

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

ساعت شنی

محمدحسین آفریدون^۱، رضا آقایاری^{۲*}، محمدحسین ادیب راد^۳، مهرزاد تحملی رودسری^۴

۱- دانشجوی دکتری سازه، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه رازی

۲- دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه رازی

۳- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه رازی

۴- دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرمانشاه

پست الکترونیکی نویسندگان:

۱- afreidoun.mohammadhoseein@razi.ac.ir

۲- reza_agh@razi.ac.ir

۳- m.adibrad@razi.ac.ir

۴- tahamouli@iauksh.ac.ir

چکیده:

میراگرهای فولادی تسلیمی نوعی از روش‌های کنترل لرزه‌ای به شمار می‌آیند که عملکرد مثبت آنها در زلزله‌های گذشته مورد توجه قرار گرفته است. در این مقاله یک نوع میراگر فولادی تسلیمی جدید پیشنهاد شده و مورد مطالعه آزمایشگاهی قرار گرفته است. مشخصه اصلی این میراگر استفاده از میلگردهای غیر منشوری به شکل ساعت شنی است. پیکربندی میراگر به گونه ایست که میلگردها با سازوکار تسلیم خمشی - کششی انرژی را جذب نموده و پس از زلزله شدید قابل تعویض خواهند بود. برای اتصال میلگردها به اجزای تکیه‌گاهی میراگر از دو روش متفاوت جوشکاری و اتصال به کمک مهره استفاده شده است. اثر نوع اتصال و همچنین الگوی آرایش مهره‌ها بر رفتار میراگر مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج نشان‌دهنده تأثیر قابل توجه نوع اتصال بر مشخصات رفتاری است به گونه‌ای که ظرفیت جذب انرژی و میرایی معادل در نمونه اتصال به کمک جوش نسبت به مهره به ترتیب ۹۱ و ۵۳ درصد ارتقاء یافته، گرچه میراگر ساخته شده با هر دو روش اتصال از رفتار چرخه‌ای پایدار و همچنین ظرفیت جذب انرژی مناسبی برخوردار هستند.

واژگان کلیدی:

میراگر فولادی تسلیمی، رفتار چرخه‌ای، میلگرد ساعت شنی، مطالعه آزمایشگاهی، رفتار غیرخطی

* رضا آقایاری، دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه رازی

ایمیل: reza_agh@razi.ac.ir (نویسنده مسئول مقاله)

Experimental study of a new metallic damper using hourglass fuse

Mohammad. H Afridoon ^١, Reza Aghayari ^{٢*}, Mohammad. H Adibrad ^٣,
Mehrzaad Tahamouli Roudsari ^٤

١- Ph.D. Student, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Razi university, Kermanshah, Iran.

٢- Associate Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Razi university, Kermanshah, Iran.

٣- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Razi university, Kermanshah, Iran

٤- Associate Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Azad university of kermanshah, kermanshah, Iran.

Abstract:

Being one of the world's most earthquake-prone countries, Iran has suffered thousands of lives lost in earthquakes throughout the past decades. Metallic yielding damper is a specific kind of passive structural control device which has shown effective behavior in past earthquakes. In this paper a new metallic yielding damper made of 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 undergone drift levels beyond the expected design ones to identify its complete behavior and all possible failure modes. The main feature of proposed damper is replaceable hourglass shape pins (HSP) fuse. For this purpose conventional reinforcing steel bars in constructional practice have been shaped by lathe machine in the form of hourglass pins. These hourglass pins dissipate energy mostly through flexural and tensile mechanism 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 build 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 has been studied through laboratory tests. Simplified analytical procedure using plastic analysis and simple rules of mechanics of solids was found to accurately predict the HSP behavior and found to be consistent with experimental results. The experimental results indicate 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 proposed damper was reached. Although both types of connections have shown acceptable behavior throughout cyclic loading, but total energy absorption capacity and equivalent viscous damping in welded connection in comparison with nut connection have been improved by 91 and 53 percent respectively.

Keywords : metallic yield damper, hysteresis behavior, hourglass pin, experimental study, nonlinear behavior.

متداولترین و شناخته‌شده‌ترین نوع میراگرهای تسلیمی، میراگرهای ADAS [۱] تا [۴] و TADAS [۵] تا [۷] هستند که متشکل از صفحات فولادی X شکل و یا V شکل بوده و انرژی زلزله از طریق رفتار تسلیم خمشی چرخه‌ای این صفحات جذب می‌شود. علت اصلی انتخاب شکل صفحات میراگر به‌صورت غیر منشوری، غیریکنواخت بودن مقادیر لنگر در طول این اعضا است. به‌عبارت‌دیگر قسمتی که متحمل کمترین مقدار لنگر خمشی است دارای کمترین سطح مقطع خواهد بود و به‌این ترتیب توقع می‌رود که کل حجم فولاد مصرفی به شکل یکنواختی به تسلیم برسد. با استفاده از همین ایده در سال‌های اخیر نوع جدیدی از میراگرهای تسلیمی با هندسه C شکل ارائه شده و مورد مطالعه قرار گرفته است [۸]. در این میراگر علاوه بر غیر منشوری بودن مساحت ورق در طول آن، سطح مقطع عمود بر محور عضو نیز به‌صورت غیریکنواخت طراحی می‌گردد. بر اثر خمش خارج از صفحه‌ی ورق تمامی قسمت‌های میراگر به‌صورت یکنواخت تسلیم خواهند شد و از مصالح به‌صورت بهینه استفاده می‌گردد. اوستایی و همکاران [۹] ایده استفاده از عضو غیر منشوری در ترکیب با صفحات اصطکاکی را به‌عنوان یک میراگر با عملکرد دوگانه توسعه دادند.

میراگر پیستونی نوع دیگری از میراگرهای تسلیمی را شامل می‌شود [۱۰] و [۱۱] در این میراگر یک شفت فولادی توپر به‌صورت هم محور با یک سیلندر قرار گرفته و در فضای خالی بین آنها صفحات فولادی دایروی که در مرکز دارای سوراخ هستند قرار می‌گیرد. در جابه‌جایی‌های کم و متوسط انرژی زلزله از طریق تسلیم خمشی این صفحات جذب می‌شود درحالی‌که با افزایش مقادیر جابه‌جایی الگوی تسلیم به سمت کششی رفته و مقادیر سختی افزایش قابل ملاحظه‌ای می‌یابد.

نوع دیگر رایج میراگرهای تسلیمی، میراگرهای شکافدار (SSD) [۱۲] تا [۱۴] است. در این میراگر از صفحات فولادی با شکاف‌های عمودی استفاده شده است. رفتار صفحه بعد از حذف شکاف‌ها به‌صورت برشی - خمشی بوده و از ظرفیت جذب انرژی مطلوبی برخوردار هستند. هر چند که به علت پدیده تمرکز تنش در اطراف

بر اساس رویکرد آیین‌نامه‌های لرزه‌ای، طراحی سازه‌های متعارف به‌گونه‌ای است که در صورت وقوع زلزله طرح برخی از اعضای سازه با ورود به ناحیه رفتار غیرخطی، تغییر شکل‌های بزرگ غیرارتجاعی را تجربه می‌کنند که حاصل آن اتلاف و جذب انرژی به‌صورت چرخه‌ای در ناحیه غیرالاستیک خواهد بود، درعین حال از فروریزش کلی سازه جلوگیری به عمل می‌آید. ایجاد مفاصل پلاستیک در تیرهای سیستم قاب خمشی و یا تسلیم تیر پیوند در سیستم مهاربند واگرا و همچنین رفتار غیرارتجاعی دیوارهای برشی نمونه‌هایی از این رفتار هستند.

