



Research Article

Experimental Study of a New Metallic Damper Using Hourglass Fuse

Mohammad Hosein Afridoon¹, Reza Aghayari ^{*1}, Mohammad. H Adibrad¹ and Mehrzad Tahamouliroudsari²

¹Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran.

² Department of Civil Engineering, Kermanshah Branch, Islamic Azad University, Kermanshah, Iran.

* corresponding author:(reza_agh@razi.ac.ir)

Article Info

Article history:

Received:16 January 2024

Revised:28 March 2024

Accepted:21 April 2024

Keywords:

Metallic yield damper,
hysteresis behavior,
hourglass pin,
experimental study,
nonlinear behavior.

Abstract

Being one of the world's most earthquake-prone countries, Iran has suffered thousands of lives lost in earthquakes throughout the past decades. The metallic yielding damper is a specific kind of passive structural control device that has shown effective behavior in past earthquakes. In this paper, a new metallic yielding damper made of a number of hourglass shape pins (HSP) for enhancing the seismic behavior of building structures is proposed and has been experimentally evaluated under monotonic and quasi-static cyclic loading. The specimens were subjected to drift levels beyond the expected design ones to identify their complete behavior and all possible failure modes. The main feature of the proposed damper is replaceable hourglass shape pins (HSP) fuse. For this purpose, conventional reinforcing steel bars in construction practice have been shaped by a lathe machine in the form of hourglass pins. These hourglass pins dissipate energy mostly through flexural and tensile mechanisms when subjected to inelastic cyclic deformation and can be replaced easily in case of failure after severe earthquakes. Moreover, this damper is economical, easy to install, and built with no special fabrication technique. The hysteresis behavior and other important parameters of the damper, such as capacity of energy dissipation, effective stiffness, and equivalent damping, and the effect of how the HSP is connected to its supporting plates (welding or connection by utilizing nuts) on these behaviors have been studied through laboratory tests. A simplified analytical procedure using plastic analysis and simple rules of mechanics of solids was found to accurately predict the HSP behavior and was found to be consistent with experimental results. The experimental results indicate that the bars successfully performed their function as energy absorbers and fuses in all specimens, but the way HSP is connected to supporting plates can greatly affect its behavior. In the case of nut connection, a significant amount of pinching was observed in hysteresis loops which is the result of residual displacements between HSP and supporting plates and welding the bars to plates seems to solve this problem, resulting in fat and sustainable hysteresis loop without any significant strength and stiffness degradation and good energy dissipation capacity (with respect to HSP's low weight) of the purposed damper was reached. Although both types of connections have shown acceptable behavior throughout cyclic loading, total energy absorption capacity and equivalent viscous damping in welded connections in comparison with the nut connection have been improved by 91 and 53 percent, respectively.

Funding

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

To Cite this article:

Afridoon, M.H., Aghayari, R., Adibrad, M.H. and Tahamouliroudsari, M. 2025. Experimental Study of a New Metallic Damper Using Hourglass Fuse, Sharif Civil Engineering Journal, 41, 1, pp.15-24.
<https://doi.org/10.24200/30.2024.63829.3289>



بررسی آزمایشگاهی یک نوع میراگر فولادی تسلیمی جدید با استفاده از فیوزهای ساعت شنی

محمدحسین آفریدون^۱، رضا آقایی^{۱*}، محمدحسین ادیب راد^۱ و مهرزاد تحملی رودسری^۲^۱ گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه رازی، کرمانشاه.^۲ گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد کرمانشاه.

*نویسنده مسئول (reza_agh@razi.ac.ir)

چکیده

میراگرهای فولادی تسلیمی، نوعی از روش‌های کنترل لرزه‌ای به‌شمار می‌آیند، که به عملکرد مثبت آن‌ها در زلزله‌های پیشین توجه شده است. در نوشتار حاضر، یک نوع میراگر فولادی تسلیمی جدید پیشنهاد و مطالعه‌ی آزمایشگاهی شده است که مشخصه‌ی اصلی آن، استفاده از میلگردهای غیرمنشوری به شکل ساعت شنی است. پیکربندی میراگر به گونه‌ای است که میلگردها با سازوکار تسلیم خمشی- کششی انرژی را جذب می‌کنند و پس از زلزله‌ی شدید، قابل تعویض خواهند بود. برای اتصال میلگردها به اجزاء تکیه‌گاهی میراگر از دو روش متفاوت جوشکاری و اتصال به کمک مهره استفاده شده است. اثر نوع اتصال و همچنین الگوی آرایش مهره‌ها در رفتار میراگر مطالعه شده است. نتایج نشان داده‌اند که نوع اتصال در مشخصات رفتاری تأثیر قابل توجهی داشته است، به گونه‌ای که ظرفیت جذب انرژی و میرایی معادل در نمونه‌ی اتصال به کمک جوش نسبت به مهره به ترتیب ۹۱ و ۵۳ درصد ارتقاء یافته است؛ گرچه میراگر ساخته‌شده با هر دو روش اتصال، رفتار چرخه‌ای پایدار و همچنین ظرفیت جذب انرژی مناسبی داشته است.

اطلاعات مقاله

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۰/۲۶

تاریخ اصلاحیه: ۱۴۰۳/۰۱/۰۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۲/۰۲

واژگان کلیدی:

میراگر فولادی تسلیمی،

رفتار چرخه‌ای،

میلگرد ساعت شنی،

مطالعه‌ی آزمایشگاهی،

رفتار غیرخطی.

۱. مقدمه

براساس رویکرد آیین‌نامه‌های لرزه‌ای، طراحی سازه‌های متعارف به گونه‌ای است که در صورت وقوع زلزله، طرح برخی از اعضاء سازه با ورود به ناحیه‌ی رفتار غیرخطی، تغییرشکل‌های بزرگ غیرارتجاعی را تجربه می‌کنند، که حاصل آن اتلاف و جذب انرژی به صورت چرخه‌ای در ناحیه‌ی غیرکشسان خواهد بود، در عین حال از فروریزش کلی سازه جلوگیری به عمل می‌آید. ایجاد مفاصل خمیری در تیرهای سیستم قاب خمشی و یا تسلیم تیر پیوند در سیستم مهاربند و اگر و همچنین رفتار غیرارتجاعی دیوارهای برشی نمونه‌هایی از رفتار مذکور هستند.

بازسازی ساختمان‌ها پس از زلزله به علت توزیع گسترده‌ی ذکرشده‌ی نواحی خمیری از لحاظ اقتصادی بسیار هزینه‌بر است؛ لذا، به روش کنترل خسارت، که بتوان رفتار خمیری را از سطح اعضاء سازه به قطعات و یا تجهیزات از پیش طراحی‌شده، که قابلیت تعویض و یا تعمیر داشته باشند، انتقال داد، توجه شده است.

روش‌های کنترل خسارت را می‌توان به سه دسته‌ی: فعال، نیمه‌فعال، و غیرفعال تقسیم‌بندی کرد. در روش‌های فعال و نیمه‌فعال به کمک سیستم‌های کنترل و پایش، پاسخ سازه متناسب با نیروی جانبی (زلزله و یا باد) وارد بر آن تغییر

می‌کند و در اغلب موارد، شامل حس‌گرها و جک‌های هیدرولیکی هستند، که با منبع انرژی الکتریکی کار می‌کنند. اما در روش غیرفعال، پاسخ‌های لرزه‌ای از طریق افزایش میرایی در سیستم کنترل می‌شوند و کاهش می‌یابند.

میراگرهای فولادی تسلیمی^۱، میراگرهای اصطکاکی، میراگرهای لزج، و ویسکوکشسان از جمله شناخته‌شده‌ترین تجهیزات کنترل خسارت غیرفعال به‌شمار می‌آیند، که در بین آن‌ها، میراگر فولادی تسلیمی به علت سهولت ساخت، هزینه‌ی تمام‌شده‌ی نسبی پایین، پایداری رفتار چرخه‌ای، و بی‌نیازی به نگهداری و بازرسی‌های دوره‌ای اقبال بیشتری دارد.

