

## Experimental Investigation into Effect of Strip or Slit Geometric Pattern on Structural and Seismic Behavior of Steel Slit Yield Damper and Determining Optimal Pattern under Cyclic Loading

Kianoosh Nik-hoosh<sup>1</sup>, Mohammad Ali Kafi<sup>2\*</sup>

1- Ph.D. Student, Structural Engineering, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

2- Associate Professor, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

### ABSTRACT

By reviewing the literature on steel slit yield dampers (SSD), this study investigated and compared the effect of new strip shapes and geometric patterns on the behavior of this type of dampers. This study investigated a reference slit-less sample (solid) along with nine samples with a single row of blades or slits and three different shapes and geometric patterns, namely simple or constant cross-section, linearly tapered cross-section, and parabolic tapered cross-section with an elliptical slit at three different heights. These samples were subjected to cyclic loading in the laboratory. After determining force-displacement hysteresis curves, the important behavioral parameters of the investigated SSDs were calculated and compared. Effective stiffness, effective damping, force capacity, and displacement under cyclic loading were among the considered parameters in the current study. Results showed that dampers with simple blades and elliptical slits exhibited the poorest and best performances, respectively. Findings also indicated that the elliptical damper offered the highest effective stiffness, greatest energy absorption, and specifically the longest durability to cyclic loads. At displacements larger than 5 mm, the increase in effective stiffness of samples with an elliptical slit was roughly 1.6 times greater than that of samples with linearly tapered cross-sections. The equivalent viscous damping within the aforementioned displacement range at the optimal dimensions for a sample with an elliptical slit was roughly 1.1 times greater than that in a sample with linearly tapered cross-section.

### ARTICLE INFO

**Receive Date:** 01 July 2019

**Revise Date:** 19 August 2019

**Accept Date:** 18 September 2019

### Keywords:

Yield damper;  
Cyclic loading;  
Linearly tapered blade;  
Elliptical slit damper;  
Effective stiffness;  
Effective damping.

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/JSCE.2019.192250.1892

\*Corresponding author: Mohammad Ali Kafi  
Email address: mkafi@semnan.ac.ir

## مطالعه آزمایشگاهی تاثیر هندسه پره در میراگرهای تسلیمی شکافدار فولادی بر رفتار لرزه ای آنها و معرفی الگوی بهینه تحت بارگذاری چرخه ای

کیانوش نیک هوش<sup>۱</sup>، محمدعلی کافی<sup>۲\*</sup>

۱- دانشجوی دکتری مهندسی سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

### چکیده

میراگرهای تسلیمی بدلیل قیمت مناسب، جذب انرژی بالا و قابلیت تعویض پذیری آنها پس از تجربه نیروی جانبی از جمله زلزله، از اجزای پرکاربرد سازه های مقاوم در برابر زلزله محسوب میشوند. در این مقاله پس از مطالعه و مرور نتایج کارهای گذشته در خصوص میراگرهای تسلیمی فولادی شکاف دار سعی شده است اثر شکل و الگوی هندسی جدید پره ها، بخصوص نمونه های با شکاف بیضوی، بر روی رفتار این نوع میراگرها مورد بررسی و مقایسه قرار گیرد. در این بررسی یک نمونه مرجع بدون شکاف (تو پر) به همراه ۹ نمونه با یک ردیف پره یا شکاف، با سه الگوی هندسی و شکل مختلف پره مشتمل بر حالت ساده یا مقطع ثابت، باریک شونده خطی و باریک شونده غیرخطی با شکاف بیضوی در سه ارتفاع متفاوت مورد مطالعه آزمایشگاهی قرار گرفتند. به منظور حذف اثر ضخامت پره ها در رفتار نمونه ها، ضخامت آنها ثابت و برابر ۸ میلی متر انتخاب و جنس فولاد مورد استفاده در کلیه نمونه ها، از نوع St-37 در نظر گرفته شد. نمونه های ذکر شده در آزمایشگاه تحت بارگذاری چرخه ای قرار گرفته و با مشخص شدن منحنی های هیستریزس نیرو- تغییر مکان، پارامترهای تعیین کننده رفتاری میراگرهای مذکور در این مطالعه محاسبه و مورد مقایسه و مطالعه قرار گرفت. سختی موثر، میرایی موثر، ظرفیت نیرویی و تغییر مکان تحت بارگذاری چرخه ای از جمله پارامترهایی بود که در این تحقیق مورد توجه قرار گرفت. نتایج مطالعه نشان داد که بطور کلی میراگر با پره های ساده دارای ضعیف ترین عملکرد و میراگر با شکاف بیضوی دارای بهترین عملکرد می باشد. نتایج حاصله بیانگر آن است که میراگر بیضوی بالاترین سختی موثر، بیشترین جذب انرژی و بویژه بالاترین دوام تحت اثر بارهای چرخه ای را از خود نشان می دهد. میزان افزایش سختی موثر در نمونه های با شکاف بیضوی برای تغییر مکانهای بزرگتر از ۵ میلی متر در حدود ۱/۶ برابر بیشتر از نمونه های با مقطع باریک شونده خطی یکنواخت مشاهده گردید. مقدار میرایی ویسکوز معادل در محدوده تغییر مکان ذکر شده در نسبت ابعادی بهینه آن برای نمونه با شکاف بیضوی در حدود ۱/۱ برابر نسبت به مقطع باریک شونده خطی مشاهده شد.