بازسازی ساختمان‌ها پس از زلزله به علت این توزیع گسترده نواحی پلاستیک از لحاظ اقتصادی بسیار هزینه بر است؛ از این رو روش کنترل خسارت که بتوان رفتار پلاستیک را از سطح اعضای سازه به قطعات و یا تجهیزات از پیش طراحی شده که قابلیت تعویض و یا تعمیر داشته باشند انتقال داد مورد توجه قرار گرفته است.

روش‌های کنترل خسارت را می‌توان به سه دسته: 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. این سیستم‌های کنترلی در اغلب موارد شامل سنسورها و جک‌های هیدرولیکی است که با منبع انرژی الکتریکی کار می‌کنند. اما در روش غیرفعال پاسخ‌های لرزه‌ای از طریق افزایش میرایی در سیستم کنترل شده و کاهش می‌یابد.

میراگرهای فولادی تسلیمی^۲، میراگرهای اصطکاکی، میراگرهای لزج و ویسکوالاستیک از جمله شناخته‌شده‌ترین تجهیزات کنترل خسارت غیرفعال بشمار می‌آیند که از این میان میراگر فولادی تسلیمی به علت سهولت ساخت، هزینه تمام شده نسبی پایین، پایدار بودن رفتار چرخه‌ای و عدم نیاز به نگهداری و بازرسی‌های دوره‌ای از اقبال بیشتری برخوردار است.

شکاف‌ها بعضاً شاهد شکست برشی پیش از موعد در صفحات هستیم؛ اما این نقیصه را می‌توان با ارائه الگوهای متنوع برای شکل شکاف‌ها تا حدود زیادی بر طرف نمود. [۱۵]

میراگرهای متنوعی با ایده‌ی بهره‌گیری از میلگردهای فولادی به‌عنوان جزء تسلیم شونده پیشنهاد شده است [۱۶] تا [۱۸] لیکن نخستین بار واستراوالیس و همکاران [۱۹] به‌منظور استفاده در اتصال صلب پس تنیده فولادی و به‌عنوان قسمت جاذب انرژی اتصال ایده استفاده از میراگرهای ساخته شده از میلگردهای غیر منشوری به شکل ساعت شنی^۳ را مطرح نمودند. ایده اصلی میلگردهای غیر منشوری 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 پس تنیدگی عامل بازگرداندن زاویه بین تیر و ستون به حالت اولیه بود، درحالی‌که میلگردهای ساعت شنی وظیفه استهلاک انرژی را به عهده داشتند.

گرمه و همکاران [۲۰] با استفاده از ایده میلگردهای ساعت شنی یک نوع میراگر دورانی را ارائه نمودند. این میراگر بر روی بادبندهای شورون نصب می‌شود و با توجه به حرکت دورانی نسبی بین تیر و بادبند، انرژی لرزه‌ای از طریق تسلیم پیچشی میلگردهای ساعت شنی جذب می‌گردد. در ادبیات فنی مطالعات صورت‌گرفته بر روی میراگرهای تسلیمی، به‌درستی عبارت فیوز به‌جای میراگر به‌کارگرفته شده است چرا که این عضو با تسلیم شدن 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.

در این مطالعه با استفاده از میلگردهای معمول در صنعت ساختمان یک نوع میراگر ساعت شنی پیشنهاد شده و رفتار چرخه‌ای آن به‌صورت آزمایشگاهی و با در نظر گرفتن دو روش مختلف اتصال مورد بررسی قرار گرفته است. مهم‌ترین ویژگی میراگرهای ساعت شنی مقطع غیر منشوری آنهاست، به شکلی که سطح مقطع میله متناسب

با نیروهای داخلی در طول عضو تغییر کرده و یک عضو بهینه را ارائه می‌کند. در این حالت تمامی نقاط میله در اثر بارگذاری به شکل یکنواختی تسلیم شده و در ظرفیت باربری نهایی مشارکت مؤثرتری دارند به‌طوری‌که نسبت انرژی جذب شده به وزن در مقایسه با میله‌های منشوری در حالت ماکزیمم قرار دارد. همچنین نوع سازوکار رفتاری میلگردها به شکل کششی - خمشی است که می‌توان گفت یک ویژگی منحصربه‌فرد در مقایسه با بیشتر میراگرهای تسلیمی است که رفتار حاکم بر آنها به‌صورت صرفاً خمشی است و باعث بهره‌گیری مناسب‌تر از ظرفیت مصالح خواهد بود.

قابلیت تعویض این میلگردها پس از زلزله، به‌ویژه در حالت اتصال به کمک پیچ‌ومهره، باعث سرعت بیشتر و همچنین کاهش هزینه‌های بازسازی و مرمت سازه‌ها می‌گردد. از طرف دیگر در ساخت این میراگر از میلگردهای معمول در صنعت ساختمان استفاده می‌شود که به نوبه خود موجب سهولت ساخت و نصب این نوع میراگر 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

۲-۱- مشخصات هندسی و اجزای تشکیل دهنده

در شکل (۱)، نمای کلی هندسه میراگر پیشنهادی به همراه نحوه اتصال آن در قاب فولادی به کمک بادبند شورون نشان داده شده است. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود این میراگر از سه جز تشکیل شده، (۱) تکیه‌گاه میانی: شامل یک ورق فولادی که به بال تحتانی تیر متصل می‌شود و همراه با تغییر مکان‌های جانبی تیر جابجا می‌شود، (۲) تکیه‌گاه‌های کناری: شامل سه ورق فولادی که به شکل U به یکدیگر جوش شده و تکیه‌گاه کناری میلگردهای ساعت شنی محسوب می‌گردند و (۳) فیوزهای ساعت شنی: این فیوزها شامل میلگردهای فولادی رایج در صنعت ساختمان است که به کمک دستگاه تراشکاری^۴ به شکل ساعت شنی تراش داده شده است.

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. با توجه به شرایط تکیه‌گاهی و نحوه بارگذاری، این میلگردها را می‌توان به صورت یک تیر دو سر گیردار با بار متمرکز در وسط در نظر گرفت که با توجه به شرایط تقارن صرفاً نمودار نیروی برشی و لنگر خمشی نیمی از آن نشان داده شده است.

ظرفیت نهایی میلگرد ساعت شنی (PHSP) را می‌توان به کمک تحلیل پلاستیک تعیین نمود. برای این منظور ابتدا همان‌طور که گفته شد بر اساس شرایط تقارن، ظرفیت پلاستیک نیمی از میلگرد ساعت شنی (VHSP) بر اساس ظرفیت‌های پلاستیک خمشی و برشی محاسبه می‌شود.