متداول‌ترین و شناخته‌شده‌ترین نوع میراگرهای تسلیمی، میراگرهای ADAS [۴-۱] و TADAS [۷-۵] هستند که متشکل از صفحات فولادی X شکل و یا V شکل هستند و انرژی زلزله از طریق رفتار تسلیم خمشی چرخه‌ای صفحات اخیر جذب می‌شود. علت اصلی انتخاب شکل صفحات میراگر به صورت غیرمنشوری، غیریکنواخت بودن مقادیر لنگر در طول اعضا مذکور است. به عبارت دیگر، قسمتی که متحمل کمترین مقدار لنگر خمشی است، کمترین سطح مقطع را خواهد داشت و به این ترتیب توقع می‌رود که کل حجم فولاد مصرفی به شکل یکنواختی به تسلیم برسد. با استفاده از همین ایده در سال‌های اخیر،

^۱ metallic yield dampers

در مطالعه‌ی حاضر، با استفاده از میلگردهای معمول در صنعت ساختمان، یک نوع میراگر ساعت شنی پیشنهاد و رفتار چرخه‌ای آن به‌صورت آزمایشگاهی و با در نظر گرفتن دو روش مختلف اتصال بررسی شده است. مهم‌ترین ویژگی میراگرهای ساعت شنی، مقطع غیر منشوری آن‌هاست، که سبب تغییر سطح مقطع میله متناسب با نیروهای داخلی در طول عضو می‌شود و یک عضو بهینه را ارائه می‌کند. در این حالت، تمامی نقاط میله در اثر بارگذاری به شکل یک‌نواختی تسلیم می‌شوند و در ظرفیت باربری نهایی مشارکت مؤثرتری دارند؛ به‌طوری که نسبت انرژی جذب‌شده به وزن در مقایسه با میله‌های منشوری در حالت پیشینه قرار دارد. همچنین نوع سازوکار رفتاری میلگردها به شکل خمشی است، که می‌توان گفت یک ویژگی منحصر به فرد در مقایسه با بیشتر میراگرهای تسلیمی است، که رفتار حاکم بر آن‌ها به‌صورت فقط خمشی است و باعث بهره‌گیری مناسب‌تر از ظرفیت مصالح خواهد بود.

قابلیت تعویض میلگردهای مذکور پس از زلزله، به‌ویژه در حالت اتصال به کمک پیچ و مهره، باعث سرعت بیشتر و همچنین کاهش هزینه‌های بازسازی و مرمت سازه‌ها می‌شود. از طرف دیگر، در ساخت میراگر ساعت شنی از میلگردهای معمول در صنعت ساختمان استفاده می‌شود، که به نوبه‌ی خود موجب سهولت ساخت و نصب آن خواهد بود و همچنین هزینه‌های ساخت و تعویض آن را در مقایسه با سایر روش‌های موجود به‌شدت کاهش خواهد داد.

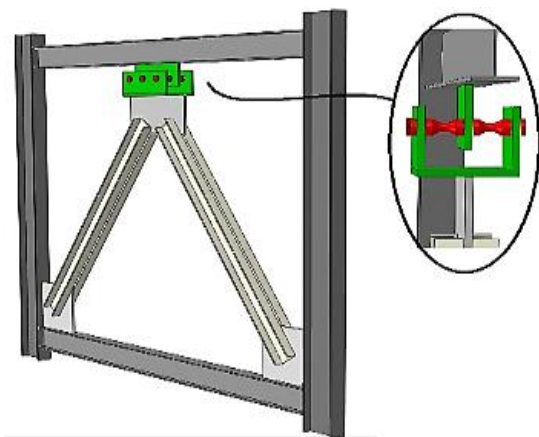
۲. معرفی میراگر با فیوز ساعت شنی

۱.۲. مشخصات هندسی و اجزاء تشکیل‌دهنده

در شکل ۱، نمای کلی هندسه‌ی میراگر پیشنهادی به همراه نحوه‌ی اتصال آن در قاب فولادی به کمک بادبند شورون مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، میراگر مذکور از سه جزء تشکیل شده است:

۱) **تکیه‌گاه میانی:** شامل یک ورق فولادی است، که به بال تحتانی تیر متصل می‌شود و همراه با تغییر مکان‌های جانبی تیر جابجا می‌شود.

۲) **تکیه‌گاه‌های کناری:** شامل سه ورق فولادی هستند، که به شکل U به یکدیگر جوش می‌شوند و تکیه‌گاه کناری میلگردهای ساعت شنی به‌حساب می‌آیند.



شکل ۱. میراگر ساعت شنی و نحوه‌ی اتصال آن در قاب فولادی به کمک بادبند شورون.

نوع جدیدی از میراگرهای تسلیمی با هندسه‌ی C شکل ارائه و مطالعه شده است؛^[۸] که در آن، علاوه بر غیرمنشوری بودن مساحت ورق در طول آن، سطح مقطع عمود بر محور عضو نیز به‌صورت غیریکنواخت طراحی می‌شود. در اثر خمش خارج از صفحه‌ی ورق، تمامی قسمت‌های میراگر به‌صورت یک‌نواخت تسلیم خواهند شد و از مصالح به‌صورت بهینه استفاده می‌شود. اوستایی فر و همکاران (۲۰۲۱)،^[۱۱] ایده‌ی استفاده از عضو غیرمنشوری در ترکیب با صفحه‌های اصطکاکی را به‌عنوان یک میراگر با عملکرد دوگانه توسعه داده‌اند.

میراگر پیستونی، نوع دیگری از میراگرهای تسلیمی را شامل می‌شود،^[۱۰ و ۱۱] که در آن، یک شفت فولادی توپُر به‌صورت هم‌محور با یک سیلندر قرار می‌گیرد و در فضای خالی بین آن‌ها، صفحات فولادی دایروی که در مرکز سوراخ دارند، قرار می‌گیرند. در جابجایی‌های کم و متوسط، انرژی زلزله از طریق تسلیم خمشی صفحات فولادی ذکر شده جذب می‌شود، در حالی که با افزایش مقادیر جابجایی، الگوی تسلیم به سمت کششی می‌رود و مقادیر سختی افزایش قابل‌ملاحظه‌ای می‌یابند.

نوع دیگر رایج میراگرهای تسلیمی، میراگرهای شکاف‌دار (SSD)،^[۱۲-۱۴] هستند، که در آن‌ها از صفحات فولادی با شکاف‌های عمودی استفاده می‌شود. رفتار صفحه بعد از حذف شکاف‌ها به‌صورت برشی-خمشی است و ظرفیت جذب انرژی مطلوبی دارند. هر چند که به‌علت پدیده‌ی تمرکز تنش در اطراف شکاف‌ها بعضاً شکست برشی پیش از موعد در صفحات مشاهده می‌شود؛ اما این نقیصه را می‌توان با ارائه‌ی الگوهای متنوع برای شکل شکاف‌ها تا حدود زیادی بر طرف کرد.^[۱۵]

