

Research Article

Performance Evaluation of a Steel Moment-Resisting Connection Equipped with a Hybrid Steel Slit Damper and Shape Memory Alloy Self-Centering System

Behrad Baghaei¹, Mehdi Ghassemieh², Mohammad Soheil Ghobadi^{3*}

1- Master's Graduate, School of Civil Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

2- Professor, School of Civil Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

3- Associate Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering and Technology, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran



Citation: Baghaei, B., Ghassemieh, M., and Ghobadi, M.S. (2026), "Performance Evaluation of a Steel Moment-Resisting Connection Equipped with a Hybrid Steel Slit Damper and Shape Memory Alloy Self-Centering System", *Journal of Steel & Structures*, 20(53), pp.60-79 (In Persian).

doi <https://doi.org/10.22034/jss.2026.600357.1056>

Article info:

Article History:

Received: 13 March 2026

Revised: 26 June 2026

Accepted: 3 July 2026

Published: 23 September 2026

Keywords:

Residual Drift
Self-Centering
Steel Slit Damper
Shape Memory Alloy
Moment-Resisting Connection
Hysteresis

ABSTRACT

Background: Limiting residual drift is one of the objectives in the design of modern structures, as small residual drifts facilitate structural repairability following an earthquake. Nitinol shape memory alloy is an advanced and expensive self-centering material capable of recovering residual deformations. On the other hand, steel slit dampers are among the desirable types of energy dissipation devices. In this study, a steel moment-resisting connection equipped with a hybrid system comprising a steel slit damper and a Nitinol shape memory alloy component is numerically investigated, and the combined performance of the energy-dissipating and self-centering components is evaluated.

Methods: First, an experimentally tested connection equipped with a slit damper is considered as the reference specimen. Subsequently, a parallel configuration consisting of a steel damping component and a Nitinol self-centering component is introduced and numerically investigated. Due to the high cost of Nitinol in practical applications, thin Nitinol wires are employed, while a series configuration of the two components is not feasible because of its higher Nitinol material demand. In designing the numerical specimens, the stiffness of the experimental reference specimen is maintained as a constant reference stiffness for the hybrid slit damper-self-centering system. 24 finite element models are developed, and the yield rotation, yield moment, residual rotation, stresses in the connection components under cyclic loading, and dissipated energy are evaluated.

Results: The results indicate that the parallel arrangement significantly increases connection strength, while increasing the contribution of Nitinol causes the hysteretic response to become progressively more flag-shaped. However, the self-centering effect in reducing residual drift remains limited. Even in the specimen containing the largest amount of Nitinol, the reduction in residual rotation is approximately 15%. The results also demonstrate that a stiffener in the connection seat region is essential to maintain connection rigidity.

Conclusion: Overall, the parallel configuration is suitable for increasing connection strength and providing limited self-centering capability; however, it is insufficient for achieving a substantial reduction in residual drift. When residual drift reduction is the primary objective, alternative arrangements, including series configurations, should be investigated considering the required amount of Nitinol, constructability, and cost.

* Corresponding Author's E-mail: msgghobadi@eng.ikiu.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

Steel moment-resisting frames are widely used in seismic-resistant construction because they provide strength, stiffness, and ductility. Nevertheless, severe earthquakes have shown that concentration of inelastic deformation in beam-to-column connections can lead to extensive damage and may hinder post-earthquake repair. Steel slit dampers provide an established means of concentrating inelastic deformation in replaceable steel components and dissipating seismic energy through stable hysteretic behavior. Shape memory alloys, particularly nickel–titanium (NiTi), offer a complementary capability through superelasticity and self-centering. The main limitation of Nitinol in civil engineering applications is its high cost, which makes the use of large cross-sectional areas impractical. This study therefore investigates a hybrid connection in which a steel slit damper and a Nitinol-based self-centering component operate in parallel. The objective is to determine whether a small quantity of Nitinol can provide useful self-centering while preserving the energy-dissipation capacity and stiffness characteristics of a conventional slit-damper connection.

Methods

An experimentally tested steel moment-resisting connection equipped with a steel slit damper is selected as the reference configuration. The connection and the principal material properties are modeled using three-dimensional finite elements in Abaqus, and the numerical response is compared with the available experimental hysteresis curve to validate the finite element model. The Nitinol wire is subsequently modeled using an equivalent two-node truss formulation with a superelastic constitutive response calibrated against experimental results reported in the literature. The proposed hybrid system consists of the slit damper and the Nitinol self-centering component placed in parallel so that both components undergo the same deformation and jointly transfer force from

the beam to the support. A dedicated steel arrangement is used to keep the Nitinol wires in tension because thin wires cannot reliably carry compression. The total stiffness of each hybrid specimen is maintained approximately equal to the stiffness of the reference connection by reducing the number of vertical steel members in the slit damper as the stiffness contribution of the Nitinol component increases. Four main groups are considered, with different numbers of steel yielding members and three Nitinol wire lengths. For each group, corresponding specimens with and without stiffeners beneath the beam seat are investigated, resulting in 24 numerical specimens. Nonlinear quasi-static cyclic analyses are conducted using the loading protocol adopted for the reference experiment. The main response parameters are yielding rotation, yielding moment, residual drift angle, ultimate strength, stress distribution, hysteretic response, and dissipated energy.

Results

The finite element model of the reference connection reproduces the main characteristics of the experimental moment-rotation response in both the elastic and nonlinear ranges, indicating that the adopted numerical approach is suitable for the subsequent parametric study. The numerical simulation of the Nitinol wire also reproduces the characteristic superelastic response, including the transformation and unloading behavior. For the hybrid specimens, the parallel arrangement increases the strength of the connection as the contribution of the Nitinol component increases. Because the overall stiffness is intentionally kept approximately constant, the changes in the initial stiffness are limited, while the yield moment and resistance can increase considerably. The strongest configurations increase the yield moment by as much as about 50%, and the yield rotation can increase from approximately 0.01 to about 0.025. The addition of Nitinol also modifies the hysteretic loops toward a flag-shaped response, confirming the introduction of a self-centering mechanism. However, the magnitude of this effect is

smaller than expected because the Nitinol component acts in parallel with the energy-dissipating steel damper. The steel damper continues to accommodate a substantial portion of the deformation and force, thereby limiting the force recovery supplied by Nitinol during unloading. Consequently, residual rotation is reduced only modestly. Even the configurations containing the largest amount of Nitinol achieve a maximum reduction of approximately 15% in residual rotation. Increasing the Nitinol amount beyond the level represented by the M4 group does not provide a proportional improvement. In the M5 configurations, the larger Nitinol force produces local distortion in the beam-seat region and may reduce the intended rigidity of the connection. The results demonstrate that stiffeners beneath the beam seat are essential for controlling local distortion when the Nitinol component carries a larger share of the force. The dissipated energy of the hybrid connections is generally lower than that of the reference specimen because a greater portion of the response is associated with the recentering mechanism rather than plastic dissipation in the steel damper. The maximum observed reduction in dissipated energy is approximately 15%, corresponding to the specimens with the greatest reduction in residual rotation. These findings indicate that the proposed parallel arrangement can improve strength and introduce a limited flag-shaped response, but it cannot provide substantial residual-drift control.

Conclusion

The numerical investigation demonstrates that combining a steel slit damper with a small-area Nitinol self-centering component in a parallel configuration is structurally feasible and can be implemented without increasing the overall target stiffness of the reference connection. The hybrid detail can significantly enhance connection strength and can introduce a measurable, although limited, self-centering effect. The maximum reduction in residual rotation is approximately 15%, while the yield moment can increase by up to about 50%. The study also identifies the necessity of stiffeners beneath the beam seat for specimens in which the Nitinol component has a relatively large force contribution. Overall, the parallel configuration is more effective as a strength-enhancement mechanism than as a residual-

drift-control system. If substantial residual-drift reduction is required, a series arrangement of the dissipative and self-centering components appears more promising, but such a system would require a larger quantity of Nitinol and a practical connection detail. Further studies should therefore focus on the constructability, cost, durability, and seismic performance of alternative configurations.

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

During preparation of this manuscript, the authors used ChatGPT (OpenAI) for language editing and formatting assistance. After using this tool, the authors reviewed and edited the 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

All authors contributed to the development of the study, interpretation of the results, and review of the manuscript.

Conflicts of interest

The authors declare no conflict of interest.

مقاله پژوهشی

ارزیابی عملکرد اتصال گیردار فولادی مجهز شده به سیستم ترکیبی میراگر شکافدار فولادی و مؤلفه مرکزگرای آلیاژ حافظه‌دار

بهراد بقائی^۱، مهدی قاسمیه^۲، محمد سهیل قبادی^{۳*}

۱- کارشناس ارشد، دانشکده عمران، دانشکدگان فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۲- استاد، دانشکده عمران، دانشکدگان فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۳- دانشیار، گروه عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران



Citation: Baghaei, B., Ghassemieh, M., and Ghobadi, M.S. (2026), "Performance Evaluation of a Steel Moment-Resisting Connection Equipped with a Hybrid Steel Slit Damper and Shape Memory Alloy Self-Centering System", *Journal of Steel & Structures*, 20(53), pp.60-79 (In Persian).

doi <https://doi.org/10.22034/jss.2026.600357.1056>

چکیده

زمینه پژوهش: محدود نمودن دررفت پسماند، یکی از اهداف طراحی مهندسی در سازه‌های جدید است و کوچک‌بودن دررفت پسماند، تعمیرپذیری سازه را پس از وقوع زلزله ممکن می‌سازد. آلیاژ حافظه‌دار نایتینول یکی از مصالح گران‌قیمت مرکزگرای جدید است که خاصیت بازیابی تغییر شکل‌های پسماند را دارد. از سوی دیگر استفاده از میراگرهای شکافدار فولادی یکی از انواع مطلوب میراگرهای انرژی است. در این مقاله یک اتصال گیردار فولادی مجهز به یک سیستم ترکیبی میراگر شکافدار فولادی و مؤلفه آلیاژ حافظه‌دار نایتینول مورد مطالعه عددی قرار می‌گیرد و عملکرد مشترک مؤلفه میراگر انرژی و مؤلفه مرکزگرای ارزیابی می‌شود.

روش پژوهش: در ابتدا یک نمونه آزمایشگاهی مجهز به میراگر شکافدار، به‌عنوان نمونه مرجع در نظر گرفته می‌شود، سپس پیکربندی موازی مؤلفه میراگر فولادی و مؤلفه مرکزگرای آلیاژ حافظه‌دار معرفی و بررسی عددی می‌شود. در صنعت به‌دلیل گرانی مصالح نایتینول از سیم‌های نازک نایتینول استفاده می‌شود و استفاده از حالت سری دو مؤلفه به‌دلیل مصرف بالای مصالح نایتینول امکان‌پذیر نیست. در طراحی نمونه‌های عددی، سختی نمونه مرجع آزمایشگاهی به‌عنوان سختی مرجع ثابت در طراحی سیستم ترکیبی مؤلفه مرکزگرا و میراگر شکافدار در نظر گرفته می‌شود. ۲۴ نمونه عددی با مدل‌سازی اجزای محدود ساخته می‌شود و پارامترهای دوران تسلیم، لنگر تسلیم، دوران پسماند، تنش‌های اعضای اتصال در تحلیل‌های چرخه‌ای و انرژی مستهلک‌شده مورد مطالعه قرار می‌گیرد.