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

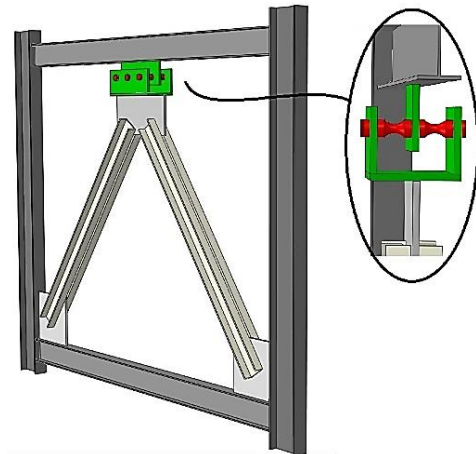
$$V_{pl} = 0.9 \frac{\pi D_i^2}{4} \times \frac{f_y}{\sqrt{3}} \quad (2)$$

در روابط فوق

f_y : تنش تسلیم مصالح فولادی میلگردهای

D_e : قطر میلگرد

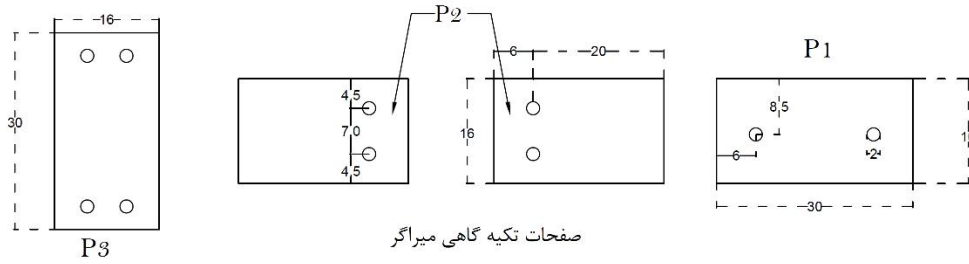
D_i : حداقل قطر تراش داده شده میلگرد به شکل ساعت شنی



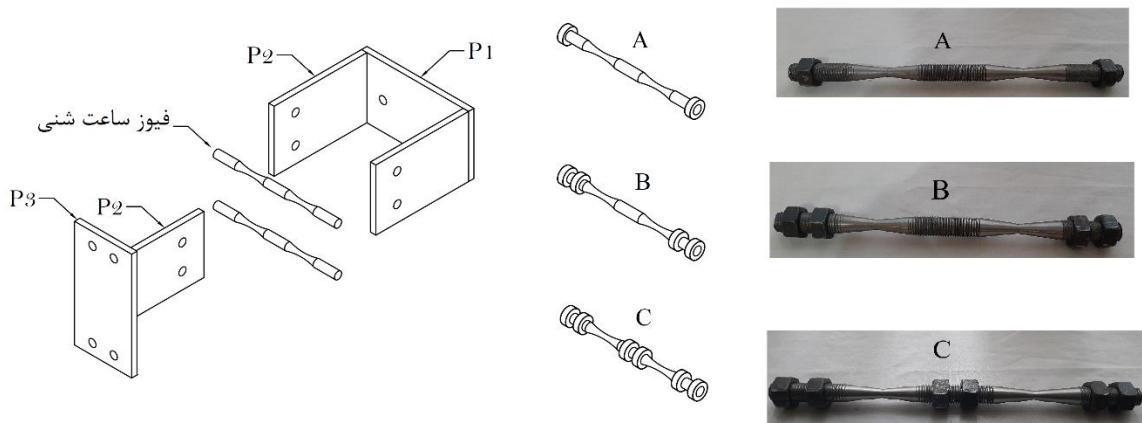
شکل ۱- میراگر ساعت شنی و نحوه اتصال آن در قاب فولادی به کمک بادبند شورون

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.

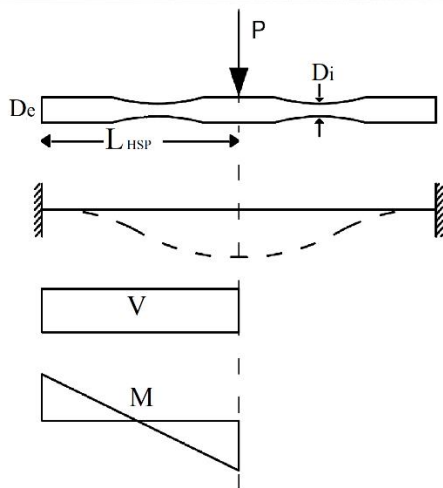
در روش اتصال به کمک مهره ابتدا، میانه و انتهای میلگردها رزوه شده و با عبور از سوراخ‌های تعبیه شده در ورق‌های تکیه‌گاهی میراگر به کمک مهره و در سه آرایش متفاوت (A و B و C) به این ورق‌ها متصل گردیده‌اند؛ اما در روش اتصال جوشی میلگردها به ورق‌های اتصال جوش داده شده‌اند. جزئیات اجزای تشکیل‌دهنده میراگر و همچنین الگوهای متفاوت آرایش مهره‌های اتصال و ابعاد و اندازه‌های قطعات در شکل (۲) نشان داده شده است.



الگوهای متفاوت آرایش مهره اتصال



شکل ۲- اجزای تشکیل دهنده میراگر ساعت شنی و الگوهای متفاوت آرایش مهره های اتصال (ابعاد بر حسب سانتی متر)



ضریب ۰/۹ در رابطه (۲) برای لحاظ کردن نسبت بین تنش برشی ماکزیمم و میانگین در مقاطع دایروی است. در یک طراحی مناسب، ظرفیت پلاستیک برشی مقطع بایستی از ظرفیت خمشی آن بیشتر باشد به عبارت دیگر تسلیم خمشی بایستی قبل از تسلیم برشی اتفاق افتد. [۲۰]

بر اساس روابط تعادل استاتیک خواهیم داشت:

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

در این رابطه L_{HSP} طول میلگرد ساعت شنی است که در شکل ۳ مشخص شده است. باتوجه به اینکه V_{HSP} از تحلیل نیمی از میلگرد محاسبه شده است، بنابراین ظرفیت کلی میلگرد ساعت شنی (P_{HSP}) از رابطه زیر محاسبه می شود:

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

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

۳- بررسی آزمایشگاهی میراگر پیشنهادی

از آنجاکه عامل اصلی تعیین کننده رفتار میراگر پیشنهادی نحوه عملکرد میلگردهای ساعت شنی است، لذا در آزمایشگاه میلگردهای مذکور تحت بارگذاری رفت و برگشتی قرار گرفت و نمودار رفتار چرخه‌ای و همچنین ظرفیت جذب انرژی آنها بررسی گردیده است. علاوه بر این همان طور 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 بر نحوه عملکرد میراگر به وسیله بارگذاری پوش مورد مطالعه قرار گرفت.

۳-۱- مشخصات فنی و هندسی نمونه‌ها

در ابتدا به منظور انتخاب جنس مصالح فولادی میلگردهای ساعت شنی، از چهار نمونه میلگرد فولادی رایج در بازار ایران (میله‌های ساخته شده از St ۳۷ و CK ۴۵ و همچنین میلگردهای AII و AIII)، آزمایش کشش استاندارد میلگرد به عمل آمد و میانگین نتایج هر مصالح به عنوان مشخصات مکانیکی آن در نظر گرفته شده است (جدول ۱).

باتوجه به نتایج به دست آمده میله ساخته شده از فولاد CK ۴۵ به علت مقاومت بالا و درعین حال شکل پذیری مناسب انتخاب گردید، سپس میلگردهای ساخته شده از این نوع فولاد به وسیله دستگاه تراشکاری به شکل ساعت شنی تراش داده شد. به منظور ساخت ورق‌های تکیه‌گاهی میراگر از ورق فولاد نرمه St ۳۷ استفاده شد.