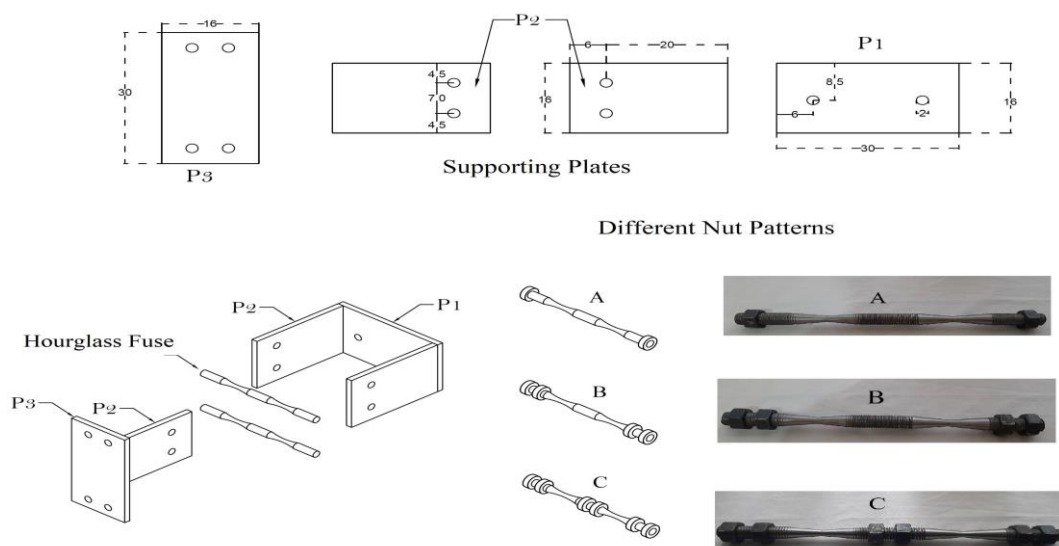
میراگرهای متنوعی با ایده‌ی بهره‌گیری از میلگردهای فولادی به‌عنوان جزء تسلیم‌شونده پیشنهاد شده است،^[۱۶-۱۸] لیکن نخستین بار واستروالیس^۱ و همکاران (۲۰۱۳)،^[۱۹] به‌منظور استفاده در اتصال صلب پس‌تنیده‌ی فولادی و به‌عنوان قسمت جاذب انرژی اتصال، ایده‌ی استفاده از میراگرهای ساخته‌شده از میلگردهای غیرمنشوری به شکل ساعت شنی^۲ را مطرح کرده‌اند. ایده‌ی اصلی میلگردهای غیرمنشوری به شکل ساعت شنی نیز همانند صفحات X شکل میراگرهای ADAS است، که سطح مقطع متناسب با لنگر وارده تغییر می‌کند تا تمامی نقاط میراگر هم‌زمان به تسلیم برسند. در اتصال پیشنهادی، نیروی موجود در کابل‌های پس‌تنیدگی عامل بازگرداندن زاویه بین تیر و ستون به حالت اولیه بوده است، در حالی که میلگردهای ساعت شنی، وظیفه‌ی استهلاک انرژی را به‌عهده داشته‌اند.

گرمه^۲ و همکاران (۲۰۲۱)،^[۲۰] با استفاده از ایده‌ی میلگردهای ساعت شنی، یک نوع میراگر دورانی را بر روی بادبندهای شورون نصب کرده‌اند، که با توجه به حرکت دورانی نسبی بین تیر و بادبند، انرژی لرزه‌ای از طریق تسلیم پیچشی میلگردهای ساعت شنی جذب شده است. در ادبیات فنی مطالعات صورت‌گرفته بر روی میراگرهای تسلیمی، به‌درستی عبارت فیوز به‌جای میراگر استفاده شده است، چرا که این عضو با تسلیم‌شدن در حین بارگذاری از آسیب‌دیدن سایر نقاط سازه جلوگیری می‌کند و از طرف دیگر، تعویض آن اقتصادی‌تر و آسان‌تر از تعویض سایر المان‌های سازه‌ای است؛ به عبارت بهتر، شاخص اصلی یک فیوز سازه‌ای مطلوب، قیمت پایین، و سهولت تعویض آن خواهد بود.

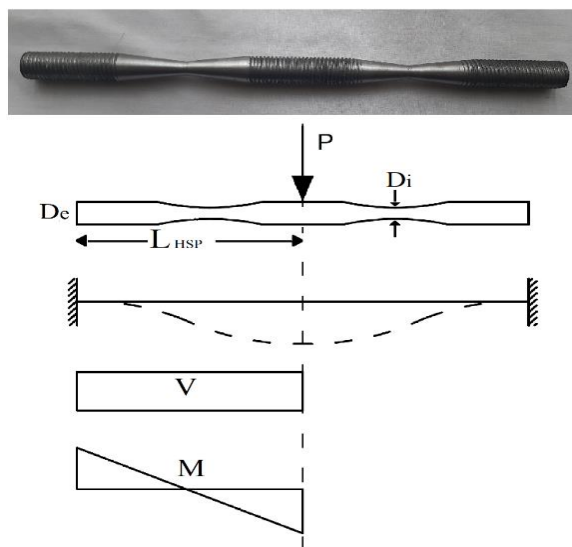
³ Garmeh

¹ Vasdravellis

² Hourglass Shape Pins



شکل ۲. اجزاء تشکیل دهنده میراگر ساعت شنی و الگوهای متفاوت آرایش مهره‌های اتصال (ابعاد بر حسب سانتی‌متر).



شکل ۳- مدلسازی میلگرد ساعت شنی به صورت تیر دو سر گیردار و نمودارهای برش و خمش.

D_e : قطر میلگرد،

D_i : کمینه قطر تراش داده شده میلگرد به شکل ساعت شنی.

ضریب 0.9 در رابطه ۲، برای لحاظ کردن نسبت بین تنش برشی بیشینه و میانگین در مقاطع دایروی است. در یک طراحی مناسب، ظرفیت خمیری برشی مقطع باید از ظرفیت خمشی آن بیشتر باشد؛ به عبارت دیگر، تسلیم خمشی باید قبل از تسلیم برشی اتفاق افتد.^[۲۰]

براساس روابط تعادل استاتیکی، رابطه ۳ را خواهیم داشت:

$$V_{HSP} = \frac{2M_{PL}}{L_{HSP}} < V_{PL} \quad (3)$$

که در آن، L_{HSP} طول میلگرد ساعت شنی است، که در شکل ۳ مشخص شده است. با توجه به اینکه V_{HSP} از تحلیل نیمی از میلگرد محاسبه شده است؛ بنابراین، ظرفیت کلی میلگرد ساعت شنی (P_{HSP}) مطابق رابطه ۴ محاسبه

۳) فیوزهای ساعت شنی: فیوزهای ساعت شنی شامل میلگردهای فولادی رایج در صنعت ساختمان هستند، که به کمک دستگاه تراشکاری^۴ به شکل ساعت شنی تراش داده می‌شوند.

به منظور اتصال میلگردهای ساعت شنی به صفحات فولادی تکیه‌گاهی میراگر از دو روش (الف) جوشکاری و (ب) اتصال به کمک مهره استفاده شده است.

در روش اتصال به کمک مهره، ابتدا میانه و انتهای میلگردها رزوه می‌شوند و با عبور از سوراخ‌های تعبیه شده در ورق‌های تکیه‌گاهی میراگر به کمک مهره و در سه آرایش متفاوت (A, B, C) به ورق‌های تکیه‌گاهی اتصال می‌یابند؛ اما در روش اتصال جوشی، میلگردها به ورق‌های اتصال جوش داده می‌شوند. جزئیات اجزاء تشکیل دهنده میراگر و همچنین الگوهای متفاوت آرایش مهره‌های اتصال و ابعاد و اندازه‌های قطعات در شکل ۲ مشاهده می‌شود.

۲.۲. روابط حاکم بر رفتار میلگردهای ساعت شنی

در شکل ۳، مدل ساده شده میلگرد ساعت شنی به شکل یک تیر نشان داده شده است؛ که با توجه به شرایط تکیه‌گاهی و نحوه بارگذاری، می‌توان آن‌ها را به صورت یک تیر دو سر گیردار با بار متمرکز در وسط در نظر گرفت، که با توجه به شرایط تقارن، فقط نمودار نیروی برشی و لنگر خمشی نیمی از آن نشان داده شده است.