کلمات کلیدی: میراگر تسلیمی، بارگذاری چرخه ای، پره باریک شونده خطی، میراگرشیاری با شکاف بیضی، سختی موثر، میرایی موثر

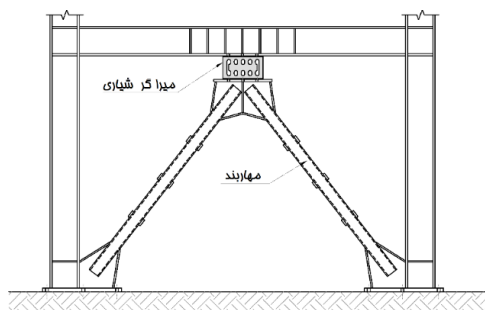
شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	10.22065/JSCE.2019.192250.1892	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2019.192250.1892	۱۴۰۰/۰۵/۳۰	۱۳۹۸/۰۶/۲۷	۱۳۹۸/۰۶/۲۷	۱۳۹۸/۰۵/۲۸	۱۳۹۸/۰۴/۱۰
			محمدعلی کافی mkafi@semnan.ac.ir		نویسنده مسئول* پست الکترونیکی:	

## ۱- مقدمه

در دهه‌های اخیر استفاده از سیستم‌های اتلاف انرژی در سازه‌های ساختمانی به سرعت افزایش یافته است. این سیستم‌ها را به طور کلی می‌توان به دسته‌های سیستم‌های فعال، غیر فعال، نیمه فعال و ترکیبی تقسیم بندی نمود. در میان سیستم‌های ذکر شده میراگر غیرفعال نیازی به استفاده از یک منبع انرژی خارجی ندارد. برخلاف روش‌های متداول طراحی سازه‌های مقاوم در برابر زلزله که در آنها عمده انرژی ورودی زلزله با تسلیم شدن نقاط خاصی از سازه (به طور معمول نقاط انتهایی تیرها و ستونها در سیستم قاب خمشی) در سیستم‌های کنترل غیر فعال عمده این انرژی در ادوات خاصی که به نام میراگرهای لرزه‌ای شناخته میشوند جذب میگردد. مزایای استفاده از چنین سیستمی شامل: (۱) جذب تغییر شکل‌های غیر ارتجاعی در میراگرها و کاهش شدید خسارت در سازه اصلی؛ (۲) کاهش تغییر مکان‌های جانبی سازه که به نوبه خود باعث کاهش خسارت اجزای غیرسازه‌ای میگردد و (۳) سهولت بازرسی، تعمیر و یا تعویض این ادوات بدون نیاز به تخلیه ساکنین ساختمان قابل ذکر می‌باشد [۱]. در زمینه سیستم‌های کنترل غیرفعال، تاکنون انواع مختلفی از میراگرهای تسلیمی فولادی توسط محققان مختلف پیشنهاد گردیده است. از جمله این میراگرها می‌توان به میراگر ADAS [۲]، TADAS [۳]، میراگر دبل ضربردی شکل [۴] و میراگر آکاردئونی [۵] اشاره نمود. از زمان معرفی میراگرهای تسلیمی تحقیقات و تلاشهای زیادی در جهت بهبود رفتار آنها انجام شده است. معرفی یک نوع میراگر ضد کمانش را می‌توان نمونه‌ای از این تلاشها در راستای هدف ذکر شده نام برد [۶]. از مطالعات دیگر در این زمینه استفاده از نوارهای پیش خمیده فولادی به عنوان میراگر است [۷]. این میراگرها در اتصالات نیز استفاده شده که معرفی یک نوع اتصال نیمه گیردار با استفاده از میراگر