این ورق‌ها به کمک گیوتین برش داده شده و سوراخ‌های مورد نظر برای عبور میلگردهای ساعت شنی به وسیله پانچ در آنها ایجاد شده است. لازم به ذکر است قطر سوراخ‌های استاندارد ایجاد شده بر اساس بند ۱۰-۲-۹-۳-

۲ مبحث دهم مقررات ملی ساختمان، ۲ میلیمتر نسبت به قطر میلگردهای ساعت شنی بزرگ‌تر در نظر گرفته شده است. برای اتصال ورق‌ها از جوش گوشه استفاده شد. ابعاد و اندازه فیوز ساعت شنی و ورق‌های اتصال در شکل (۲) نشان داده شده است.

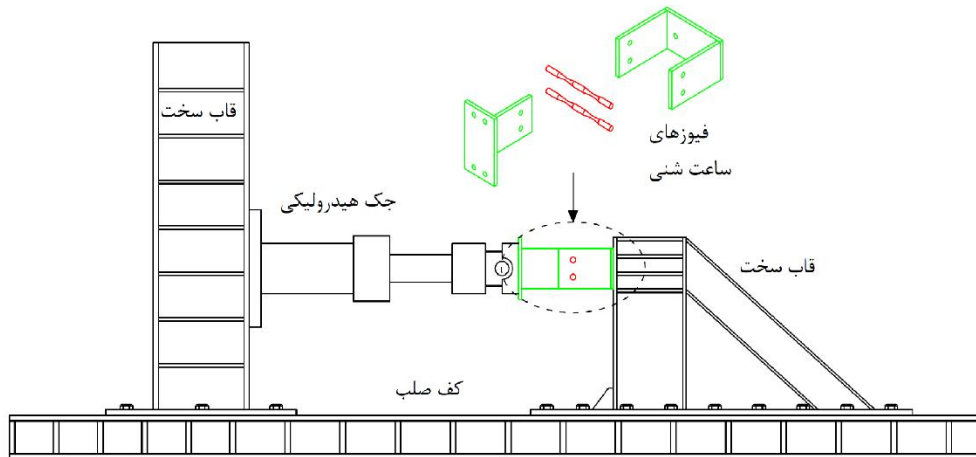
جدول ۱- نتایج تست کشش مصالح فولادی میلگردها

مصالح	F_y (MPa)	F_u (MPa)	ϵ_u (%)	E (GPa)
St-۳۷	۲۴۰	۴۵۰	۲۳	۲۰۰
CK-۴۵	۴۶۵	۵۵۰	۱۸	۲۱۰
AII	۳۰۵	۵۲۰	۱۹	۲۱۰
AIII	۴۰۰	۶۰۰	۱۲	۲۰۵

۳-۲- پیکربندی^۵ آزمایشگاهی

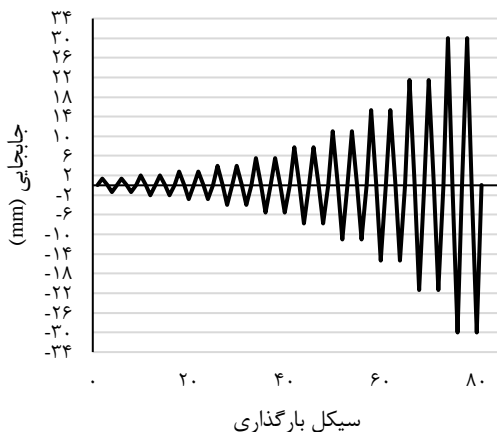
همان طور که گفته شد باتوجه به نقش کلیدی رفتار میلگردهای ساعت شنی در نحوه عملکرد کلی میراگر پیشنهادی، فیوزهای ساعت شنی ساخته شده در یک ستاپ آزمایشگاهی مطابق شکل (۴) توسط یک جک هیدرولیکی با ظرفیت ۵۰ تن تحت بارگذاری جابه‌جایی کنترل قرار گرفت. جک هیدرولیکی روی قسمت ستون (فایم) قاب صلب سوار بوده و برای برقراری شرایط تکیه‌گاه قوی نیز نمونه تحت آزمایش از سمت دیگر به قاب سخت دیگری تکیه دارد. مجموعه قاب‌های صلب همگی بر روی کف قوی آزمایشگاه سوار بودند.

باتوجه به اینکه کلاک جک به صورت مفصلی به آن متصل گردیده به منظور جلوگیری از دوران کلاک در حین



شکل ۴- ستاپ آزمایشگاهی

میلیمتر است. لازم به ذکر است که میراگرهای تسلیمی حساسیت چندانی به سرعت بارگذاری ندارند و در کلیه نمونه‌ها بارگذاری با سرعت ثابت ۰/۵ میلیمتر بر ثانیه اعمال شد [۲۰].



شکل ۵- الگوی بارگذاری اعمالی مطابق با FEMA ۴۶۱

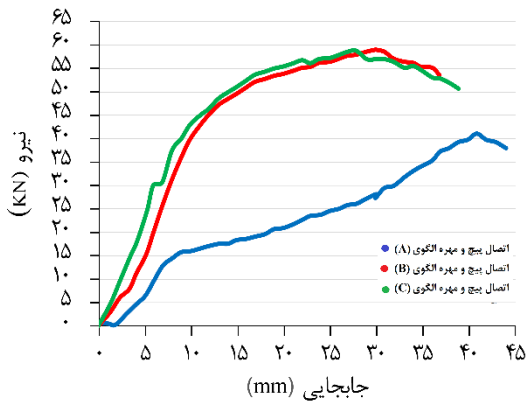
[۱۸]

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 مورد بارگذاری قرار گرفتند.

در پیکربندی مذکور فیوزهای ساعت شنی تحت دو نوع بارگذاری متفاوت قرار گرفتند. در ابتدا جهت تعیین چیدمان بهینه مهره‌ها در اتصال فیوزهای ساعت شنی به ورق‌های تکیه‌گاهی میراگر به روش مهره، این فیوزها تحت بارگذاری پوش قرار گرفت و پس از آن الگوی بهینه حاصل به منظور بررسی رفتار چرخه‌ای تحت بارگذاری رفت و برگشتی قرار می‌گیرد.