ظرفیت نهایی میلگرد ساعت شنی (P_{HSP}) را می‌توان به کمک تحلیل خمیری تعیین کرد. برای این منظور، ابتدا همان‌طور که گفته شد، براساس شرایط تقارن، ظرفیت خمیری نیمی از میلگرد ساعت شنی (V_{HSP}) براساس ظرفیت‌های خمیری خمشی و برشی مطابق روابط ۱ و ۲ محاسبه می‌شود.

$$M_{pl} = \frac{D_e^3}{6} f_y \quad (1)$$

$$V_{pl} = 0.9 \frac{\pi D_i^2}{4} \times \frac{f_y}{\sqrt{3}} \quad (2)$$

که در آن‌ها،

f_y : تنش تسلیم مصالح فولادی میلگردها،

می‌شود:

$$P_{HSP} = 2 \times V_{HSP} \quad (4)$$

۳. بررسی آزمایشگاهی میراگر پیشنهادی

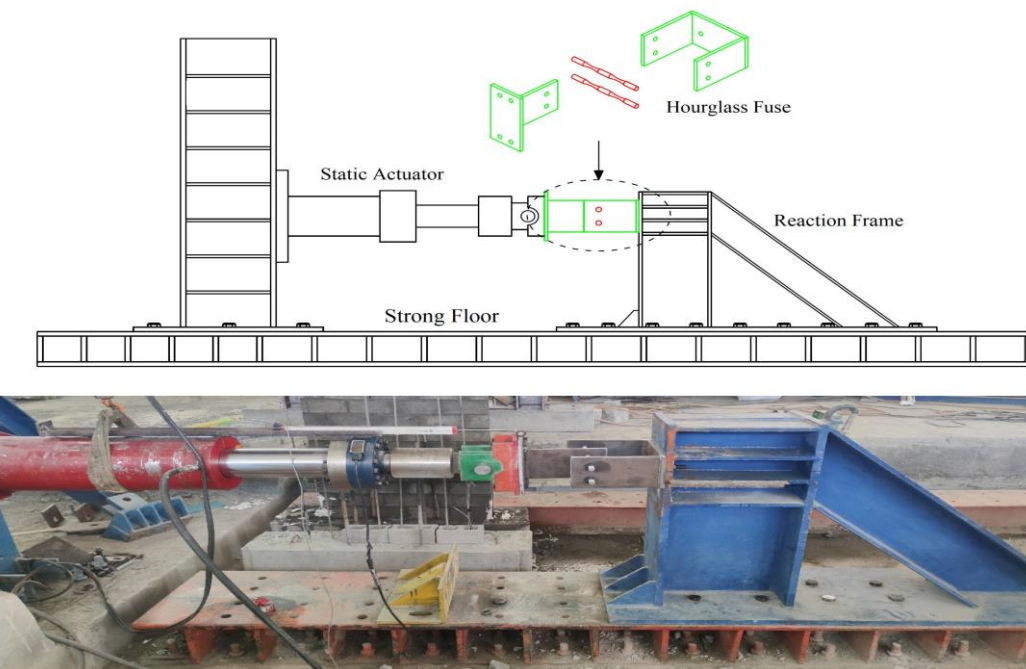
از آنجا که عامل اصلی تعیین‌کننده رفتار میراگر پیشنهادی، نحوه عملکرد میلگردهای ساعت شنی است؛ لذا در آزمایشگاه، میلگردهای مذکور تحت بارگذاری رفت و برگشتی قرار گرفتند و نمودار رفتار چرخه‌ای و همچنین ظرفیت جذب انرژی آن‌ها بررسی شده است. علاوه بر این همان‌طور که گفته شد، روش اتصال میلگردهای ساعت شنی به ورق‌های تکیه‌گاهی اعم از جوشکاری و یا با استفاده از مهره و همچنین الگوهای متفاوت نصب مهره‌ها در اتصال تأثیر آن در نحوه عملکرد میراگر به وسیله بارگذاری پوش مطالعه شده است.

۱.۳. مشخصات فنی و هندسی نمونه‌ها

در ابتدا به منظور انتخاب جنس مصالح فولادی میلگردهای ساعت شنی، از ۴ نمونه میلگرد فولادی رایج در بازار ایران (میل‌های ساخته شده از ST۳۷ و CK۴۵ و همچنین میلگردهای AII و AIII)، آزمایش کشش استاندارد میلگرد به عمل آمد و میانگین نتایج مصالح به عنوان مشخصات مکانیکی آن در نظر گرفته شده است (جدول ۱).

با توجه به نتایج به دست آمده، میل‌های ساخته شده از فولاد CK۴۵ به علت مقاومت بالا و در عین حال شکل‌پذیری مناسب انتخاب شد، سپس میلگردهای ساخته شده از فولاد CK۴۵ به وسیله دستگاه تراش کاری به شکل ساعت شنی تراش داده شد. به منظور ساخت ورق‌های تکیه‌گاهی میراگر از ورق فولاد نرمه ST ۳۷ استفاده شده است.

ورق‌های تکیه‌گاهی به کمک گیوتین برش خورده و سوراخ‌های مورد نظر برای عبور میلگردهای ساعت شنی به وسیله پانچ در آن‌ها ایجاد شده است. این تذکر لازم است که قطر سوراخ‌های استاندارد ایجاد شده براساس بند ۲.۳.۹.۲.۱۰



شکل ۴. ستاپ آزمایشگاهی.

مبحث دهم مقررات ملی ساختمان، ۲ میلی‌متر نسبت به قطر میلگردهای ساعت شنی بزرگ‌تر در نظر گرفته شده است. برای اتصال ورق‌ها نیز از جوش گوشه استفاده شده است. ابعاد و اندازه‌ی فیوز ساعت شنی و ورق‌های اتصال در شکل ۲ مشاهده می‌شود.

۲.۳. پیکربندی^۵ آزمایشگاهی

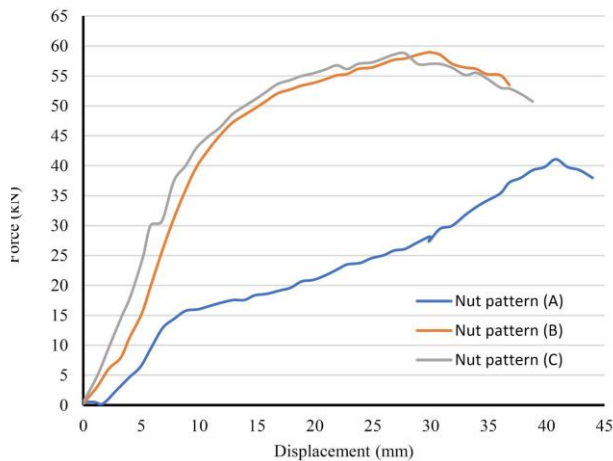
همان‌طور که گفته شد، با توجه به نقش کلیدی رفتار میلگردهای ساعت شنی در نحوه عملکرد کلی میراگر پیشنهادی، فیوزهای ساعت شنی ساخته شده در یک ستاپ آزمایشگاهی (مطابق شکل ۴) توسط یک جک هیدرولیکی با ظرفیت ۵۰ تن تحت بارگذاری جابجایی کنترل قرار گرفتند. جک هیدرولیکی روی قسمت ستون (قائم) قاب صلب قرار گرفته و برای برقراری شرایط تکیه‌گاه قوی نیز نمونه‌ی تحت آزمایش از سمت دیگر به قاب سخت دیگری تکیه داشته است. مجموعه‌ی قاب‌های صلب همگی بر روی کف قوی آزمایشگاه سوار بوده‌اند.

با توجه به اینکه کلاhek جک به صورت مفصلی به آن متصل شده است، به منظور جلوگیری از دوران کلاhek در حین آزمایش و خطای احتمالی ناشی از خروج از مرکزیت بار اعمال شده، دو میلگرد ساعت شنی به شکل متقارن در بالا و پایین نمونه تعبیه و بارگذاری شده‌اند.