یافته‌ها: نتایج نشان می‌دهد که قرارگیری موازی دو مؤلفه موجب افزایش محسوس مقاومت اتصال می‌شود و با افزایش سهم نایتینول، رفتار هیستریزس تا حدی به شکل پرجمعی نزدیک می‌شود. با این حال، اثر مرکزگرایی در کاهش دررفت پسماند محدود بوده و حتی در نمونه دارای بیش‌ترین مقدار نایتینول، میزان کاهش دوران پسماند تقریباً ۱۵٪ است. همچنین مشخص شد استفاده از سخت‌کننده در ناحیه نشیمن برای حفظ صلبیت اتصال ضروری است.

نتیجه‌گیری: در مجموع، پیکربندی موازی برای افزایش مقاومت و ایجاد مقدار محدودی مرکزگرایی مناسب است، اما برای کاهش چشم‌گیر دررفت پسماند کافی نیست. در صورتی که هدف اصلی کاهش دررفت پسماند باشد، آرایش‌های دیگری، از جمله پیکربندی سری، باید با توجه به مقدار نایتینول مورد نیاز، قابلیت ساخت و هزینه بررسی شوند.

اطلاعات مقاله:

سابقه مقاله:

تاریخ دریافت: ۲۲ اسفند ماه ۱۴۰۴

تاریخ بازنگری: ۵ تیر ماه ۱۴۰۵

تاریخ پذیرش: ۱۲ تیر ماه ۱۴۰۵

تاریخ انتشار: ۱ مهر ماه ۱۴۰۵

واژگان کلیدی:

دررفت پسماند

مرکزگرایی

میراگر شکافدار فولادی

آلیاژ حافظه‌دار

اتصال گیردار

هیستریزس

* آدرس ایمیل نویسنده مسئول: msgbobadi@eng.ikiu.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

قاب‌های خمشی فولادی یکی از سیستم‌های متداول برای تأمین مقاومت و شکل‌پذیری سازه‌ها در برابر بارهای لرزه‌ای هستند. با این حال، عملکرد برخی اتصالات تیر به ستون فولادی در زمین‌لرزه‌های شدید، به‌ویژه زمین‌لرزه‌های نورتریج^۱ در سال ۱۹۹۴ و کوبه^۲ در سال ۱۹۹۵، نشان داد که تمرکز تغییرشکل‌های غیرالاستیک در نواحی حساس اتصال می‌تواند منجر به آسیب‌های شدید و حتی شکست ترد اعضای اصلی شود. این مسئله موجب توسعه جزئیات جدید اتصال با هدف کنترل محل تشکیل مفاصل پلاستیک و افزایش قابلیت استهلاک انرژی سازه شده است [۱]. یکی از راهکارهای مطرح شده در این زمینه، استفاده از میراگرهای شکاف دار فولادی^۳ در اتصالات گیردار فولادی است (شکل (۱)). این میراگرها معمولاً از صفحات فولادی دارای مجموعه‌ای از شکاف‌های منظم تشکیل می‌شوند که در اثر اعمال بارهای رفت و برگشتی، نوارهای فولادی حاصل از برش شکاف‌ها وارد ناحیه تسلیم شده و انرژی زلزله را از طریق رفتار هیستریزس مستهلک می‌کنند. ویژگی مهم این سیستم آن است که با طراحی مناسب میراگر، می‌توان تغییرشکل‌های غیرالاستیک را در یک جزء مشخص و قابل کنترل متمرکز نمود و از ورود تیر و ستون به ناحیه آسیب شدید جلوگیری نمود [۱-۳].



شکل ۱- اتصال گیردار مجهز به میراگر شکاف دار فولادی [۲]

اوه^۴ و همکاران یکی از مطالعات مهم اولیه در این زمینه را ارائه کردند و یک سیستم قاب خمشی فولادی مجهز به میراگر شکاف دار در ناحیه اتصال تیر به ستون پیشنهاد دادند. نتایج

آزمایش‌های چرخه‌ای نشان داد که رفتار هیستریزس میراگر، پایدار بوده و تغییرشکل‌های پلاستیک و بخش عمده اتلاف انرژی در میراگر متمرکز می‌شود، درحالی‌که اعضای اصلی قاب می‌توانند عمدتاً در محدوده الاستیک باقی بمانند. این رویکرد علاوه بر بهبود عملکرد لرزه‌ای، امکان تعمیرپذیری سازه پس از زلزله را از طریق تعویض جزء آسیب دیده فراهم می‌کند [۱].

کروغلو^۵ و کوکن^۶ عملکرد اتصالات تیر به ستون مجهز به میراگرهای شکاف دار فولادی را به صورت آزمایشگاهی بررسی کردند. نتایج آزمایش‌های تمام مقیاس، رفتار هیستریزس مناسب، ظرفیت اتلاف انرژی مطلوب و سختی قابل قبول اتصال را نشان دادند و تأیید کردند که می‌توان تغییرشکل‌های غیرالاستیک را عمدتاً به میراگر محدود نمود [۲].

مطالعات عددی و آزمایشگاهی بعدی نیز نشان دادند که عملکرد میراگر به پارامترهایی نظیر تعداد و هندسه شکاف‌ها، ضخامت صفحه، طول نوارهای تسلیم و نحوه اتصال میراگر به اجزای اصلی وابسته است [۳-۵].

در راستای بهبود عملکرد این سیستم، پیکربندی‌های جدیدی از میراگر شکاف دار نیز پیشنهاد شده‌اند. شکسته‌بند و بیات با معرفی میراگر شکاف دار T شکل، تلاش کردند هم‌زمان ظرفیت سختی، مقاومت، شکل‌پذیری و استهلاک انرژی اتصال را افزایش دهند. نتایج تحلیل‌های غیرخطی نشان داد که تسلیم و تغییرشکل پلاستیک میراگر می‌تواند به عنوان مکانیزم اصلی اتلاف انرژی عمل کرده و سایر اجزای اتصال تا حد زیادی در محدوده الاستیک باقی بمانند [۴]. همچنین، استفاده از میراگرهای شکاف دار در قالب‌های هندسی جدید، از جمله میراگرهای چندشکافی و میراگرهای جعبه‌ای، به منظور افزایش ظرفیت اتلاف انرژی و کنترل بهتر پاسخ لرزه‌ای مورد بررسی قرار گرفته است [۵-۷].

در سال‌های اخیر، تحقیقات بیشتری بر بهینه‌سازی هندسه میراگر، توسعه مدل‌های عددی و بررسی رفتار چرخه‌ای آن‌ها متمرکز شده است. نتایج مطالعات نشان می‌دهد که تغییرشکل هندسی شکاف‌ها می‌تواند به طور قابل توجهی بر مقاومت، سختی، شکل‌پذیری و ظرفیت اتلاف انرژی میراگر اثرگذار باشد [۶ و ۸]. همچنین، مطالعات عددی و آزمایشگاهی اخیر بر روی نمونه‌های مختلف میراگرهای شکاف دار، امکان تعیین هندسه‌های بهینه برای دستیابی به رفتار هیستریزس پایدار و ظرفیت جذب انرژی

^۵ Koroğlu
^۶ Köken

^۱ Northridge
^۲ Kobe
^۳ Steel Slit Dampers
^۴ Oh

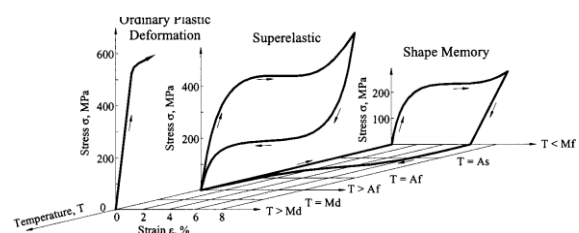
دسروش^۵ همکاران از آلیاژهای حافظه‌دار در سیستم‌های سازه‌ای با هدف کاهش تغییرشکل‌های ماندگار استفاده کردند [۱۱]، درحالی‌که اسپیچر^۶ و همکاران یک اتصال تیر به ستون مجهز به تاندون‌های فوق‌الاستیک نایتینول را به‌صورت آزمایشگاهی بررسی کرده و قابلیت اتصال در بازگرداندن قابل توجه تغییر مکان پس از باربرداری را نشان دادند [۱۳].

همچنین، اتصال تیر به ستون مجهز به ترکیب تاندون‌های نایتینول و فولادی توسط ونگ^۷ و همکاران بررسی شد که در آن ضمن حفظ قابلیت مرکزگرایی، بخشی از اتلاف انرژی توسط اجزای فولادی تأمین شد [۱۴]. از دیگر کاربردهای مهم می‌توان به استفاده از پیچ‌های نایتینول در اتصالات صفحه انتهایی و اتصال پای ستون اشاره نمود [۱۲ و ۱۵]. نتایج این مطالعات نشان می‌دهد که استفاده از نایتینول می‌تواند با انتقال تغییرشکل‌های غیرالاستیک به المان‌های قابل کنترل، کاهش تغییرشکل ماندگار و افزایش قابلیت بازگشت سازه پس از زلزله را به‌همراه داشته باشد؛ باین‌حال، هزینه بالاتر نایتینول، حساسیت رفتار آن به دما و نرخ بارگذاری و ظرفیت استهلاک انرژی نسبتاً محدودتر در مقایسه با فولاد، ازجمله عواملی هستند که در طراحی چنین اتصالاتی باید مورد توجه قرار گیرند [۱۲ و ۱۴].

خاصیت مرکزگرایی آلیاژهای حافظه‌دار می‌تواند به کاهش دریافت پسماند^۸ در سازه‌ها کمک به‌سزایی کند که امروزه مسئله مهمی در طراحی سازه در نظر گرفته می‌شود. بر اساس آیین‌نامه FEMA P-58 [۱۶]، دریافت پسماند یکی از شاخص‌های اصلی برای ارزیابی قابلیت تعمیرپذیری ساختمان پس از زلزله است. این آیین‌نامه برای این پارامتر حدودی را در نظر می‌گیرد که بر اساس آن، دریافت پسماند کم‌تر از ۰/۲٪ نشان‌دهنده انحراف ناچیز و عدم نیاز به هم‌راستاسازی سازه است؛ در حدود ۰/۵٪ نیاز به تعمیر و هم‌راستاسازی اجزای سازه‌ای و غیرسازه‌ای افزایش می‌یابد و در مقادیر حدود ۱٪ امکان تعمیر اقتصادی سازه به‌شدت کاهش پیدا می‌کند. همچنین مدل شکنندگی تعمیرپذیری FEMA P-58 دارای مقدار میانه ۱٪ برای حالت غیرقابل تعمیربودن است [۱۶]؛ در حدود ۰/۵٪ احتمال تعمیرپذیربودن بسیار زیاد و در حدود ۲٪ احتمال غیرقابل تعمیربودن بسیار زیاد است. بنابراین، در سیستم‌های لرزه‌ای مرکزگرا، محدودنمودن دریافت پسماند به کم‌تر از ۰/۵٪ را می‌توان به‌عنوان یک هدف عملکردی مهم برای

بیش‌تر را فراهم کرده‌اند [۸]. مطالعات جدید نیز قابلیت این سیستم‌ها را برای افزایش مقاومت و شکل‌پذیری اتصال و همچنین بهبود قابلیت تعمیرپذیری پس از زلزله تأیید کرده‌اند [۹ و ۱۰]. بر این اساس، میراگرهای شکاف‌دار فولادی را می‌توان یکی از گزینه‌های مناسب برای توسعه اتصالات گیردار فولادی با رویکرد کنترل آسیب، تمرکز تغییرشکل پلاستیک و افزایش قابلیت تعمیرپذیری پس از زلزله دانست.