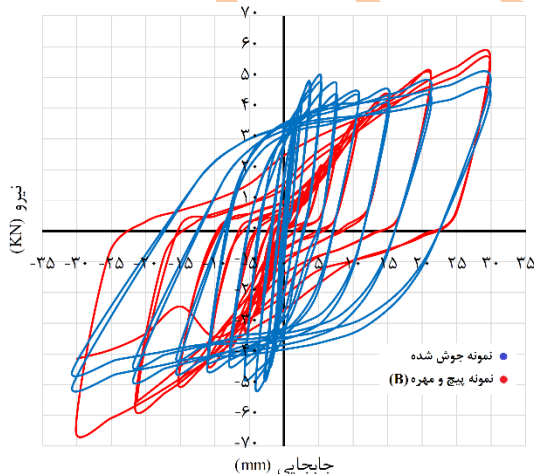
الگوی بارگذاری رفت و برگشتی اعمال شده منطبق بر دستورالعمل بارگذاری آیین‌نامه FEMA ۴۶۱ [۱۹] با مقدار جابه‌جایی ماکزیمم ۳۰ میلیمتر است (شکل ۵). مقدار تغییر مکان در هر دو سیکل متوالی با هم برابر بوده و سپس برای گام بعدی مقدار آن ۴۰ درصد افزایش می‌یابد. بر طبق الگوی مذکور مقادیر جابه‌جایی اعمالی به نمونه‌ها برابر با ۱/۴، ۲، ۲/۸، ۴، ۵/۶، ۷/۸، ۱۱، ۱۵/۳، ۲۱/۴ و ۳۰

۳-۳- رفتار کلی نمونه ها



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

نمودار چرخه‌ای^۶ آرایش مهره B و همچنین نمونه جوش شده تحت بارگذاری رفت و برگشتی در شکل (۷) نشان داده شده است. همانطور که در این نمودار مشاهده می‌شود نمونه‌ها از سختی اولیه مناسبی برخوردار بوده و زوال مقاومت و سختی محسوسی در آن مشاهده نمی‌شود، ولی باریک شدگی^۷ قابل ملاحظه‌ایی در رفتار چرخه‌ای نمونه پیچ و مهره ای مشاهده می‌شود. باریک شدگی پدیده‌ای است که در برخی از سیستم‌های باربر جانبی مانند قابهای خمشی بتن آرمه و یا سیستم‌های اتصال پس تنیده و یا سیستم‌های میراگر انرژی مانند آلیاژهای حافظه



شکل ۷- نمودار چرخه‌ای آرایش مهره B در حالت مهره معمولی و اتصال جوشی

برای ارزیابی تأثیر نحوه اتصال میلگردهای ساعت شنی به ورق‌های تکیه‌گاهی، رفتار منحنی نیرو - جابه‌جایی میراگر با چیدمان‌های متفاوت مهره‌های متصل‌کننده، تحت اثر بارگذاری پوش مورد بررسی و مطالعه قرار گرفت. بدین منظور سه آرایش متفاوت مهره (A, B, C) مطابق شکل ۲ در نظر گرفته شد. نمودار متناظر نیرو - جابه‌جایی هر یک از این آرایش‌ها تحت بارگذاری پوش در شکل (۶) نشان داده شده است.

همان‌طور که ملاحظه می‌شود نمونه A در مقایسه با دو نمونه دیگر به شکل قابل‌ملاحظه‌ای دارای مقاومت و سختی کمتری بوده، به‌طوری‌که سختی اولیه و مقاومت نهایی آن به ترتیب ۸۴ و ۴۳ درصد از نمونه B کمتر است، بعلاوه افت سختی قابل‌توجهی را در جابه‌جایی حدود ۸ میلی‌متر تجربه نموده است. علت اصلی این تفاوت افزایش صلبیت شرایط تکیه‌گاهی در حالت استفاده از دو مهره به‌جای تک مهره است؛ لذا هر چند که ایده اولیه استفاده از تک مهره به علت 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 گردد، می‌توان گفت نمونه‌های B و C دارای رفتاری تقریباً مشابهی هستند؛ که در این بین نمونه B به علت سهولت در نصب برای ادامه مطالعه و همچنین بارگذاری چرخه‌ای انتخاب گردید.

نقطه متناظر با جابجایی ۱۲ میلی‌متر بوده در حالی که نمونه - ی کم مقاومت A در جابجایی معادل نصف این مقدار دچار تسلیم شده است.

همان طوری که از وضعیت نمودارهای تغییر شکل یافته B و C پیداست، رفتار نمونه‌ها افزایش مقاومت خوبی را در نتیجه رفتار خمشی از خود بروز داده‌اند. در جدول (۲) پارامترهای مهم به دست آمده از نتایج آزمایش‌ها ارائه شده است. در این جدول سختی الاستیک K از نسبت مقاومت تسلیم به تغییر مکان تسلیم به دست آمده است.

جدول ۲- پارامترهای مهم حاصل از بارگذاری پوش

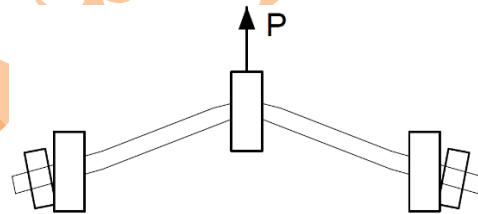
نمونه	D_y (mm)	P_y (KN)	D_u (mm)	P_u (KN)	K_{el}
A	۸/۵	۱۷	۴۴	۳۷	۲/۱
B	۸	۳۱	۳۶	۵۳	۳/۸۷
C	۷/۵	۳۰	۳۹	۵۰	۴

۴-۲- پاسخ در بارگذاری چرخه‌ای

همان طوری که قبلاً اشاره شد باتوجه به اهمیت شناخت و تجزیه تحلیل عملکرد میراگر تحت بارگذاری چرخه‌ای، نمونه مهره‌ای با آرایش نوع B و نمونه اتصال جوشی تحت بارگذاری چرخه‌ای با پروتکل آیین‌نامه FEMA ۴۶۱ [۲۱] قرار گرفتند. نمودار بار - تغییر مکان چرخه‌ای در شکل ۷ ارائه شده است. باتوجه به نمودار می‌توان گفت که در تمامی نمونه‌ها نقطه تسلیم در محدوده تغییر مکان‌های کوچک بروز نموده که به نوعی بیانگر انتقال آرام وضعیت نمونه از محدوده الاستیک به غیرالاستیک است همچنین در تغییر مکان‌های کوچک یعنی تا گام چهارم بارگذاری متناظر با تغییر مکان ۵/۶ میلی‌متر تفاوت قابل توجهی بین سختی مؤثر نمونه جوشی و نمونه مهره‌ای مشاهده می‌گردد. 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 گردیده که اثر آن در چاق شدن چرخه‌های پاسخ مشهود است و اثر مثبت در ظرفیت جذب انرژی خواهد داشت. هر دو نمونه

دار 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 می‌گردد. از آنجاکه بر خلاف حالت جوش شده هیچ‌گونه اتصالی بین مهره و صفحات تکیه‌گاهی وجود ندارد این افزایش طول باعث به وجود آمدن فاصله و همچنین زاویه بین مهره و صفحات اتصال می‌شود. شکل (۸)

در فاز باربرداری تا مرحله جبران فاصله و زاویه به وجود آمده و شکل‌گیری مجدد شرایط تکیه‌گاهی تماس کامل ما بین مهره و صفحات، کاهش توأمان سختی و مقاومت باعث به وجود آمدن باریک‌شدگی در رفتار چرخه‌ای میراگر می‌گردد. این در حالی است که در حالت جوش شده به علت تماس کامل و دائم بین میله‌ها و صفحات تکیه‌گاهی اثر باریک‌شدگی از بین رفته و بهبود قابل ملاحظه‌ای در ظرفیت جذب انرژی مشاهده می‌شود.