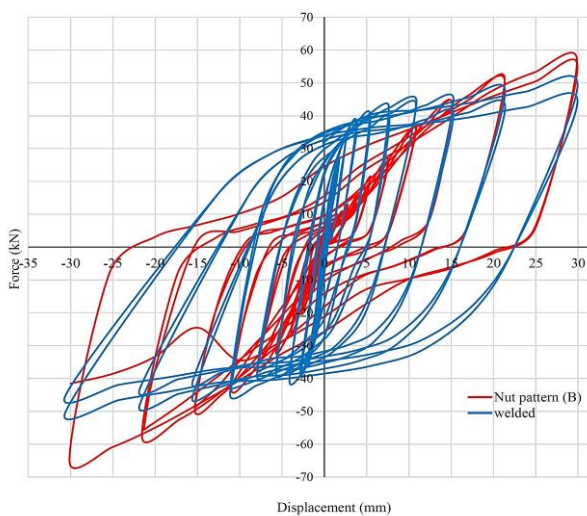
جدول ۱. نتایج آزمون کشش مصالح فولادی میلگردها.

مصالح	F_y (MPa)	F_u (MPa)	ϵ_u (%)	E (GPa)
ST-37	240	450	23	200
CK-45	465	550	18	210
AII	305	520	19	210
AIII	400	600	12	205

⁵ Setup



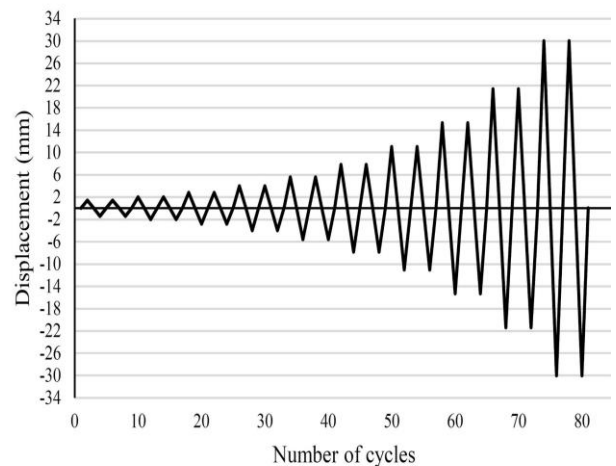
شکل ۶. نمودار پوش الگوهای متفاوت چیدمان مهره‌ها در اتصال به کمک مهره.



شکل ۷. نمودار چرخه‌ای آرایش مهره‌ی B در حالت مهره‌ی معمولی و اتصال جوشی.

می‌توان گفت نمونه‌های B و C، رفتاری تقریباً مشابهی داشته‌اند؛ که در این بین، نمونه‌ی B به‌علت سهولت در نصب، برای ادامه‌ی مطالعه و همچنین بارگذاری چرخه‌ای انتخاب شده است.

نمودار چرخه‌ای^۶ آرایش مهره‌ی B و همچنین نمونه‌ی جوش‌شده تحت بارگذاری رفت و برگشتی در شکل ۷ مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، نمونه‌ها سختی اولیه‌ی مناسبی داشته و زوال مقاومت و سختی محسوسی در آن‌ها مشاهده نشده است، ولی باریک‌شدگی^۷ قابل ملاحظه‌ای در رفتار چرخه‌ای نمونه‌ی پیچ و مهره‌ای مشاهده شده است. باریک‌شدگی، پدیده‌ای است که در برخی از سیستم‌های باربر جانبی مانند قاب‌های خمشی بتن‌آرمه و یا سیستم‌های اتصال پس‌تنیده و یا سیستم‌های میراگر انرژی، مانند آلیاژهای حافظه‌دار شکلی^۸ بروز می‌کند. در اتصال به کمک پیچ و مهره در فاز بارگذاری، با افزایش مقدار نیروی اعمالی به میله‌ها، عملکرد هم‌زمان رفتار خمشی و برشی باعث افزایش طول میله می‌شود. از آنجا که برخلاف حالت جوش‌شده، هیچ‌گونه اتصالی بین مهره و صفحه‌های تکیه‌گاهی وجود ندارد، این افزایش طول باعث



شکل ۸. الگوی بارگذاری اعمالی مطابق با آیین‌نامه‌ی FEMA۴۶۱^[۱۸]

در پیکربندی مذکور، فیوزهای ساعت شنی تحت دو نوع بارگذاری متفاوت قرار گرفتند. در ابتدا، جهت تعیین چیدمان بهینه‌ی مهره‌ها در اتصال فیوزهای ساعت شنی به ورق‌های تکیه‌گاهی میراگر به روش مهره، فیوزهای مذکور تحت بارگذاری پوش قرار گرفتند و پس از آن، الگوی بهینه‌ی حاصل به‌منظور بررسی رفتار چرخه‌ای تحت بارگذاری رفت و برگشتی قرار گرفته است.

الگوی بارگذاری رفت و برگشتی اعمال شده منطبق بر دستورالعمل بارگذاری آیین‌نامه‌ی FEMA۴۶۱^[۱۹] با مقدار جابجایی بیشینه‌ی ۳۰ میلی‌متر بوده است (شکل ۵). مقدار تغییرمکان در هر دو سیکل متوالی با هم برابر بوده و سپس برای گام بعدی مقدار آن ۴۰٪ افزایش یافته است. بر طبق الگوی مذکور، مقادیر جابجایی اعمالی به نمونه‌ها برابر با ۱/۴، ۲، ۲/۸، ۴، ۵/۶، ۷/۸، ۱۱، ۱۵/۳، ۲۱/۴ و ۳۰ میلی‌متر بوده است. این تذکر لازم است که میراگرهای تسلیمی، حساسیت چندانی به سرعت بارگذاری نداشته و در کلیه‌ی نمونه‌ها، بارگذاری با سرعت ثابت ۰/۵ میلی‌متر بر ثانیه اعمال شده است.^[۲۰]

۳.۳. رفتار کلی نمونه‌ها

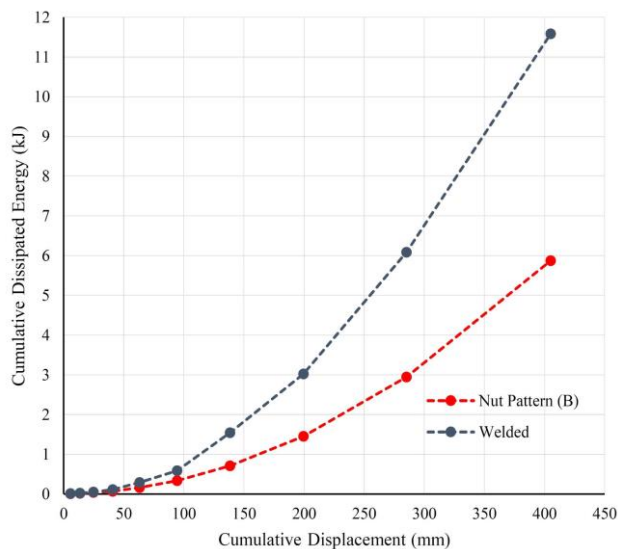
برای ارزیابی تأثیر نحوه‌ی اتصال میلگردهای ساعت شنی به ورق‌های تکیه‌گاهی، رفتار منحنی نیرو- جابجایی میراگر با چیدمان‌های متفاوت مهره‌های متصل‌کننده، تحت اثر بارگذاری پوش بررسی و مطالعه شده است. بدین منظور، سه آرایش متفاوت مهره (A، B، C) مطابق شکل ۲ در نظر گرفته شده است. نمودار متناظر نیرو- جابجایی هر یک از سه آرایش اخیر، تحت بارگذاری پوش در شکل ۶ مشاهده می‌شود.

همان‌طور که ملاحظه می‌شود، نمونه‌ی A در مقایسه با دو نمونه‌ی دیگر به شکل قابل‌ملاحظه‌ای، مقاومت و سختی کمتری دارد؛ به‌طوری‌که سختی اولیه و مقاومت نهایی آن به ترتیب ۸۴ و ۴۳ درصد از نمونه‌ی B کمتر بوده است. به‌علاوه، افت سختی قابل‌توجهی را در جابجایی حدود ۸ میلی‌متر تجربه کرده است؛ که علت اصلی آن، افزایش ضلبيت شرایط تکیه‌گاهی در حالت استفاده از دو مهره به‌جای تک‌مهره بوده است. لذا، هر چند که ایده‌ی اولیه‌ی استفاده از تک‌مهره به‌علت سهولت در نصب و مونتاژ مفید فایده به نظر می‌رسید؛ اما همان‌طور که اشاره شد، اثر آن در کاهش سختی و مقاومت غیرقابل‌چشم‌پوشی است. از طرفی، چنانچه از تفاوت اندک در مقادیر سختی اولیه صرف‌نظر شود،

^۸ Shape memory alloy

^۶ Hysteresis

^۷ Pinching



شکل ۹. نمودار انرژی جذب‌شده‌ی تجمعی در برابر جابجایی تجمعی.