در کنار میراگرهای فولادی، استفاده از آلیاژهای حافظه‌دار، به‌ویژه آلیاژ نیکل-تیتانیوم (NiTi) یا نایتینول^۱، نیز به‌عنوان یک ماده هوشمند در سیستم‌های مقاوم لرزه‌ای مورد توجه قرار گرفته است. با توجه به شکل (۲)، نایتینول به‌دلیل قابلیت تحمل تغییرشکل‌های بزرگ و بازیابی شکل اولیه خود، دارای دو ویژگی اصلی اثر حافظه شکلی^۲ و فوق‌الاستیسیته^۳ است [۱۱ و ۱۲]. شکل (۲) رفتار مادی نایتینول متناسب با دما را نشان می‌دهد. در اثر حافظه شکلی، آلیاژ ابتدا در فاز مارتنزیتی تحت تغییرشکل قرار می‌گیرد و پس از باربرداری بخشی از تغییرشکل باقی می‌ماند؛ با افزایش دما و تبدیل مارتنزیت به آستنیت، این تغییرشکل بازیابی شده و ماده به شکل اولیه خود بازمی‌گردد. در مقابل، هنگامی که نایتینول در دمای بالاتر از دمای پایان تشکیل آستنیت قرار داشته باشد، تحت بارگذاری می‌تواند از طریق تبدیل برگشت‌پذیر فاز آستنیت به مارتنزیت تغییرشکل‌های بسیار بزرگی را تحمل کند و پس از حذف بار، بدون نیاز به اعمال حرارت، به شکل اولیه خود بازگردد. این رفتار فوق‌الاستیک علاوه بر ایجاد قابلیت مرکزگرایی^۴، موجب ایجاد حلقه‌های هیستریزس پایدار و در نتیجه استهلاک بخشی از انرژی ورودی زلزله می‌شود [۱۲ و ۱۳]. به همین دلیل، نایتینول در اتصالات فولادی به‌صورت میله، کابل، پیچ یا المان‌های کششی مورد استفاده قرار گرفته است.



شکل ۲- منحنی سه‌بعدی تنش-کرنش-دما آلیاژ حافظه‌دار شکلی نایتینول [۱۱]

⁵ Desroches

⁶ Speicher

⁷ Wang

⁸ Residual Story Drift

¹ Nitinol

² Shape Memory Effect

³ Superelasticity

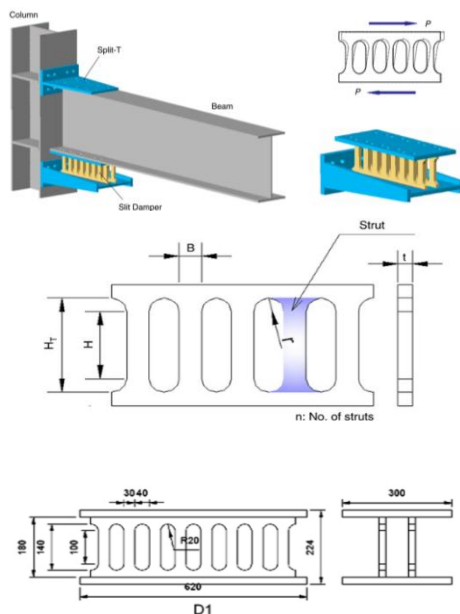
⁴ Self-Centering

جدول ۱- مشخصات هندسی تیر و ستون آزمایش مرجع [۱]

اجزای اتصال	طول (mm)	عرض بال (mm)	ضخامت بال (mm)	ارتفاع جان (mm)	ضخامت جان (mm)
تیر	۳۳۴۶	۳۰۰	۱۷	۵۸۲	۱۲
ستون	۳۲۰۰	۴۰۰	۲۱	۴۰۸	۲۱

مشخصات هندسی سپری فوقانی و نشیمن تحتانی نیز در مرجع [۱] آمده است. ابعاد میراگر شکاف دار فولادی که مطابق شکل (۴) است. در مدل سازی این نمونه، هر قطعه مشخصات مکانیکی متفاوتی دارد که بر اساس مرجع [۱] در جدول (۲) ارائه شده است. در جدول مذکور؛ تنش تسلیم فولاد، (σ_{II}) تنش نهایی و E_{lo} درصد ازدیاد طول فولاد است. چگالی فولاد (7850 kg/m^3)، مدول الاستیسیته (210 GPa) و نسبت پواسون 0.3 در مدل سازی تعریف شده است. در شبیه سازی عددی، نمودار تنش- کرنش به صورت دوطبقی تعریف شده و مصالح همسان هستند و همچنین رفتار در کشش و فشار یکسان و سطح تسلیم برابری دارند.

سخت شدگی کرنش برای مصالح ایزوتروپیک در نظر گرفته شده است. مدل سازی ها در نرم افزار Abaqus انجام شد (شکل (۵)). در آزمایش، میراگر به ورق بال پایینی تیر و به نشیمن با اتصال جوشی متصل شده است که در مدل سازی به وسیله قید پیوستگی^۲ تعریف شده است.



شکل ۴- جزئیات میراگر شکاف دار فولادی به کار گرفته شده در اتصال

[۱]

افزایش قابلیت تعمیرپذیری و کاهش خسارات پس از زلزله در نظر گرفت.

در این مقاله یک سیستم ترکیبی شامل مؤلفه میراگر شکاف دار فولادی به همراه مؤلفه مرکزگرای آلیاژ حافظه دار نایتینول در اتصال گیردار فولادی به کار گرفته می شود و سعی می شود اثر ترکیبی این دو مؤلفه بررسی شود. سازگاری این دو مؤلفه به عنوان اعضای نیروبر باید بررسی شود و همچنین جزئیات اجرایی ارائه شده باید قابل استفاده در اتصال گیردار باشد. برای این منظور از شبیه سازی اجزای محدود استفاده و کارایی این میراگر ترکیبی بررسی می شود.

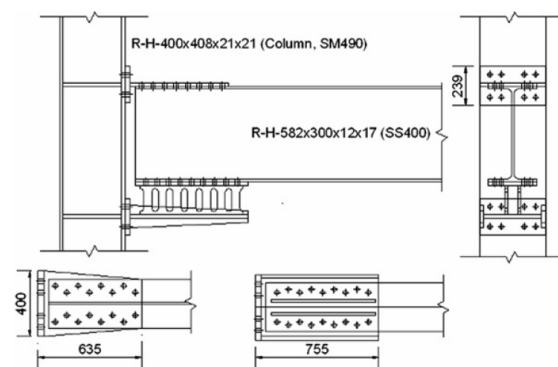
۲- صحت سنجی رفتار عددی نمونه مرجع آزمایشگاهی و

مصالح آلیاژ حافظه دار

۱-۲ اتصال گیردار تیر به ستون مجهز به میراگر شکاف دار

فولادی

برای صحت سنجی مدل سازی اجزای محدود، اتصال گیردار تیر به ستون مجهز به میراگر شکاف دار فولادی آزمایش شده توسط **اوه و همکاران** انتخاب شده است [۱]. شکل (۳) این نمونه را نشان می دهد. در این نمونه تیر از قسمت بال پایین توسط یک ورق به میراگر شکاف دار و از قسمت بال بالا توسط یک سپری به ستون متصل شده است.



شکل ۳- جزئیات نمونه اتصال (ابعاد میلی متر) [۱]

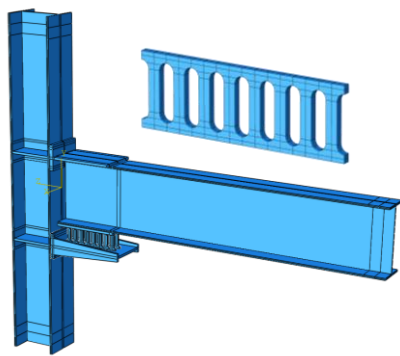
در این اتصال عمده نیروی برشی منتقل شده از طرف تیر، توسط میراگر شکاف دار به نشیمن و سپس به ستون منتقل می شود. ابعاد هندسی تیر و ستون در جدول (۱) ارائه شده است.

¹ Elongation

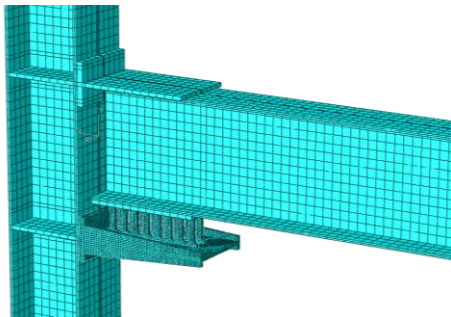
² Tie Interaction

جدول ۲- مشخصات مکانیکی فولاد استفاده شده در قطعات نمونه [۱]

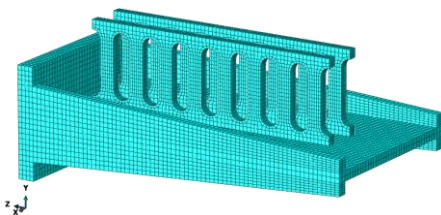
اجزای اتصال	نوع فولاد	σ_y (MPa)	σ_u (MPa)	Elo. (%)
تیر	جان	339	488	27
	بال	318	480	30
ستون	جان	395	554	27
	بال	378	551	24
سپری و نشیمن	جان	388	577	25
	بال	386	573	24
میراگر		208	464	30



شکل ۵- نمونه ساخته شده در نرم افزار Abaqus

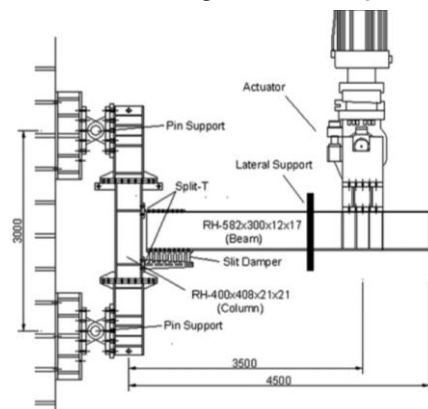


شکل ۶- مش بندی نمونه، نمای کلی



شکل ۷- مش بندی ریز میراگر و نشیمن

طبق شکل (۸) که مربوط به ستاپ آزمایشگاهی نمونه مرجع است، دو سر ستون، تکیه گاه مفصلی دارد که با مقید کردن درجات آزادی در نقاط مشخص شده در ابتدا و انتهای ستون، این تکیه گاه همانند شکل (۹) تعریف شده است. تیر نیز در قسمتی که در آزمایش مشخص است، مهار جانبی شده است.