شکل ۸- ایجاد فاصله و کرنش پس ماند ما بین مهره و ورق‌های تکیه‌گاهی در حالت اتصال به کمک مهره

۴- تحلیل نتایج حاصل از آزمایش

۴-۱- پاسخ در بارگذاری مونوتونیک

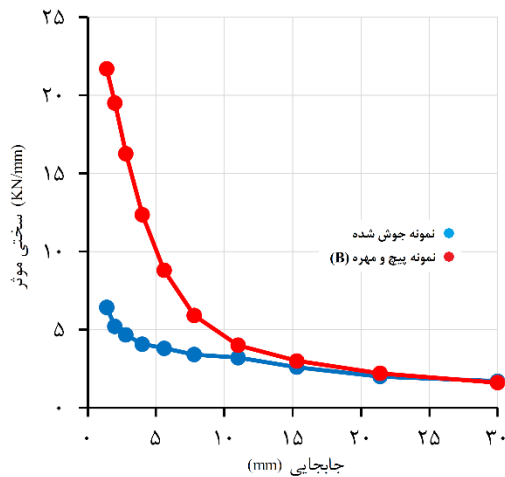
بادقت در نمودار پوش بار - جابه‌جایی نمونه‌ها (شکل ۶)، اثر نحوه آرایش مهره‌های به کار رفته در اتصال میلگرد- های ساعت شنی به ورق‌های تکیه‌گاهی بر روی رفتار کلی میراگر قابل توجه و مشخص است. نمونه A در مقایسه با دو نمونه دیگر نقطه تسلیم نمونه‌های B و C حدوداً در

۴-۴- سختی موثر و میرایی لزج معادل

در اغلب موارد رفتار میراگر را می‌توان به صورت رفتار یک سیستم تک درجه آزادی با میرایی لزج معادل بیان کرد. سختی این سیستم که به آن سختی مؤثر گفته می‌شود - شود با استفاده از رابطه ۵ مشخص می‌شود:

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

در این رابطه P_{max} و P_{min} به ترتیب بیشترین و کمترین نیرویی تحمل شده توسط نمونه در هر چرخه بارگذاری بر حسب KN است، همچنین δ_{max} و δ_{min} مقادیر جابجایی متناظر با این نیروها بر حسب mm می‌باشد. در شکل (۱۰) مقدار سختی موثر در هر سیکل بارگذاری و به ازای تغییر مکان اعمال شده نشان داده شده است.



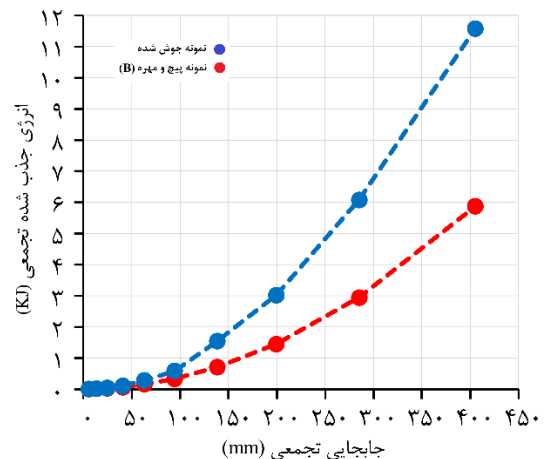
شکل ۱۰- تغییرات سختی موثر به ازای جابجایی‌های مختلف

همان‌گونه که پیداست با افزایش جابه‌جایی و تعداد سیکل‌های بارگذاری سختی نمونه با آهنگ نسبتاً ثابتی در حال کاهش است. البته با وجود اینکه سختی نمونه جوش شده بیشتر از نمونه مهره شده است؛ ولی تغییرات سختی هر دو مورد مشابه بوده و رفتار یکسانی دارند. همچنین در هر دو نمونه در سیکل اول با افزایش بار و جابه‌جایی وارده افت قابل توجهی در میزان سختی مؤثر به چشم می‌خورد

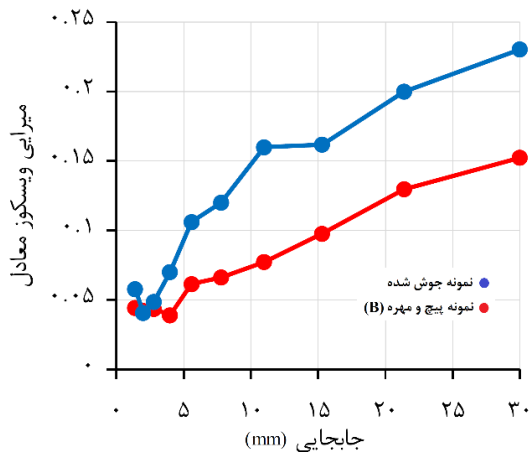
تا آخرین گام بارگذاری رفتاری فاقد افت قابل توجه در سختی و همچنین مقاومت بروز داده‌اند.

۴-۳- ظرفیت جذب انرژی

از مهم‌ترین شاخصه‌ها در ارزیابی عملکرد میراگر، توانایی جذب و استهلاک انرژی است. طبق تعریف، انرژی جذب شده عبارت است از سطح محصور به حلقه چرخه‌ای در نمودار نیرو - جابه‌جایی. چنانچه مقادیر این مساحت‌ها در جابه‌جایی‌های متوالی با هم جمع شود، مقدار حاصل انرژی جذب شده تجمعی خواهد بود. شکل (۹) نشان‌دهنده تغییرات این کمیت در مقابل جابجایی تجمعی است. باتوجه به آنچه در بخش ۳-۳ در رابطه با اصلاح مشکل باریک‌شدگی نمودار چرخه‌ای میراگر در صورت استفاده از فن جوشکاری برای اتصال میله‌گردهای ساعت شنی به جای اتصال به کمک مهره بیان شد، در اتصال جوشی با حلقه‌های چرخه‌ای به اصطلاح چاق تری روبرو هستیم؛ لذا دور از انتظار نخواهد بود که با افزایش سطح زیر نمودار، طبق تعریف، انرژی جذب شده توسط میراگر با اتصال جوشی نسبت به حالت اتصال مهره‌ای افزایش پیدا کند. مقادیر حاصل از انرژی جذبی تجمعی، به‌ویژه در نمونه جوش شده و باتوجه به وزن کم میراگرها، نشان‌دهنده توانایی مطلوب میراگر در جذب انرژی است.



شکل ۹- نمودار انرژی جذب شده تجمعی در برابر جابجایی تجمعی



شکل ۱۲- تغییرات میرایی معادل با افزایش تغییر مکان

۵- خلاصه و نتیجه گیری

در این پژوهش یک نوع میراگر فولادی تسلیم شونده با استفاده از میلگردهای غیر منشوری به فرم ساعت شنی به منظور بهبود عملکرد لرزه‌ای سازه‌ها پیشنهاد گردیده و مورد مطالعه آزمایشگاهی قرار گرفته است. برای اتصال میلگردها به ورق‌های تکیه‌گاهی میراگر، از دو روش متفاوت جوشکاری و اتصال به کمک مهره استفاده شده است. نمونه‌ها به صورت جداگانه تحت بارگذاری‌های چرخه‌ای و مونوتونیک قرار گرفتند. در بارگذاری چرخه‌ای ضوابط دستورالعمل FEMA ۴۶۱ و در بارگذاری مونوتونیک نیز سرعت بارگذاری ثابت ۰/۵ میلی‌متر بر ثانیه بکار رفت. نتایج حاصله نشان از تأثیر قابل ملاحظه‌ی نوع اتصال میلگردها بر رفتار کلی میراگر است. در ذیل به اهم این نتایج اشاره می‌شود.