۵/۶ میلی‌متر، تفاوت قابل توجهی بین سختی مؤثر نمونه‌های جوشی و مهره‌ای مشاهده می‌شود. از طرفی، طبق آنچه در بخش ۳.۳ گفته شد، رفتار باریک‌شوندگی که در اتصال به کمک مهره بروز می‌کند، با تغییر روش اتصال به جوشی اصلاح شده است، که اثر آن در چاق شدن چرخه‌های پاسخ مشهود است و اثر مثبتی در ظرفیت جذب انرژی داشته است. هر دو نمونه تا آخرین گام بارگذاری، رفتاری فاقد افت قابل توجه در سختی و همچنین مقاومت بروز داده‌اند.

۳.۴. ظرفیت جذب انرژی

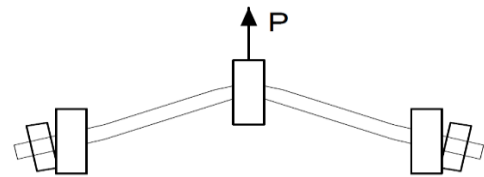
از مهم‌ترین شاخص‌ها در ارزیابی عملکرد میراگر، توانایی جذب و استهلاک انرژی است. طبق تعریف، انرژی جذب‌شده عبارت از سطح محصور به حلقه‌ی چرخه‌ای در نمودار نیرو- جابه‌جایی است. چنانچه مقادیر مساحت‌های مذکور در جابجایی‌های متوالی با هم جمع شوند، مقدار حاصل، انرژی جذب‌شده‌ی تجمعی خواهد بود. در شکل ۹، تغییرات کمیت انرژی جذب‌شده‌ی تجمعی در مقابل جابجایی تجمعی مشاهده می‌شود. با توجه به آنچه در بخش ۳.۳ در رابطه با اصلاح مشکل باریک‌شدگی نمودار چرخه‌ای میراگر در صورت استفاده از فن جوش کاری برای اتصال میلگردهای ساعت شنی به جای اتصال به کمک مهره بیان شد، در اتصال جوشی، حلقه‌های چرخه‌ای به‌اصطلاح چاق‌تری مشاهده می‌شود؛ لذا دور از انتظار نخواهد بود که با افزایش سطح زیر نمودار، طبق تعریف، انرژی جذب‌شده توسط میراگر با اتصال جوشی نسبت به حالت اتصال مهره‌ای افزایش پیدا کند. مقادیر حاصل از انرژی جذبی تجمعی، به‌ویژه در نمونه‌ی جوش‌شده و با توجه به وزن کم میراگرها، نشان‌دهنده‌ی توانایی مطلوب میراگر در جذب انرژی است.

۴.۴. سختی مؤثر و میرایی لزج معادل

در اغلب موارد، رفتار میراگر را می‌توان به‌صورت رفتار یک سیستم تک‌درجه‌ی آزادی با میرایی لزج معادل بیان کرد. سختی سیستم مذکور، که به آن سختی مؤثر گفته می‌شود، با استفاده از رابطه‌ی ۵ مشخص می‌شود:

$$K_{eff} = \frac{|P_{max}| + |P_{min}|}{|\delta_{max}| + |\delta_{min}|} \quad (5)$$

که در آن، P_{min} و P_{max} به ترتیب بیشترین و کمترین نیروی تحمل‌شده



شکل ۸. ایجاد فاصله و کرنش پس‌ماند مابین مهره و ورق‌های تکیه‌گاهی در حالت اتصال به کمک مهره.

به‌وجودآمدن فاصله و همچنین زاویه‌ی بین مهره و صفحه‌های اتصال می‌شود (شکل ۸).

در فاز باربرداری تا مرحله‌ی جبران فاصله و زاویه‌ی به‌وجودآمده و شکل‌گیری مجدد شرایط تکیه‌گاهی تماس کامل مابین مهره و صفحه‌ها، کاهش توأمان سختی و مقاومت باعث به‌وجودآمدن باریک‌شدگی در رفتار چرخه‌ای میراگر می‌شود. این در حالی است که در حالت جوش‌شده به‌علت تماس کامل و دائم بین میله‌ها و صفحه‌های تکیه‌گاهی، اثر باریک‌شدگی از بین می‌رود و بهبود قابل‌ملاحظه‌ای در ظرفیت جذب انرژی مشاهده می‌شود.

۴. تحلیل نتایج حاصل از آزمایش

۴.۱. پاسخ در بارگذاری مونوتونیک

بافت در نمودار پوش بار- جابجایی نمونه‌ها (شکل ۶)، اثر نحوه‌ی آرایش مهره- های به‌کاررفته در اتصال میلگردهای ساعت شنی به ورق‌های تکیه‌گاهی بر روی رفتار کلی میراگر قابل توجه و مشخص است. نمونه‌ی A در مقایسه با دو نمونه‌ی دیگر نقطه‌ی تسلیم نمونه‌های B و C حدوداً در نقطه‌ی متناظر با جابجایی ۱۲ میلی‌متر بوده است، در حالی که نمونه‌ی کم‌مقاومت A در جابجایی معادل نصف مقدار مذکور دچار تسلیم شده است.

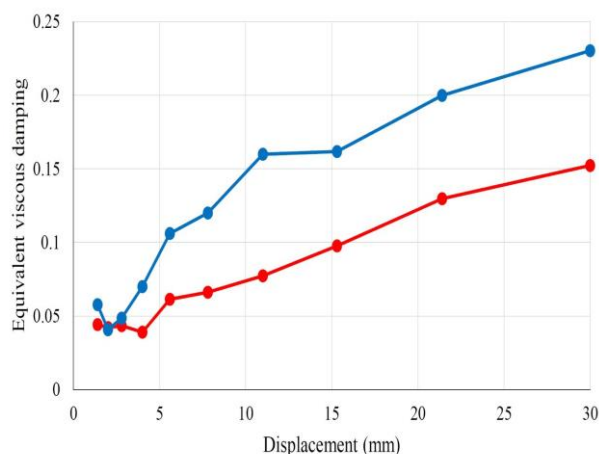
همان‌طوری که از وضعیت نمودارهای تغییرشکل‌یافته‌ی B و C پیداست، رفتار نمونه‌ها افزایش مقاومت خوبی را در نتیجه‌ی رفتار خمشی از خود بروز داده‌اند. در جدول ۲، پارامترهای مهم به‌دست‌آمده از نتایج آزمایش‌ها ارائه شده است؛ که در آن، سختی کشسان (K) از نسبت مقاومت تسلیم به تغییرمکان تسلیم به‌دست آمده است.

۴.۲. پاسخ در بارگذاری چرخه‌ای

همان‌طور که قبلاً اشاره شد، با توجه به اهمیت شناخت و تجزیه و تحلیل عملکرد میراگر تحت بارگذاری چرخه‌ای، نمونه‌ی مهره‌ای با آرایش نوع B و نمونه‌ی اتصال جوشی تحت بارگذاری چرخه‌ای با پروتکل آیین‌نامه‌ی FEMA۴۶۱^[۲۱] قرار گرفتند. نمودار بار- تغییرمکان چرخه‌ای در شکل ۷ مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن می‌توان گفت که در تمامی نمونه‌ها، نقطه‌ی تسلیم در محدوده‌ی تغییرمکان‌های کوچک بروز کرده است، که به‌نوعی بیانگر انتقال آرام وضعیت نمونه از محدوده‌ی کشسان به غیرکشسان است همچنین در تغییرمکان‌های کوچک، یعنی تا گام چهارم بارگذاری متناظر با تغییرمکان

جدول ۲. پارامترهای مهم حاصل از بارگذاری پوش.