شکل ۸- ستاپ آزمایش و شرایط تکیه گاهی آن [۱]

همچنین در قسمت هایی که اتصال پیچی است، به دلیل مقاومت کافی و تعداد فراوان پیچ ها پیوستگی بین صفحه ها زیاد فرض شده است و سطح تماسی این قسمت ها توسط قید پیوستگی تعریف شده است. سطح تماسی بین این دو ناحیه نیز یک سطح اصطکاکی با ضریب ۰/۳ برای فولاد در نظر گرفته شده است [۴]. برای فولاد بدون پوشش و دارای سطح نسبتاً تمیز، محدوده ای در حدود ۰/۲ تا ۰/۵ در مطالعات عددی دیده می شود که معمولاً ضریب ۰/۳ بهترین تطابق با با نتایج آزمایشگاهی را داشته است [۴]. در شبیه سازی از مش های سه بعدی شش وجهی استفاده شده است. در ابتدا برای صحت سنجی از المان های C3D20 که بیست گرهی هستند برای تمامی اجزاء استفاده شد ولی در ادامه برای کم تر شدن حجم محاسبات و زمان تحلیل از مش های C3D8 استفاده شد؛ زیرا پاسخ تحلیل با این ساده سازی تفاوتی نداشت. همچنین سعی شده است که اندازه مش ها با توجه به حساسیت سطح تنش آن قسمت انتخاب شود. بنابراین تیر و ستون با مش های بزرگ تر شبکه بندی شده اند (شکل (۶)) و بخش هایی که حساسیت سطح تنش آن ها در بارگذاری بیش تر است و ممکن است رفتار غیر خطی داشته باشند (نشیمن و میراگر شکاف دار فولادی)، با ابعاد ریزتری مش بندی شده اند (شکل (۷)). برای این منظور تحلیل حساسیت مش بندی انجام شد و زمانی که کوچک نمودن ابعاد مش بندی تأثیری در منحنی های رفتار خروجی نداشت، آن ابعاد به عنوان ابعاد نهایی مورد استفاده قرار گرفت.

۲-۲- صحت سنجی سیم آلیاژ حافظه دار شکلی نایتینول

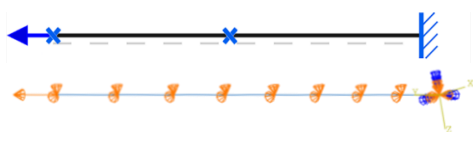
برای شبیه سازی عددی سیم از جنس آلیاژ حافظه دار شکلی نایتینول، نتایج آزمایشگاهی **دسروش** و **همکاران** انتخاب شد [۱۸]. در آزمایش محققین مذکور، سیم ها و میله ها با ابعاد گوناگونی آزمایش شده است، که در صحت سنجی از سیم با طول ۱۵۲ میلی متر و قطر ۱/۸ میلی متر استفاده شد. مشخصات مصالح سیم های آلیاژ حافظه دار شکلی نایتینول به کاررفته طبق جدول (۳) است. در این جدول، (σ_{Ms}) و (σ_{Mf}) به ترتیب تنش شروع و پایان فاز مارتنزیت، (σ_{As}) و (σ_{Af}) به ترتیب تنش شروع و پایان فاز آستنیت، (E_m) و (E_A) به ترتیب مدول الاستیسیته مارتنزیت و آستنیت و (ϵ_L) کرنش تبدیل^۲ هستند. چگالی این آلیاژ (7450 kg/m^3) و نسبت پواسون آن برابر 0.33 است. رفتار آلیاژ حافظه دار در محدوده فوق الاستیک به کار گرفته شده و در واقع آلیاژ بدون اعمال حرارت و بار، رفتار مرکزگرا دارد و این باید به عنوان محدوده کاربرد نایتینول در این مقاله در نظر گرفته شود.

جدول ۳- مشخصات آلیاژ حافظه دار شکلی نایتینول در حالت

ابرکشسانی [۱۶]

ϵ_L (%)	E_m (GPa)	E_A (GPa)	σ_{Ms} (MPa)	σ_{Mf} (MPa)	σ_{As} (MPa)	σ_{Af} (MPa)
۴	۳۰	۴۰	۵۵۸	۵۷۳	۱۳۴	۶۹

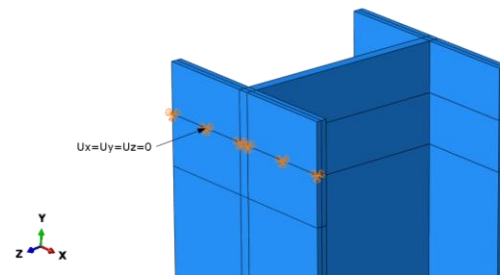
مدل سازی سیم به صورت یک عضو خربایی دو گرهی انجام شده که تنها در راستای طولی تغییر شکل دارد (شکل (۱۲)). مطابق شکل (۱۲) در یک گره، تمامی درجات آزادی بسته شده و در گره دیگر درجات آزادی جانبی بسته شده است، به عبارتی این عضو خربایی فقط در راستای طولی تغییر شکل خواهد داشت.



شکل ۱۲- شرایط مرزی، نحوه بارگذاری، و مدل ساخته شده در

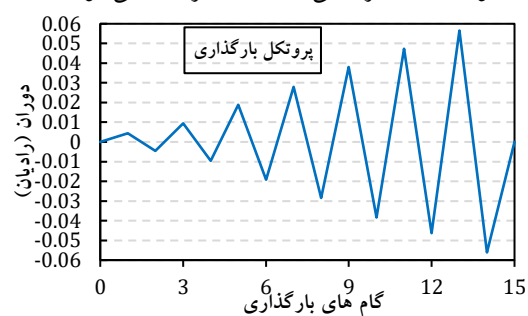
اجزای محدود سیم ابرکشسان نایتینول

بارگذاری اعمال شده (شکل (۱۳)) در این شبیه سازی به صورت چرخه ای فقط کششی است که همانند آزمایش انجام شده توسط **دسروش** و **همکاران** در نظر گرفته شده است [۱۸].



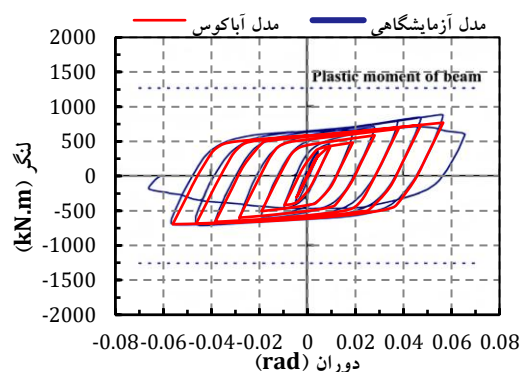
شکل ۹- شرایط مرزی اعمال شده در ابتدا و انتهای ستون

الگوی بارگذاری تعریف شده در این آزمایش الگوی شبه استاتیکی^۱ چرخه ای آیین نامه AISC 341-22 است که بر اساس دوران اتصال تعریف می شود (شکل (۱۰)) [۱۷]. این بار به صورت بار تغییر مکانی در انتهای تیر وارد می شود.



شکل ۱۰- پروتکل بارگذاری

پاسخ منحنی لنگر دوران به دست آمده از تحلیل اجزای محدود و پاسخ آزمایشگاهی [۱] در شکل (۱۱) ارائه شده است. مقایسه این دو منحنی نشان می دهد سطح لنگرها و دورانها در دوره های مختلف بارگذاری بسیار به هم نزدیک هستند و نمونه ها در قسمت رفتار خطی و غیرخطی شباهت عددی زیادی دارند. این امر تأیید می کند که شبیه سازی عددی دقت مناسبی داشته و نتایج تحلیل های عددی قابل اتکا هستند.



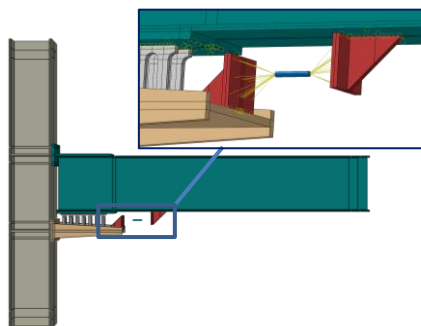
شکل ۱۱- منحنی چرخه ای اتصال به دست آمده از تحلیل عددی و

نمونه آزمایشگاهی [۱]

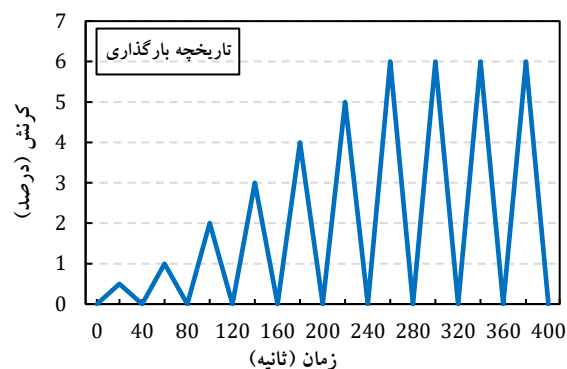
^۲ Transformation Strain

^۱ Quasi-Static

صلبیت اتصال، ثابت نگه داشته می‌شود و مشخصات سازه‌ای میراگر شکاف‌دار و مؤلفه مرکزگرا تنظیم می‌شود. سختی اتصال شامل هر دو مؤلفه نیرو و تغییر مکان است و رفتار را کامل‌تر کنترل می‌کند و نسبت به فقط نیرو و یا فقط تغییر مکان پارامتر مهم‌تری است. شکل (۱۵) سیستم ترکیبی استفاده‌شده را نشان می‌دهد. در جزئیات ارائه‌شده، مؤلفه مرکزگرا و میراگر شکاف‌دار به‌صورت دو فنر موازی به‌کار گرفته شده‌اند. به این صورت که مجموعه آن‌ها با هم نیروی بال تحتانی را به تکیه‌گاه منتقل می‌کنند و تغییر شکل هر دو مؤلفه نیروبر برابر است. علت این امر این است که در صورت سری قرارگرفتن این دو مؤلفه، نیروی بسیار بزرگی به آلیاژ حافظه‌دار نایتینول منتقل می‌شود و مساحت این مصالح گران‌قیمت زیاد می‌شود که به‌دلیل هزینه بالا، قابل تأمین نیست و به همین خاطر از این مصالح به‌صورت سیم، میلگرد و تسمه با مساحت محدود استفاده می‌شود. عضوی که به‌عنوان آلیاژ حافظه‌دار بین دو براکت فولادی به‌کارگرفته شده یک عضو خربایی است که در فشار و کشش با رفتار مادی آلیاژ حافظه‌دار عمل می‌کند. در صورت استفاده از مؤلفه سری، باید میراگر شکاف‌دار به مؤلفه مرکزگرا وصل و سپس مؤلفه مرکزگرا به بال پایینی تیر متصل شود. به‌عبارت دیگر میراگر شکاف‌دار به بال تحتانی تیر دیگر متصل نمی‌شود. در به‌کارگیری سیم آلیاژ حافظه‌دار، مشکلی وجود دارد که سیم نیروی فشاری تحمل نمی‌کند. سیستم‌هایی وجود دارند که سیم آلیاژ حافظه‌دار را همیشه در کشش نگه می‌دارند. سیستم معرفی‌شده در پژوهش مرتضوی (شکل (۱۶)) برای همین منظور طراحی شده است [۱۹]. سیستم این ابزار به‌شکلی است که سیم‌ها تحت بارگذاری چرخه‌ای فقط تحت کشش قرار می‌گیرند و ابعاد مقطع فولادی به‌گونه‌ای طراحی شده است که فقط سیم‌ها رفتار غیرخطی از خود نشان دهند. درواقع عضو خربایی مدل‌سازی‌شده سیستم معرفی‌شده، مطابق شکل (۱۶) است.