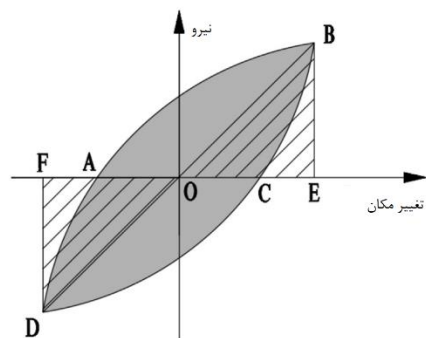
- با توجه به ساختار میراگر و شرایط تکیه‌گاهی و نیز بارگذاری میلگردها که می‌توان آن را به صورت تیر گیردار - هدایت‌شونده با بار متمرکز در یک سمت در نظر گرفت، با استفاده از میلگردهای رایج در صنعت ساختمان یک عضو غیر منشوری با مقطع متغیر، متناسب با نیروهای داخلی و به شکل ساعت شنی به‌عنوان بخش تسلیم شونده (فیوز) میراگر انتخاب گردید. نحوه اتصال این جزء به ورق‌های تکیه‌گاهی میراگر نقش مؤثری در رفتار کلی میراگر خواهد داشت.

طوری‌که در همین سیکل سختی مؤثر به میزان ۵۰ درصد کاهش یافته است.

میرایی معادل سیستم مورد اشاره، β_{eq} ، نیز از برابر قرار دادن انرژی جذب شده توسط میراگر در هر سیکل با انرژی جذب شده توسط فنری با سختی مؤثر، K_{eff} ، بدست می‌آید (شکل ۱۱).

$$\beta_{eff} = \frac{1}{2\pi} \times \frac{E_D}{S_{(OBE+ODF)}} \quad (۶)$$

که در آن E_D ، انرژی جذب شده توسط میراگر عبارتست از مساحت محصور به حلقه چرخه‌ای در هر سیکل بارگذاری و $S_{(OBE+ODF)}$ ، انرژی جذب شده توسط سیستم الاستیک با سختی مؤثر است. مقادیر میرایی معادل در برابر جایابی در شکل (۱۲) ترسیم شده است.



شکل ۱۱- مساحت‌های مورد استفاده در محاسبه میرایی معادل

نمودار فوق تغییرات افزایشی میرایی لزج معادل نمونه‌ها در طول بارگذاری را نشان می‌دهد. هر چند چنین تغییراتی در آزمایش‌های تحت بارگذاری چرخه‌ای دور از انتظار نیست؛ ولی می‌توان چنین استنباط نمود که نمونه جوش شده در مقایسه با نمونه مهره شده از میزان لزجت بالایی برخوردار بوده و آهنگ افزایش بیشتری را نیز داراست به طوری که با پیشروی سیکل‌های بارگذاری، میرایی لزج نمونه جوش شده افزایشی ۲۰۰ درصدی را تجربه نموده در حالی که همین تغییرات در نمونه مهره شده حدود ۱۰۰ درصد برآورد شده است. این نکته قابلیت نمونه ساعت شنی جوش شده در استهلاک انرژی قابل انتظار را بیشتر اثبات می‌نماید.

در حدود ۳ برابر برخوردار است. هرچند که روند کاهش سختی در طول آزمایش برای هر دو نمونه تقریباً یکسان بوده و هر دو نمونه دارای سختی برابری در گام آخر بارگذاری می باشند.

- نتایج ظرفیت جذب انرژی تجمعی نشان دهنده توان مطلوب جذب انرژی میراگر در هر دو روش اتصال جوشی و مهره‌ای باتوجه به وزن پایین مصالح مصرفی (میلگردها ساعت شنی) است.

منابع

- [۱] Whittaker, A., Bertero, V. V., Thompson, C. L. & Alonso, L. J., ۱۹۹۱. Seismic Testing of Steel Plate Energy Dissipation Devices. *Earthquake Spectra*, ۷(۴), pp. ۵۶۳-۶۰۴. DOI: ۱۰.۱۱۹۳/۱.۱۵۸۵۶۴۴
- [۲] Chen, Y., Yu, W., Zhang, M. & Li, Y., ۲۰۲۲. A novel energy dissipation damper for multi-level earthquakes. *Journal of Constructional Steel Research*, Volume ۱۹۲, p. ۱۰۷۲۱۴. DOI: ۱۰.۱۰۱۶/j.jcsr.۲۰۲۲.۱۰۷۲۱۴
- [۳] Li, Z., Shu, G. & Huan, Z., ۲۰۱۹. Development and cyclic testing of an innovative shear-bending combined metallic damper. *Journal of Constructional Steel Research*, Volume ۱۵۸, pp. ۲۸-۴۰. DOI: ۱۰.۱۰۱۶/j.jcsr.۲۰۱۹.۰۳,۰۰۸
- [۴] Houshmand-Sarvestani, A., Totonchi, A., Shahmohammadi, M. A. & Salehipour, H., ۲۰۲۳. 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*, ۵۱(۳), pp. ۱۶۲۶-۱۶۴۴. DOI: ۱۰.۱۰۸۰/۱۵۳۹۷۷۳۴,۲۰۲۱,۱۸۷۵۳۲۸
- [۵] Youssef, A. A., Esfahani, M. R. & Zareian, M. S., ۲۰۲۳. Experimental evaluation of post-tensioned hybrid coupled shear wall system with TADAS steel dampers at the beam-wall interface. *Structures*, Volume ۵۳, pp. ۱۲۸۳-۱۲۹۹. DOI: ۱۰.۱۰۱۶/j.istruc.۲۰۲۳.۰۴,۱۲۲

- در اتصال نوع (۱) که در آن به کمک مهره میلگردهای رزوه شده‌ی ساعت شنی به ورق‌های تکیه گاهی متصل شده اند به منظور تعیین اثر نحوه چینش مهره‌ها در اتصال و همچنین یافتن حالت بهینه، سه نمونه با تیپ مختلف آرایش مهره (A، B و C) پیشنهاد گردید و تحت بارگذاری مونوتونیک قرار گرفت. نتایج حاصل نشان دهنده تأثیر قابل ملاحظه چیدمان مهره‌ها در رفتار میراگر است به طوری که سختی اولیه و مقاومت نهایی نمونه A به ترتیب ۸۴ و ۴۳ درصد از نمونه B کمتر است. در مجموع تیپ A به علت ساختار ناپایدار خود علاوه بر پایین بودن سختی اولیه دچار افت مقاومت قابل توجه بوده و عملکرد مطلوبی نداشت. از بین تیپ‌های B و C نیز با توجه به تشابه رفتاری دو نمونه، تیپ B به علت سهولت نصب به عنوان الگوی بهینه جهت انجام بارگذاری چرخه ای انتخاب گردید

- در اتصال نوع (۲) میلگردهای ساعت شنی به طور مستقیم به صفحات تکیه گاهی جوش گردیده اند. این نمونه به همراه تیپ B که دارای الگوی بهینه اتصال به کمک مهره است، تحت بارگذاری چرخه ای قرار گرفت. بر اساس نتایج، نمودار چرخه ای نمونه تیپ B دارای باریک شدگی در فاز باربرداری است که باعث کاهش ظرفیت جذب انرژی آن به میزان قابل توجه ۹۰ درصدی نسبت به نمونه جوشی شده است. لذا اگر چه هر دو نمونه رفتار چرخه ای پایدار و بدون افت قابل ملاحظه مقاومت را از خود نشان داده اند اما نمونه جوشی به علت توانایی بالاتر در جذب و میرا نمودن انرژی از برتری برخوردار است.