نمونه	D_y (mm)	P_y (kN)	D_u (mm)	P_u (kN)	K_{el}
A	8.5	17	44	37	2.1
B	8	31	36	53	3.87
C	7.5	30	39	50	4



شکل ۱۲. تغییرات میرایی معادل با افزایش تغییرمکان.

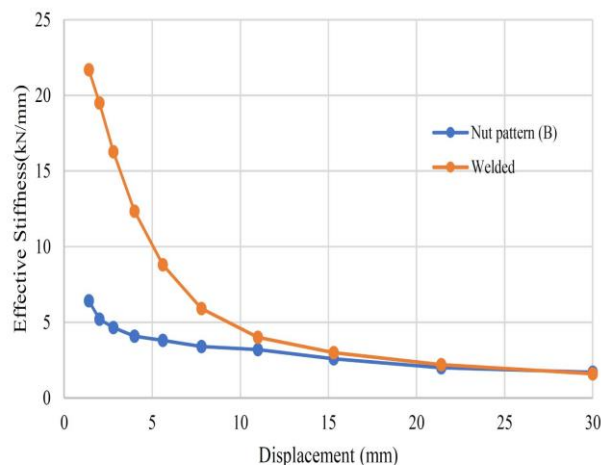
جذب شده توسط سیستم کشسان با سختی مؤثر است. مقادیر میرایی معادل در برابر جابجایی در شکل ۱۲ مشاهده می شود.

نمودار اخیر، تغییرات افزایشی میرایی لزج معادل نمونه ها در طول بارگذاری را نشان می دهد. هر چند چنین تغییراتی در آزمایش های تحت بارگذاری چرخه ای دور از انتظار نیست؛ ولی می توان چنین استنباط کرد که نمونه ی جوش شده در مقایسه با نمونه ی مهره شده، لزجت بالایی دارد و آهنگ افزایش بیشتری را نیز نشان می دهد؛ به طوری که با پیشروی سیکل های بارگذاری، میرایی لزج نمونه ی جوش شده، افزایش ۲۰۰ درصدی را تجربه کرده است. در حالی که همین تغییرات در نمونه ی مهره شده، حدود ۱۰۰٪ برآورد شده است. این نکته قابلیت نمونه ی ساعت شنی جوش شده در استهلاک انرژی قابل انتظار را بیشتر اثبات می کند.

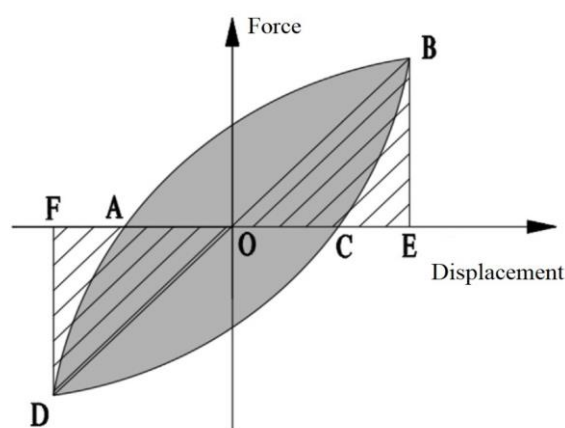
۵. خلاصه و نتیجه گیری

در پژوهش حاضر، یک نوع میراگر فولادی تسلیم شونده با استفاده از میلگردهای غیرمنشوری به فرم ساعت شنی به منظور بهبود عملکرد لرزه ای سازه ها پیشنهاد شده و مورد مطالعه ی آزمایشگاهی قرار گرفته است. برای اتصال میلگردها به ورق های تکیه گاهی میراگر، از دو روش متفاوت جوش کاری و اتصال به کمک مهره استفاده شده است. نمونه ها به صورت جداگانه تحت بارگذاری های چرخه ای و مونوتونیک قرار گرفته اند. در بارگذاری چرخه ای، ضوابط دستورالعمل ۴۶۱ FEMA و در بارگذاری مونوتونیک نیز سرعت بارگذاری ثابت ۰/۵ میلی متر بر ثانیه استفاده شده است. نتایج به دست آمده نشان از تأثیر قابل ملاحظه ی نوع اتصال میلگردها در رفتار کلی میراگر است؛ که در اینجا به اهم آن ها اشاره شده است:

- با توجه به ساختار میراگر و شرایط تکیه گاهی و نیز بارگذاری میلگردها، که می توان آن را به صورت تیر گیردار- هدایت شونده با بار متمرکز در یک سمت در نظر گرفت، با استفاده از میلگردهای رایج در صنعت ساختمان، یک عضو غیرمنشوری با مقطع متغیر، متناسب با نیروهای داخلی و به شکل ساعت شنی به عنوان بخش تسلیم شونده ی (فیوز) میراگر انتخاب شد. نحوه ی اتصال این جزء به ورق های تکیه گاهی میراگر نقش مؤثری در رفتار کلی میراگر داشته است.
- در اتصال نوع ۱، که در آن به کمک مهره، میلگردهای رزوه شده ی ساعت شنی به ورق های تکیه گاهی متصل شده اند، به منظور تعیین اثر نحوه ی چینش مهره ها در اتصال و همچنین یافتن حالت بهینه، سه نمونه با تیپ های مختلف



شکل ۱۰. تغییرات سختی مؤثر به ازاء جابجایی های مختلف.



شکل ۱۱. مساحت های استفاده شده در محاسبه ی میرایی معادل.

توسط نمونه در هر چرخه ی بارگذاری بر حسب KN هستند. همچنین δ_{max} و δ_{min} ، مقادیر جابجایی متناظر با نیروهای مذکور بر حسب میلی متر (mm) هستند. در شکل ۱۰، مقدار سختی مؤثر در هر سیکل بارگذاری و به ازاء تغییرمکان اعمال شده مشاهده می شود.

همان گونه که پیداست، با افزایش جابجایی و تعداد سیکل های بارگذاری، سختی نمونه با آهنگ نسبتاً ثابتی در حال کاهش است. البته با وجود اینکه سختی نمونه ی جوش شده بیشتر از نمونه ی مهره شده است؛ ولی تغییرات سختی هر دو مورد مشابه است و رفتار یکسانی دارند. همچنین در هر دو نمونه در سیکل اول با افزایش بار و جابجایی وارده، افت قابل توجهی در میزان سختی مؤثر به چشم می خورد؛ به طوری که در همان سیکل، سختی مؤثر به میزان ۵۰٪ کاهش یافته است.

میرایی معادل سیستم اشاره شده (β_{eq})، نیز مطابق رابطه ی ۶ برابر قراردادن انرژی جذب شده توسط میراگر در هر سیکل با انرژی جذب شده توسط فتری با سختی مؤثر (K_{eff}) به دست می آید (شکل ۱۱).

$$\beta_{eff} = \frac{1}{2\pi} \times \frac{E_D}{S_{(OBE+ODF)}} \quad (6)$$

که در آن، E_D انرژی جذب شده توسط میراگر است، که عبارت از مساحت محصور به حلقه ی چرخه ای در هر سیکل بارگذاری و $S_{(OBE+ODF)}$ ، انرژی

- افت قابل ملاحظه‌ی مقاومت را از خود نشان داده‌اند، اما نمونه‌ی جوشی به‌علت توانایی بالاتر در جذب و میراسازی انرژی، برتری دارد.

- میرایی لزج معادل نمونه‌ها با افزایش تعداد سیکل‌های بارگذاری حالت صعودی (با آهنگ ثابت) داشته است. در نمونه‌ی تیپ جوش‌شده، میزان افزایش میرایی لزج معادل در مقایسه با نمونه‌ی مهره‌ای تیپ B بیشتر و قابل ملاحظه‌تر بوده است؛ به‌طوری که نمونه‌ی جوشی در سیکل آخر بارگذاری افزایش ۲۰۰ درصدی میرایی را تجربه کرده است.