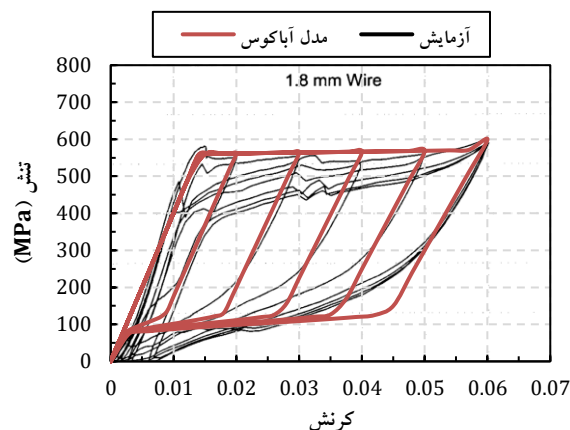


شکل ۱۵- اتصال گیردار مجهز شده به سیستم ترکیبی میراگر شکاف‌دار فولادی و مؤلفه مرکزگرای آلیاژ حافظه‌دار نایتینول



شکل ۱۳- پروتکل بارگذاری چرخه‌ای برای سیم آلیاژ حافظه‌دار شکلی نایتینول

پاسخ حاصل از تحلیل عددی و پاسخ آزمایشگاهی در شکل (۱۴) با هم مقایسه شده است. مقایسه این دو منحنی بیان می‌کند که مدل اجزای محدود نیز رفتاری مشابه با آزمایش از خود نشان می‌دهد و نواحی شروع و پایان فاز مارتنزیت بر یکدیگر منطبق و در هر باربرداری، با شیب یکسان به تنش شروع فاز آستنیت رسیده است. تطبیق رفتار عددی و آزمایشگاهی نشان‌دهنده صحت مطالعات عددی است و می‌تواند در مراحل بعدی مطالعات عددی به‌خوبی مورد اتکا قرار گیرد.

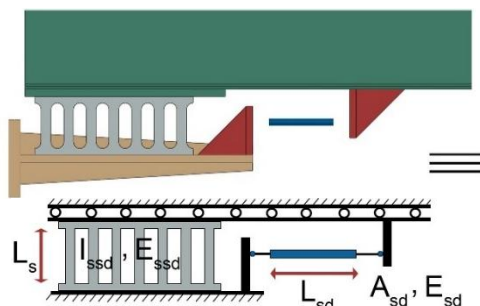


شکل ۱۴- مقایسه رفتار تنش-کرنش سیم نایتینول به‌دست‌آمده از رفتار عددی و رفتار آزمایشگاهی [۱۸]

۳- معرفی اتصال گیردار مجهز به سیستم ترکیبی میراگر شکاف‌دار و مؤلفه مرکزگرای نایتینول

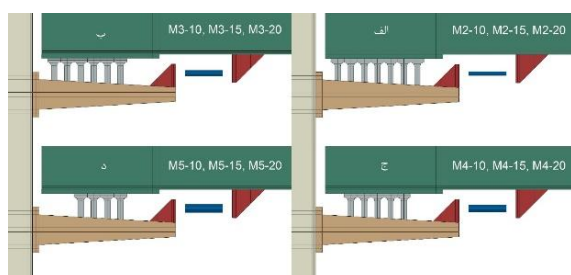
در این مقاله، نمونه مرجع برای به‌کارگیری میراگر ترکیبی، نمونه آزمایش شده توسط اوه و همکاران است [۱]. با توجه به سختی اولیه محاسبه‌شده این اتصال در پژوهش مرجع [۱]، اتصال مذکور صلب تلقی می‌شود. در این پژوهش نیز با ثابت نگه‌داشتن سختی اتصال که در ادامه این پژوهش محاسبات آن انجام خواهد شد،

است. بر اساس روابط مذکور نمونه‌های متعددی در نظر گرفته شد که مطالعات پارامتریک را ممکن می‌سازد. در جدول (۴) مشخصات نمونه‌ها و نام اختصاص یافته به هر نمونه، مشاهده می‌شود. در شکل (۱۸) نیز تصویر جانبی نمونه‌های چهار گروه نشان داده شده است.

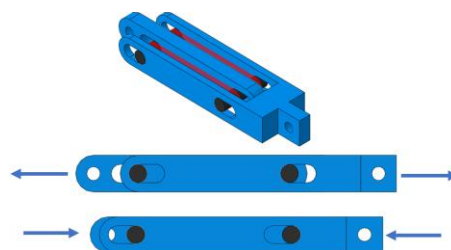


sd: میراگر آلیاژ حافظه دار شکلی (SMA Damper)
ssd: میراگر شکاف دار فولادی (Steel Slit Damper)

شکل ۱۷- معادل سازی سختی سیستم ترکیبی میراگر فولادی و مؤلفه مرکزگرای نایتینول



شکل ۱۸- نمای جانبی نمونه‌های عددی در چهار گروه معرفی شده



شکل ۱۶- میراگر مخصوص سیم‌های آلیاژ حافظه دار شکلی [۱۹]

مطابق شکل (۱۷) سختی عضوهای عمودی میراگر شکاف دار فولادی را می‌توان همانند یک ستون در نظر گرفت که سختی جانبی آن موازی با سختی محوری مؤلفه مرکزگرای نایتینول است. با ساده سازی می‌توان معادلات حاکم بر سختی این میراگرها را همانند روابط زیر محاسبه نمود.

$$K_{sd} = \frac{E_{sd} A_{sd}}{L_{sd}} \quad (۱)$$

$$K_{ssd} = 2n \frac{12 E_{ssd} I_{ssd}}{L_s^3} \quad (۲)$$

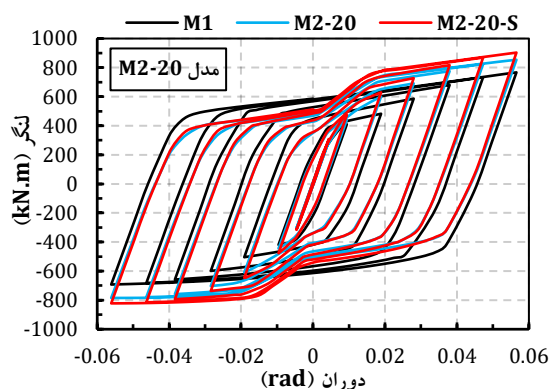
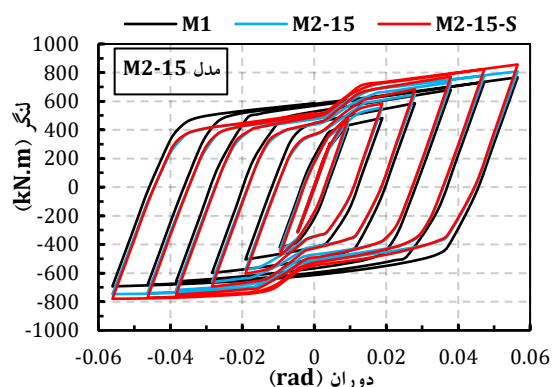
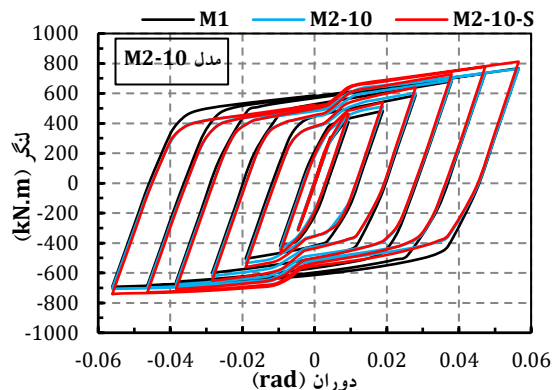
$$K = K_{sd} + K_{ssd} \quad (۳)$$

که (K_{sd}) ، (E_{sd}) ، (A_{sd}) و (L_{sd}) به ترتیب عبارتند از سختی، مدول الاستیسیته، سطح مقطع و طول سیم آلیاژ حافظه دار. همچنین (K_{ssd}) ، (E_{ssd}) ، (I_{ssd}) و (L_s) به ترتیب سختی، مدول الاستیسیته، ممان اینرسی مربوط به میراگر شکاف دار فولادی، طول و تعداد عضوهای عمودی میراگر شکاف دار فولادی هستند. عدد ۲ در رابطه (۲) به دلیل وجود دو عدد میراگر شکاف دار در زیر تیر

جدول ۴- مشخصات نمونه‌های عددی میراگر ترکیبی

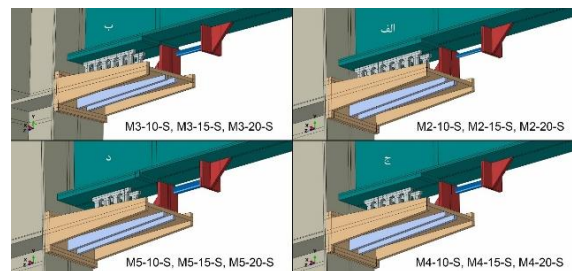
نمونه عددی	تعداد عضوهای عمودی میراگر شکاف دار	سختی میراگر شکاف دار (kN/mm)	سختی عضو آلیاژ حافظه دار (kN/mm)	سختی کل (kN/mm)	طول سیم (cm)	قطر سیم (mm)
M1	۸×۲	۶۲۸	—	۶۲۸	—	—
M2-10	۷×۲	۵۵۰	۷۹	۶۲۹	۱۰	۱۵/۹
M2-15	۷×۲	۵۵۰	۷۹	۶۲۹	۱۵	۱۹/۴
M2-20	۷×۲	۵۵۰	۷۹	۶۲۹	۲۰	۲۲/۴
M3-10	۶×۲	۴۷۱	۱۵۸	۶۲۹	۱۰	۲۲/۴
M3-15	۶×۲	۴۷۱	۱۵۷	۶۲۸	۱۵	۲۷/۴
M3-20	۶×۲	۴۷۱	۱۵۸	۶۲۹	۲۰	۳۱/۷
M4-10	۵×۲	۳۹۳	۲۳۶	۶۲۹	۱۰	۲۷/۴
M4-15	۵×۲	۳۹۳	۲۳۵	۶۲۸	۱۵	۳۳/۵
M4-20	۵×۲	۳۹۳	۲۳۵	۶۲۸	۲۰	۳۸/۷
M5-10	۴×۲	۳۱۴	۳۱۴	۶۲۸	۱۰	۳۱/۶
M5-15	۴×۲	۳۱۴	۳۱۴	۶۲۸	۱۵	۳۸/۷
M5-20	۴×۲	۳۱۴	۳۱۴	۶۲۸	۲۰	۴۴/۷

باربری مؤلفه مرکزگرا و اثر نیروهای بیش‌تر آن بر روی اعوجاج عضو نشیمن است که در شکل (۲۱) قابل مشاهده است. توزیع تنش این نمونه‌ها نیز کاملاً بیانگر نیاز به وجود سخت‌کننده‌ها است؛ زیرا مانع از تمرکز تنش در ناحیه جلوی عضو نشیمن می‌شود. این تغییرشکل‌ها رفتار هیستریزس نمونه‌های دارای سخت‌کننده (نمونه با علامت S) را متفاوت از نمونه‌های عادی می‌کند. شکل (۲۲) این مسئله را نشان می‌دهد.