- میرایی لزوج معادل نمونه‌ها با افزایش تعداد سیکل‌های بارگذاری حالت صعودی (با آهنگ ثابت) داشته است. در نمونه تیپ جوش شده میزان افزایش میرایی لزوج معادل در مقایسه با نمونه مهره‌ای تیپ B بیشتر و قابل ملاحظه‌تر بود به طوری که نمونه جوشی در سیکل آخر بارگذاری افزایش ۲۰۰ درصدی میرایی را تجربه نمود.

- نمونه جوشی باتوجه به ساختار صلب‌تر در مقایسه با نمونه تیپ B، از سختی الاستیک اولیه بالاتری

- [۱۴] Hedayat, A. A., ۲۰۱۵. Prediction of the force displacement capacity boundary of an unbuckled steel slit damper. *Journal of Constructional Steel Research*, Volume ۱۱۴, pp. ۳۰-۵۰. DOI: ۱۰.۱۰۱۶/j.jcsr.۲۰۱۵.۰۷.۰۰۳
- [۱۵] Aminzadeh, M., Kazemi, H. S. & Tavakkoli, S. M., ۲۰۲۰. A numerical study on optimum shape of steel slit dampers. *Advances in Structural Engineering*, Volume ۲۳, pp. ۲۹۶۷-۲۹۸۱. DOI: ۱۰.۱۱۷۷/۱۳۶۹۴۳۳۳۲.۰۹۳۷۳۸۱
- [۱۶] Aghlara, R. & Tahir, M., ۲۰۱۸. A passive metallic damper with replaceable steel bar components for earthquake protection of structures. *Engineering Structures*, Volume ۱۵۹, pp. ۱۸۵-۱۹۷. DOI: ۱۰.۱۰۱۶/j.engstruct.۲۰۱۷.۱۲.۰۴۹
- [۱۷] Ghaedi, K., Ibrahim, Z., Javanmardi, A. & Rupakhety, R., ۲۰۲۱. Experimental Study of a New Bar Damper Device for Vibration Control of Structures Subjected to Earthquake Loads. *Journal of Earthquake Engineering*, ۲۵(۲), pp. ۳۰۰-۳۱۸. DOI: ۱۰.۱۰۸۰/۱۳۶۳۳۴۶۹.۲۰۱۸.۱۵۱۵۷۹۶
- [۱۸] Zlatkov, D. et al., ۲۰۲۲. Experimental and Numerical Study of Energy Dissipation Components of a New Metallic Damper Device. *Journal of Vibration Engineering and Technologies*, Volume ۱۰, pp. ۱۸۰۹-۱۸۲۹. DOI: ۱۰.۱۰۰۷/s۴۳۴۱۷.۰۲۳.۰۰۴۸۵-۰
- [۱۹] Vasdravellis, G., Karavasilis, TL. and Uy, B., ۲۰۱۳. Large-scale experimental validation of steel post-tensioned connections with web hourglass pins. *Journal of Structural Engineering*, ۱۳۹(۶), pp. ۱۰۳۳-۱۰۴۲. DOI: ۱۰.۱۰۶۱/(ASCE)ST.۱۹۴۳-۵۴۱X.۰۰۰۰۶۹
- [۲۰] Garmeh, V., Akbarpour, A., Adibramezani, M., Kashani, A. and Adibi, M., ۲۰۲۱. Introducing and numerical study of an innovative rotational damper with replaceable hourglass steel pins. *Structures*, ۲۳, pp. ۲۰۱۹-۲۰۳۵. DOI: ۱۰.۱۰۱۶/j.istruc.۲۰۲۱.۰۵.۰۷۳
- [۲۱] Applied Technology Council, Mid-America Earthquake Center, Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research (US), Pacific Earthquake Engineering Research Center, ۲۰۰۸. *Seismic Design Manual for Steel Moment Resisting Frames*, Volume 1, pp. 1-100. DOI: 10.1061/(ASCE)1098-9101(2008)
- [۲] Mohammadi, R. K., Nasri, A. & Ghaffary, A., ۲۰۱۷. TADAS dampers in very large deformations. *International Journal of Steel Structures*, Volume ۱۷, pp. ۵۱۵-۵۲۴. DOI: ۱۰.۱۰۰۷/s۱۳۳۹۶-۰۱۷-۶۰۱۱-۷
- [۳] Tsai, K.-C., Chen, H.-W., Hong, C.-P. & Su, Y.-F., ۱۹۹۳. Design of steel triangular plate energy absorbers for seismic-resistant construction. *Earthquake Spectra*, ۹(۳), pp. ۵۰۵-۵۲۸. DOI: ۱۰.۱۱۹۳/۱.۱۵۸۵۷۳۷
- [۴] Garivani, S., Aghakouchak, A. & Shahbeyk, S., ۲۰۱۶. Numerical and experimental study of comb-teeth metallic yielding dampers. *International Journal of Steel Structures*, Volume ۱۶, pp. ۱۷۷-۱۹۶. DOI: ۱۰.۱۰۰۷/s۱۳۳۹۶-۰۱۶-۲۰۱۴-z
- [۵] Farsi, A., Amiri, H. R. & Dehghan Manshadi, S. H., ۲۰۲۱. An innovative C-shaped yielding metallic dampers for steel structures. *Structures*, ۲۴(December), pp. ۴۲۵۴-۴۲۶۸. DOI: ۱۰.۱۰۱۶/j.istruc.۲۰۲۱.۰۸.۰۶۹
- [۶] Avestaeifar, P. & Khezzzadeh, H., ۲۰۲۱. Experimental and numerical assessment of Piston Hybrid Frictional Metallic Damper (PHFMD). *Engineering Structures*, Volume ۲۴۳, p. ۱۱۲۶۶۹. DOI: ۱۰.۱۰۱۶/j.engstruct.۲۰۲۱.۱۱۲۶۶۹
- [۷] Jarrah, M., Khezzzadeh, H., Mofid, M. & Jafar, K., ۲۰۱۹. Experimental and numerical evaluation of piston metallic damper (PMD). *Journal of Constructional Steel Research*, Volume ۱۵۴, pp. ۹۹-۱۰۹. DOI: ۱۰.۱۰۱۶/j.jcsr.۲۰۱۸.۱۱.۰۲۴
- [۸] Heyrani Moghaddam, S. & Shooshtari, A., ۲۰۲۳. Numerical and experimental investigation on seismic performance of proposed steel slit dampers. *Journal of Constructional Steel Research*, Volume ۲۰۰, pp. ۱۰۷۶۴۶. DOI: ۱۰.۱۰۱۶/j.jcsr.۲۰۲۲.۱۰۷۶۴۶
- [۹] Chan, RW., Albermani, F., ۲۰۰۸. Experimental study of steel slit damper for passive energy dissipation. *Engineering Structures*, ۳۰(۴), pp. ۱۰۵۸-۱۰۶۶. DOI: ۱۰.۱۰۱۶/j.engstruct.۲۰۰۷.۰۷.۰۰۵

search Center and National Earthquake Hazards Reduction Program (US), ۲۰۰۷. Interim testing protocols for determining the seismic performance characteristics of structural and nonstructural components. Federal Emergency Management Agency.

پایه استانی نشانه