- نمونه‌ی جوشی با توجه به ساختار صلب‌تر در مقایسه با نمونه‌ی تیپ B، سختی کشسان اولیه‌ی بالاتری در حدود ۳ برابر داشته است. هر چند که روند کاهش سختی در طول آزمایش برای هر دو نمونه تقریباً یکسان بوده و هر دو نمونه، سختی برابری در گام آخر بارگذاری داشته‌اند.

- نتایج ظرفیت جذب انرژی تجمعی، نشان‌دهنده‌ی توان مطلوب جذب انرژی میراگر در هر دو روش اتصال جوشی و مهره‌ای با توجه به وزن پایین مصالح مصرفی (میلگردها ساعت شنی) است

آرایش مهره (A، B و C) پیشنهاد شدند و تحت بارگذاری مونوتونیک قرار گرفتند. نتایج به‌دست‌آمده نشانگر تأثیر قابل ملاحظه‌ی چیدمان مهره‌ها در رفتار میراگر است؛ به‌طوری که سختی اولیه و مقاومت نهایی نمونه‌ی A به ترتیب ۸۴ و ۴۳ درصد از نمونه‌ی B کمتر بوده است. در مجموع تیپ A به‌علت ساختار ناپایدار خود علاوه بر پایین بودن سختی اولیه، دچار افت مقاومت قابل توجه بوده و عملکرد مطلوبی نداشته است. از بین تیپ‌های B و C نیز با توجه به تشابه رفتاری دو نمونه، تیپ B به‌علت سهولت نصب به‌عنوان الگوی بهینه جهت انجام بارگذاری چرخه‌ای انتخاب شده است.

- در اتصال نوع ۲، میلگرهای ساعت شنی مستقیماً به صفحات تکیه‌گاهی جوش شده‌اند. این نمونه به همراه تیپ B، که دارای الگوی بهینه‌ی اتصال به کمک مهره است، تحت بارگذاری چرخه‌ای قرار گرفت. براساس نتایج، نمودار چرخه‌ای نمونه‌ی تیپ B، باریک‌شدگی در فاز باربرداری داشته است، که باعث کاهش ظرفیت جذب انرژی آن به میزان قابل توجه ۹۰ درصدی نسبت به نمونه‌ی جوشی شده است. لذا اگرچه هر دو نمونه، رفتار چرخه‌ای پایدار و بدون

References- منابع

- Whittaker, A., Bertero, V. V., Thompson, C. L. & Alonso, L. J., 1991. Seismic Testing of Steel Plate Energy Dissipation Devices. *Earthquake Spectra*, 7(4), pp. 563-604. <https://doi.org/10.1193/1.1585644>
- Chen, Y., Yu, W., Zhang, M. & Li, Y., 2022. A novel energy dissipation damper for multi-level earthquakes. *Journal of Constructional Steel Research*, 192, p. 107214. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2022.107214>
- Li, Z., Shu, G. & Huan, Z., 2019. Development and cyclic testing of an innovative shear-bending combined metallic damper. *Journal of Constructional Steel Research*, 158, pp. 28-40. DOI: [10.1016/j.jcsr.2019.03.008](https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2019.03.008)
- Houshmand-Sarvestani, A., Totonchi, A., Shahmohammadi, M. A. & Salehipour, H., 2023. Numerical assessment of the effects of ADAS yielding metallic dampers on the structural behavior of steel shear walls (SSWs). *Mechanics Based Design of Structures and Machines*, 51(3), pp. 1626-1644. <https://doi.org/10.1080/15397734.2021.1875328>
- Youssef, A. A., Esfahani, M. R. & Zareian, M. S., 2023. Experimental evaluation of post-tensioned hybrid coupled shear wall system with TADAS steel dampers at the beam-wall interface. *Structures*, 53, pp. 1283-1299. <http://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.04.122>
- Mohammadi, R. K., Nasri, A. & Ghaffary, A., 2017. TADAS dampers in very large deformations. *International Journal of Steel Structures*, 17, pp. 515-524. <https://doi.org/10.1007/s13296-017-6011-y>
- Tsai, K.-C., Chen, H.-W., Hong, C.-P. & Su, Y.-F., 1993. Design of steel triangular plate energy absorbers for seismic-resistant construction. *Earthquake Spectra*, 9(3), pp. 505-528. <https://doi.org/10.1193/1.1585727>
- Garivani, S., Aghakouchak, A. & Shahbeyk, S., 2016. Numerical and experimental study of comb-teeth metallic yielding dampers. *International Journal of Steel Structures*, 16, pp. 177-196. <https://doi.org/10.1007/s13296-016-3014-z>
- Farsi, A., Amiri, H. R. & Dehghan Manshadi, S. H., 2021. An innovative C-shaped yielding metallic dampers for steel structures. *Structures*, 34(December), pp. 4254-4268. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.08.069>
- Avestaeifar, P. & Khezzzadeh, H., 2021. Experimental and numerical assessment of Piston Hybrid Frictional Metallic Damper (PHFMD). *Engineering Structures*, 243, p. 112669. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112669>
- Jarrah, M., Khezzzadeh, H., Mofid, M. & Jafar, K., 2019. Experimental and numerical evaluation of piston metallic damper (PMD). *Journal of Constructional Steel Research*, 154, pp. 99-109. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.jcsr.2018.11.024>
- Heyrani Moghaddam, S. & Shooshtari, A., 2023. Numerical and experimental investigation on seismic performance of proposed steel slit dampers. *Journal of Constructional Steel Research*, 200, pp. 107646. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2022.107646>
- Chan, R.W., Albermani, F., 2008. Experimental study of steel slit damper for passive energy dissipation. *Engineering Structures*, 30(4), pp. 1058-1066. <http://doi.org/10.1016/j.engstruct.2007.07.005>
- Hedayat, A. A., 2015. Prediction of the force displacement capacity boundary of an unbuckled steel slit damper. *Journal of Constructional Steel Research*, 114, pp. 30-50. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2015.07.003>
- Aminzadeh, M., Kazemi, H. S. & Tavakkoli, S. M., 2020. A numerical study on optimum shape of steel slit

- dampers. *Advances in Structural Engineering*, 23, pp. 2967-2981. DOI:10.1177/1369433220927281
16. Aghlara, R. & Tahir, M., 2018. A passive metallic damper with replaceable steel bar components for earthquake protection of structures. *Engineering Structures*, 159, pp. 185-197. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.12.049>
 17. Ghaedi, K., Ibrahim, Z., Javanmardi, A. & Rupakhety, R., 2021. Experimental Study of a New Bar Damper Device for Vibration Control of Structures Subjected to Earthquake Loads. *Journal of Earthquake Engineering*, 25(2), pp. 300-318. <https://doi.org/10.1080/13632469.2018.1515796>
 18. Zlatkov, D. et al., 2022. Experimental and Numerical Study of Energy Dissipation Components of a New Metallic Damper Device. *Journal of Vibration Engineering and Technologies*, 10, pp. 1809-1829. <https://doi.org/10.1007/s42417-022-00485-0>
 19. Vasdravellis, G., Karavasilis, TL. and Uy, B., 2013. Large-scale experimental validation of steel post-tensioned connections with web hourglass pins. *Journal of Structural Engineering*, 139(6), pp.1033–1042. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.000069](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.000069)
 20. Garmeh, V., Akbarpour, A., Adibramezani, M., Kashani, A. and Adibi, M., 2021. Introducing and numerical study of an innovative rotational damper with replaceable hourglass steel pins. *Structures*. 33, pp.2019-2035. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.05.072>
 21. Applied Technology Council, Mid-America Earthquake Center, Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research (US), Pacific Earthquake Engineering Research Center and National Earthquake Hazards Reduction Program (US), 2007. Interim testing protocols for determining the seismic performance characteristics of structural and nonstructural components. Federal Emergency Management Agency.