شکل ۲۰- منحنی چرخه‌ای لنگر-دوران نمونه‌های گروه M2

همچنین در کنار این ۱۲ نمونه، جزئیات دیگری نیز در نظر گرفته شد که در ۱۲ نمونه جدید دیگر پیاده‌سازی شد. با توجه به موقعیت نصب براکت نگهدارنده سیم نایتینول، نشیمن پایینی می‌تواند دچار تغییرشکل‌های نامطلوب شود و برای جلوگیری از این موضوع دو عدد سخت‌کننده زیر نشیمن در این ۱۲ نمونه جدید در نظر گرفته شد. نام‌گذاری این نمونه کاملاً مشابه نمونه‌های قبلی است و فقط یک حرف S به نام آن‌ها اضافه شده است. شکل (۱۹) این نمونه‌ها را نشان می‌دهد.



شکل ۱۹- نمای سه‌بعدی نمونه‌های عددی دارای سخت‌کننده

۴- نتایج تحلیل‌های چرخه‌ای و تفسیر نتایج

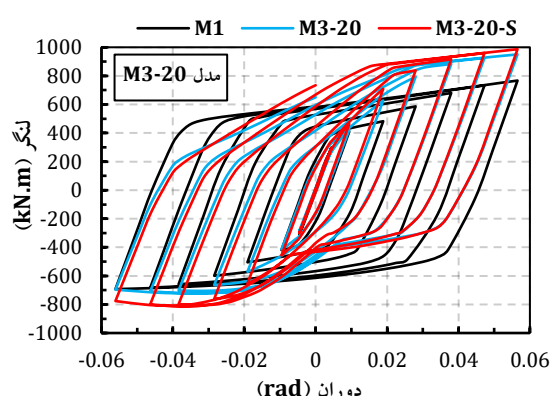
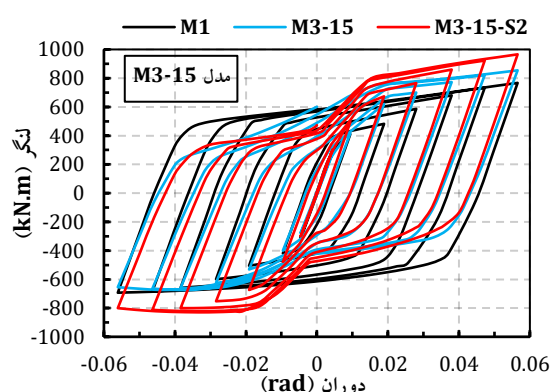
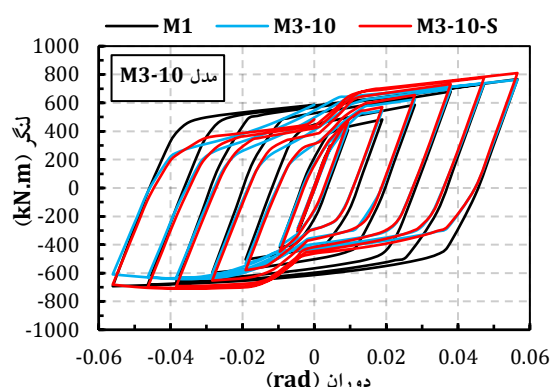
۴-۱- رفتار هیستریزس نمونه‌های گروه M2

در نمونه‌های گروه M2 یک عضو عمودی نمونه مرجع حذف شده است و به‌ازای سختی آن، مؤلفه مرکزگرا نایتینول جایگزین شده است. شکل (۲۰) پاسخ هیستریزس نمونه‌ها را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود مؤلفه مرکزگرا مقدار بسیار کمی رفتار هیستریزس را تغییر داده و شکل پرچمی به آن داده است. لحظه تسلیم و لنگر مقاوم اولیه و لنگر نهایی تفاوت زیادی نکرده است و ماهیت رفتاری اتصال همچنان شبیه نمونه مرجع است. با افزایش طول و قطر سیم نایتینول، میزان مرکزگرایی تغییر محسوسی نکرده و باز هم تغییری در شرایط اتصال دیده نمی‌شود. این امر به این دلیل است که در طراحی تمام نمونه‌ها سختی همسان‌شده بوده و عملکرد اتصال از این نظر هم‌سنگ شده است. با توجه به این‌که سهم مؤلفه مرکزگرا در این نمونه‌ها کم است، وجود سخت‌کننده زیر نشیمن نیز تأثیر مهمی در رفتار نداشته است و رفتار چرخه‌ای تحت تأثیر وجود آن نیست.

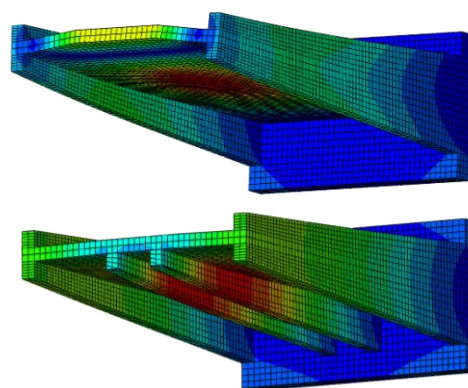
۴-۲- رفتار هیستریزس نمونه‌های گروه M3

در نمونه‌های گروه M3 اعضای عمودی میراگر شکاف‌دار فولادی از ۸ عدد به ۶ عدد تقلیل یافته و سهم عملکرد مؤلفه مرکزگرا نسبت به نمونه‌های M2 بیش‌تر شده است. اولین موضوع قابل توجهی که در این نمونه به چشم می‌خورد، بیش‌تر شدن سهم

نرمی اتصال و کاهش مقاومت نهایی حتی نسبت به نمونه مرجع می شود. در نمونه M4-20 افزایش مقاومت به ۵۰٪ می رسد، علی رغم این که سختی ثابت نگه داشته شده است. همچنان نیاز به سخت کننده نشیمن تیر کاملاً الزامی است و اتصال بدون آن، عملکرد خود را از دست می دهد. دوران پسماند در نمونه M4-20 که بیش ترین مقدار نایتینول را دارد، از ۰/۰۵ به ۰/۰۴ کاهش یافته است که حدود ۲۰٪ کاهش را نشان می دهد؛ ولی همچنان دوران پسماند، کاهش محسوسی ندارد و عملکرد مؤلفه مرکزگرا در حالت موازی با میراگر شکاف دار فولادی منجر به کاهش دریافت پسماند به صورت چشم گیر نمی شود.

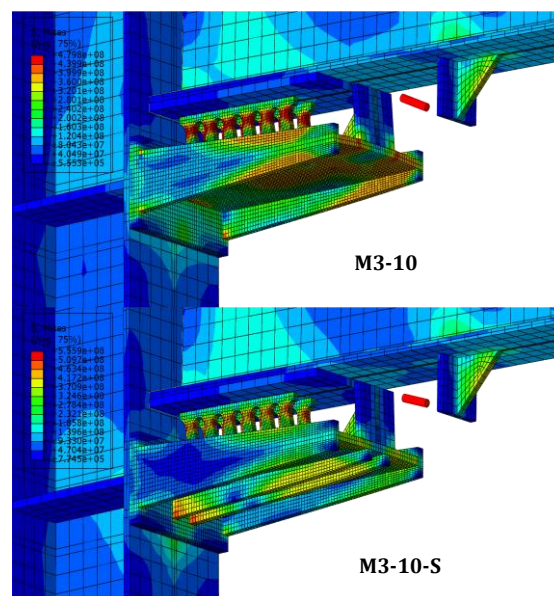


شکل ۲۳- منحنی چرخه ای لنگر-دوران نمونه های گروه M3



شکل ۲۱- تغییر شکل و تمرکز تنش در نشیمن نمونه M3-10

با دقت در رفتار هیستریزس این نمونه ها (شکل ۲۳)) مشخص می شود که وجود نایتینول با طول ۱۰ سانتی متر تنها رفتار هیستریزس را مقدار خیلی کمی پرچمی کرده است، ولی با افزایش طول و قطر نایتینول افزایش مقاومت نهایی در اتصال ایجاد شده است. این رفتار در نمونه M3-20 بیش تر شده و مقاومت نهایی بیش تر افزایش یافته است. ولی همچنان دریافت پسماند مقدار بسیار اندکی کاهش یافته و این بیانگر عملکرد ضعیف مؤلفه مرکزگرا در حالت موازی با میراگر شکاف دار فولادی است.



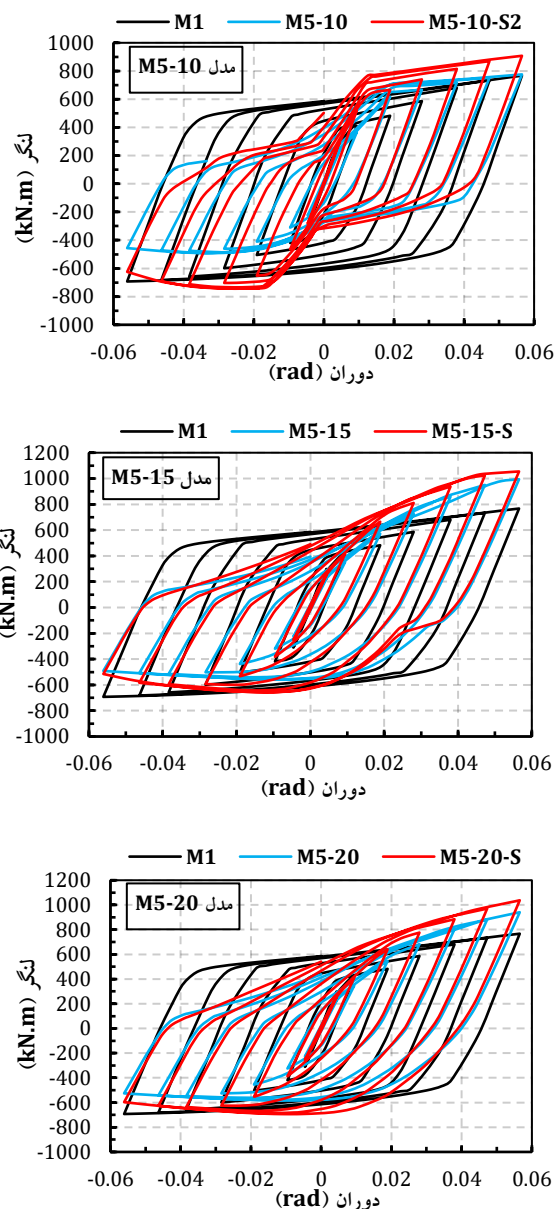
شکل ۲۲- توزیع تنش در نمونه با و بدون سخت کننده (نمونه M3-10)

