshavarzi, F. (2012), "Moment-Connection between I-Beam and Built-Up Square Column by a Diagonal through Plate", *Journal of Constructional Steel Research*, 70, pp.385-401.
- [12] Ting, L.C., Shanmugam, N.E., and Lee, S.L. (1991), "Box-Column to I-Beam Connections with External Stiffeners", *Journal of Constructional Steel Research*, 18, pp.209-226.
- [13] Taghizadeh, A., and Hosseinzadeh Asl, M. (2014), "Investigation of Seismic Behavior of Rigid Beam-to-Column Connections with Reduced Beam Section", *The 15th Civil Engineering Students Conference of Iran*. (in Persian)