۳-۴- رفتار هیستریزس گروه نمونه های M4

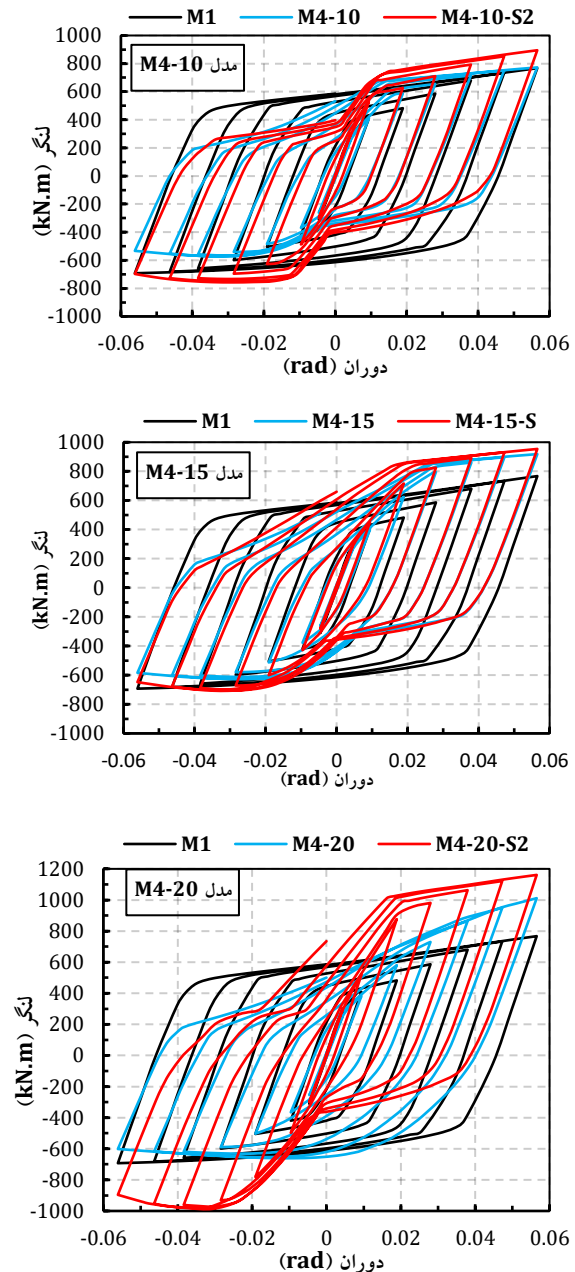
در این نمونه ها، عملکرد مؤلفه مرکزگرا منجر به افزایش مقاومت نهایی و پرچمی شدن جزئی در نمونه ها شده است. شکل (۲۴) رفتار هیستریزس نمونه ها را نشان می دهد. حضور سخت کننده کاملاً رفتار صلب اتصال را مدیریت می کند و عدم وجود آن سبب

۴-۴- رفتار هیستریزیس گروه نمونه‌های M5

در بین تمام نمونه‌ها، گروه M5 بیش‌ترین مقدار نایتینول و کم‌ترین تعداد اعضای عمودی شکاف‌دار میراگر فولادی را دارند و مؤلفه مرکزگرا نیروی بزرگ‌تری را می‌برد. همان‌طور که در شکل (۲۵) ملاحظه می‌شود حتی در نمونه M5-10 نیاز به سخت‌کننده الزامی است و افزایش مقاومت در همین نمونه شروع می‌شود و خاصیت پرچمی شدن مشهود است.



شکل ۲۵- منحنی چرخه‌ای لنگر-دوران نمونه‌های گروه M5

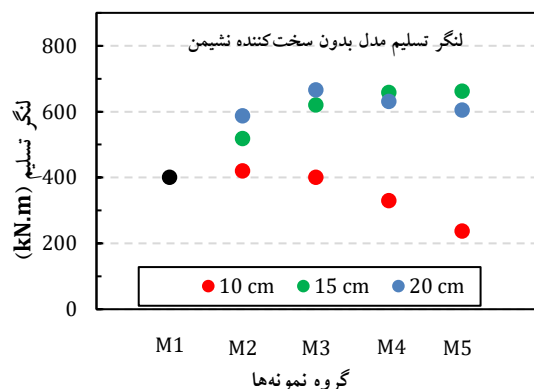


شکل ۲۴- منحنی چرخه‌ای لنگر-دوران نمونه‌های گروه M4

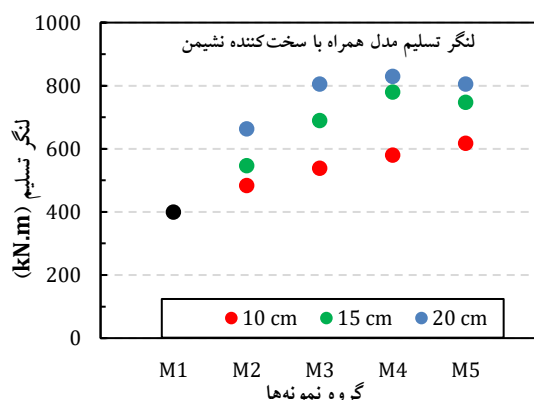
با افزایش طول و قطر نایتینول در نمونه‌های M5-15 و M5-20 مشاهده می‌شود که سطح نیروهای مؤلفه مرکزگرا بیش‌تر

۴-۵- دوران تسلیم و لنگر تسلیم

همان‌طور که در بخش قبلی مشاهده شد، وجود مؤلفه مرکزگرا بیش‌تر موجب افزایش مقاومت اتصال شد تا اعمال خاصیت مرکزگرایی. شکل‌های (۲۶) و (۲۷) نیز مؤید همین مطالب است. لنگر تسلیم و دوران تسلیم به‌دست‌آمده از این شکل‌ها، بر اساس روش دوخطی تعیین شده‌اند. دوران متناظر با لنگر تسلیم با افزایش مساحت نایتینول از حدود ۰/۰۱ به ۰/۰۲۵ افزایش و تقریباً ۲/۵ برابر شده است. تنش تسلیم نایتینول حدود ۵۵۸ مگاپاسکال و تنش تسلیم فولاد ۳۸۸ مگاپاسکال بوده که با کم‌شدن مساحت فولاد و افزایش مساحت نایتینول، طبیعتاً میزان مقاومت افزایش می‌یابد. البته در نمونه نایتینول با طول ۱۰ سانتی‌متر، نایتینول سریع‌تر به کرنش تسلیم رسیده و نتوانسته دوران تسلیم را به تأخیر اندازد. در واقع افزایش طول نایتینول سبب به تأخیر افتادن کرنش تسلیم و افزایش دوران متناظر با تسلیم برای مجموعه اتصال شده است. وجود سخت‌کننده نیز به‌خوبی صلبیت اتصال را تأمین کرده و در افزایش دوران تسلیم مؤثر بوده است و از این منظر نیز الزام وجود سخت‌کننده در جزئیات پیشنهادی تأیید می‌شود.



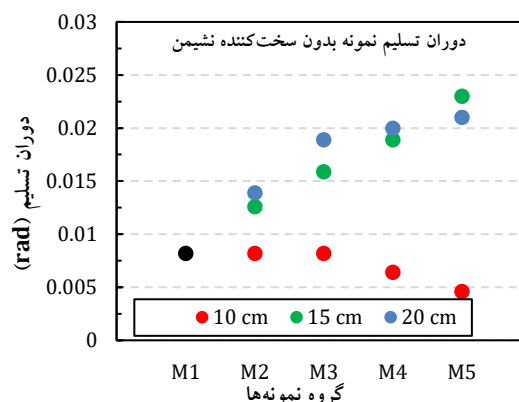
شکل ۲۸- لنگر تسلیم نمونه‌های عددی بدون سخت‌کننده نشیمن



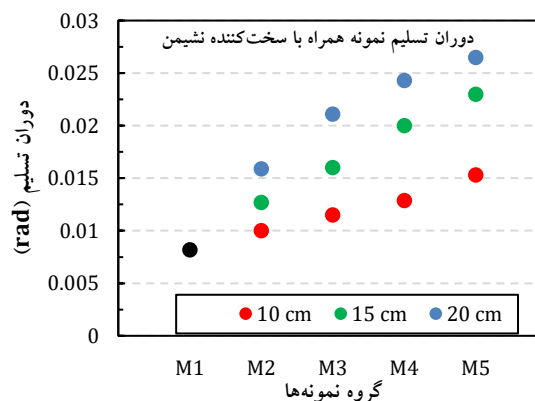
شکل ۲۹- لنگر تسلیم نمونه‌های عددی با سخت‌کننده نشیمن

۴-۶- دوران پسماند

با دقت در شکل (۳۰) مشاهده می‌شود حتی نمونه‌های گروه M5 دارای سخت‌کننده که بیش‌ترین مساحت نایتینول را داشتند، توانستند دوران پسماند اتصال را کنترل کنند، اما کاهش آن بسیار اندک است. کاهش دوران پسماند در بهترین حالت حدود ۱۵٪ بوده است. درنهایت باز هم تأیید می‌شود که وجود مؤلفه مرکزگرا نتوانست دریافت پسماند را به‌صورت چشم‌گیری کاهش دهد.

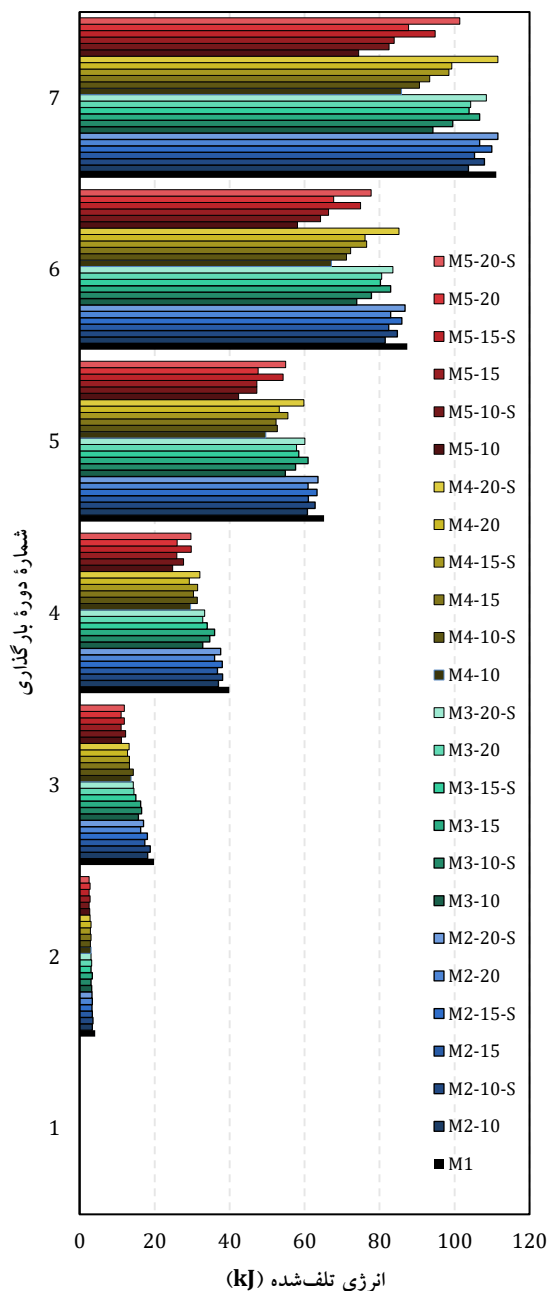


شکل ۲۶- دوران تسلیم نمونه‌های بدون سخت‌کننده نشیمن

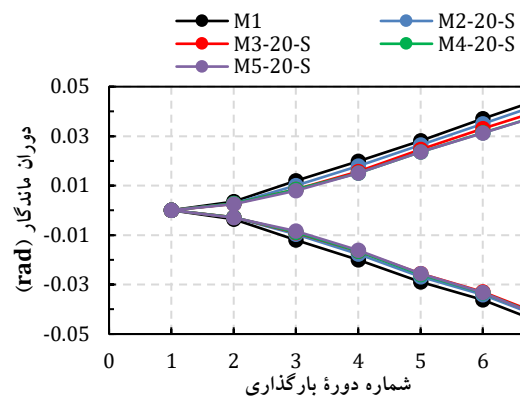


شکل ۲۷- دوران تسلیم نمونه‌های با سخت‌کننده نشیمن

حافظه‌دار نایتینول دارد و طرح بسیار گران و غیرعملی محسوب می‌شود. برای ترکیب دو مؤلفه میراگر و مرکزگرا، جزئیات قابل ساختی پیشنهاد شد و رفتار اتصال توسط تحلیل‌های غیرخطی چرخه‌ای اجزای محدود مورد مطالعه قرار گرفت.



شکل ۳۱- انرژی مستهلک‌شده نمونه‌ها در دوره‌های بارگذاری چرخه‌ای



شکل ۳۰- مقادیر دوران پسماند در نمونه‌های گروه M5

۴-۷- انرژی مستهلک‌شده

در شکل (۳۱) و جدول (۵) مقدار انرژی میراشده همه نمونه‌ها در هر دوره بارگذاری قابل مشاهده است. در نمونه‌های دارای مؤلفه مرکزگرای آلیاژ حافظه‌دار شکلی، مقدار انرژی میراشده در مقایسه با نمونه مرجع M1 کمتر است. بنابراین تأثیر کاهش دوران ماندگار بر کاهش انرژی تلف‌شده، بیش‌تر از تأثیر افزایش مقاومت است. میزان انرژی مستهلک‌شده نیز در نمونه‌های گوناگون متفاوت است. در نمونه‌هایی که میزان سختی میراگر SMA ثابت است، نمونه‌ای که میراگر آن دارای طول ۱۰ سانتی‌متری است، از باقی نمونه‌ها میزان میرایی انرژی کم‌تری دارد. اگر در نمونه‌های گوناگون سختی میراگر SMA ثابت باشد و طول آن افزایش یابد، میزان میرایی انرژی نیز افزایش می‌یابد، اما اگر طول میراگر ثابت در نظر گرفته شود و سختی آن افزایش یابد، میزان میرایی انرژی کاهش می‌یابد. در مقایسه میزان میرایی انرژی نمونه‌های گوناگون این موضوع نیز مشاهده می‌شود که در نمونه‌هایی که از سخت‌کننده نشیمن استفاده شده است، در مقایسه با نمونه‌های بدون سخت‌کننده، دریافت پسماند کاهش، مقاومت افزایش و میزان میرایی انرژی نیز افزایش یافته است. درنهایت در بهترین نمونه‌هایی که بیش‌ترین کاهش میزان دوران ماندگار (۱۵٪) را دارند ۱۵٪ کاهش انرژی تلف‌شده مشاهده می‌شود.

۵- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این پژوهش اتصال گیردار مجهز به سیستم ترکیبی مؤلفه میراگر شکاف‌دار فولادی و مؤلفه مرکزگرای آلیاژ حافظه‌دار نایتینول مورد مطالعه دقیق عددی قرار گرفت. این دو مؤلفه به‌صورت موازی در کنار هم قرار گرفتند زیرا امکان سری قرارگرفتن آن‌ها وجود نداشت. درواقع سری قرارگرفتن هر دو مؤلفه، نیروی بزرگی به مؤلفه مرکزگرا وارد می‌سازد که نیاز به مساحت بزرگ مصالح آلیاژ

جدول ۵- مجموع انرژی تلف شده تمامی گام های بارگذاری و دوران

نمونه	دوران پسماند (rad)	کاهش (%)	انرژی تلف شده (kJ)	کاهش (%)
M1	0.0456		327.67	
M2-10	0.0452	0.88	304.55	7.06
M2-10-S	0.0450	1.32	316.03	3.55
M2-15	0.0448	1.75	306.28	6.53
M2-15-S	0.0446	2.19	318.67	2.75
M2-20	0.0438	3.95	306.28	6.53
M2-20-S	0.0436	4.39	319.93	2.36
M3-10	0.0447	1.97	274.74	16.15
M3-10-S	0.0447	1.97	289.30	11.71
M3-15	0.0439	3.73	306.28	6.53
M3-15-S	0.0431	5.48	294.55	10.11
M3-20	0.0411	9.87	293.29	10.49
M3-20-S	0.0410	10.09	302.77	7.60
M4-10	0.0438	3.95	248.95	24.02
M4-10-S	0.0437	4.17	263.07	19.71
M4-15	0.0413	9.43	264.80	19.19
M4-15-S	0.0411	9.87	278.20	15.10
M4-20	0.0401	12.06	273.84	16.43
M4-20-S	0.0390	14.47	304.57	7.05
M5-10	0.0423	7.24	213.52	34.84
M5-10-S	0.0423	7.24	236.67	27.77
M5-15	0.0397	12.94	237.39	27.55
M5-15-S	0.0387	15.13	268.22	18.14
M5-20	0.0400	12.28	242.99	25.84
M5-20-S	0.0390	14.47	278.30	15.07

آلیاژ حافظه دار، دوران پسماند کاهش بیش تری ندارد و در این حالت اتصال مکانیزم، باربری خود را از دست می دهد.

۵- انرژی مستهلک شده اتصال با سیستم ترکیبی نسبت به نمونه مرجع بین ۰ تا ۱۵٪ کاهش می یابد. مقدار ۱۵٪ کاهش انرژی متناظر با کاهش ۱۵٪ دوران پسماند است و دلیل این موضوع پرچمی شدن بیش تر رفتار هیستریزس نمونه ها است.

مبنای محاسبات مشخصات مؤلفه مرکزگرا، ثابت نگه داشتن سختی ترکیبی میراگر فولادی و مؤلفه مرکزگرا با نمونه مرجع آزمایشگاهی بود. ۲۴ نمونه عددی ساخته و مطالعات پارامتریک انجام شد. نتایج زیر از این تحقیق به دست آمد:

۱- مؤلفه مرکزگرا به صورت موازی با میراگر شکاف دار نمی تواند بر روی دریافت پسماند کنترل مؤثری داشته باشد و آن را کاهش دهد. در صورتی که هدف، کاهش دریافت پسماند باشد این مؤلفه باید به صورت سری با میراگر مستهلک کننده انرژی استفاده شود که نیاز به پیشنهاد جزئیات قابل اجرا، هزینه لازم و مطالعات جامع دیگری دارد.

۲- جزئیات موازی پیشنهاد شده توانست لنگر تسلیم اتصال را تا حداکثر ۵۰٪ افزایش دهد و دوران تسلیم را در قوی ترین حالت از حدود ۰/۰۱ به ۰/۲۵ افزایش دهد. این رفتار تأیید می کند سیستم ترکیبی، موجب افزایش مقاومت اتصال می شود.

۳- وجود سخت کننده در عضو نشیمن تیر در جزئیات پیشنهادی، الزامی است و از اعوجاج اتصال جلوگیری می کند.

۴- دوران پسماند در حالتی که بیش ترین مقدار آلیاژ حافظه دار به کار برده شد، تنها ۱۵٪ کاهش یافت. با افزایش بیش تر مقدار

- Shaped Beam to CHS Column", Engineering Structures, 88, pp.37-50.
- [15] Fang, C., Yam, M.C., Lam, A.C., and Xie, L. (2014), "Cyclic Performance of Extended End-Plate Connections Equipped with Shape Memory Alloy Bolts", Journal of Constructional Steel Research, 94, pp.122-136.
- [16] Federal Emergency Management Agency (FEMA) (2018), "Seismic Performance Assessment of Buildings", Volume 1-Methodology. 2nd edn. FEMA P-58-1. Washington, DC: FEMA.
- [17] American Institute of Steel Construction (2022), "Seismic Provisions for Structural Steel Buildings", ANSI/AISC 341-22. Chicago, IL: American Institute of Steel Construction.
- [18] DesRoches, R., McCormick, J., and Delemont, M. (2004), "Cyclic Properties of Superelastic Shape Memory Alloy Wires and Bars", Journal of Structural Engineering, 130(1), pp.38-46.
- [19] Mortazavi, S.M.R. (2023), "Evaluating the Effectiveness of a Shape Memory Alloy on a Connection Equipped with Slit Damper", Journal of Vibration Engineering & Technologies, 11(3), pp.1271-1285.
- [1] Oh, S.H., Kim, Y.J., and Ryu, H.S. (2009), "Seismic Performance of Steel Structures with Slit Dampers", Engineering Structures, 31(9), pp.1997-2008.
- [2] Köken, A., and Köroğlu, M.A. (2015), "Experimental Study on Beam-to-Column Connections of Steel Frame Structures with Steel Slit Dampers", Journal of Performance of Constructed Facilities, 29(2), p.04014066.
- [3] Hosseini, M., Haitao, L., Corbi, I., and Corbi, O. (2022), "Numerical Analysis of the Seismic Performance of Rigid Beam-to-Column Moment Connections Equipped with Steel Slit Damper (SSD)", Latin American Journal of Solids & Structures, 19(2), p.e436.
- [4] Bayat, K., and Shekastehband, B. (2019), "Seismic Performance of Beam-to-Column Connections with T-Shaped Slit Dampers", Thin-Walled Structures, 141, pp.28-46.
- [5] Lee, J., and Kim, J. (2017), "Development of Box-Shaped Steel Slit Dampers for Seismic Retrofit of Building Structures", Engineering Structures, 150, pp.934-946.
- [6] Moghaddam, S.H., and Shooshtari, A. (2023), "Numerical and Experimental Investigation on Seismic Performance of Proposed Steel Slit Dampers", Journal of Constructional Steel Research, 200, p.107646.
- [7] Naeem, A., and Kim, J. (2019), "Seismic Performance Evaluation of a Multi-Slit Damper", Engineering Structures, 189, pp.332-346.
- [8] Bayat, K., and Shekastehband, B. (2020), "Structural Performance of Beam System with T-Stub Type Slit Damper", Engineering Structures, 205, p.109858.
- [9] Gashi, F., Bontempi, F., and Petrini, F. (2021), "Experimental Study on Steel Slit and Shear Panel for Seismic Resistance", ce/papers, 4(2-4), pp.2036-2043.
- [10] Nasab, M.S.E., Kim, J., and Ahn, T.S. (2024), "Seismic Performance Evaluation of a Steel Slit Damper for Retrofit of Structures on Soft Soil", Steel & Composite Structures, 51(1), pp.93-101.
- [11] Song, G., Ma, N., and Li, H.N. (2006), "Applications of Shape Memory Alloys in Civil Structures", Engineering Structures, 28(9), pp.1266-1274.
- [12] Yam, M.C., Fang, C., Lam, A.C., and Zhang, Y. (2015), "Numerical Study and Practical Design of Beam-to-Column Connections with Shape Memory Alloys", Journal of Constructional Steel Research, 104, pp.177-192.
- [13] Speicher, M.S., DesRoches, R., and Leon, R.T. (2011), "Experimental Results of a NiTi Shape Memory Alloy (SMA)-Based Recentring Beam-Column Connection", Engineering Structures, 33(9), pp.2448-2457.
- [14] Wang, W., Chan, T.M., Shao, H., and Chen, Y. (2015), "Cyclic Behavior of Connections Equipped with NiTi Shape Memory Alloy and Steel Tendons between H-