شکافدار تسلیمی و بررسی رفتار لرزه‌ای آن نمونه دیگری از تحقیقات انجام شده در این زمینه می‌باشد [۸]. نمونه دیگری از این دست اتصال قفسه‌ای فولادی<sup>۱</sup> است [۹]. با توجه به عملکرد مناسب میراگرهای تسلیمی فولادی برخی از محققان نحوه متصل نمودن المانهای فولادی با استفاده از اتصالات مختلف (برش گیرهای ناودانی و نبشی) به سازه‌های بتن مسلح تحت بارهای چرخه‌ای را مورد مطالعه قرار داده اند [۱۰]. در تحقیق دیگری مطالعه بر روی بهینه سازی شکل میراگر برشی و ارائه یک شکل بهینه برای یک پانل برشی تسلیم شونده و مطالعه رفتار آن مورد توجه قرار گرفته است [۱۱] و اثر استفاده از فولاد با مقاومت تسلیم پایین در رفتار میراگر تسلیمی برشی نیز توسط برخی دیگر از محققان مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته است [۱۳].

میراگر مورد مطالعه در این مقاله از نوع میراگر فولادی شکافدار (SSD<sup>۲</sup>) می‌باشد. نمونه‌ای از نحوه بکارگیری این نوع میراگر در یک مهاربند شورون در شکل ۱ نشان داده شده است.

این نوع میراگر ابتدا در سال ۲۰۰۸ معرفی گردید؛ در مقاله مربوطه اثر شکاف‌های ایجاد شده در سه آرایش مختلف مورد بررسی قرار گرفت [۱۴]. در مطالعه‌ای که در سال ۲۰۱۵ بر روی این میراگرها انجام شد، نشان داده شد که در صورتی که لبه شکاف‌های ایجاد شده به صورت محدب باشد مانع از وقوع خستگی کم‌چرخه<sup>۳</sup> شده و در بارگذاری چرخه‌ای رفتار با ثبات‌تری را نشان می‌دهد [۱۵]. در مطالعه دیگری اثر شکاف با ارتفاع‌های متغیر مورد بررسی قرار گرفت و نشان داده شد که اگر پره‌های میانی لاغرتر و پره‌های کناری ضخیم تر باشند انرژی تلف شده در بارگذاری چرخه‌ای مقداری افزایش می‌یابد [۱۶].



شکل ۱: کاربرد میراگر تسلیمی در یک مهاربند شورون

1 Steel Pallet rack  
2. Steel Slit Damper  
3. Low Cycle Fatigue

در تحقیق دیگری اثر شکاف با شکل‌های مختلف (پره‌ها یا نوارها با مقطع متغیر) مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این تحقیق بیانگر آن بود که پره با شکل‌های دمبلی و باریک شونده‌ی تدریجی دارای عملکرد بهتری در زلزله می‌باشد [۱۷]. تحقیق دیگری که در سال ۲۰۱۸ بر روی این نوع میراگرها صورت گرفته که شامل میراگرهایی است که پره‌های آن دارای مقطع متغیر با ضخامت زیاد (ضخامت ثابت) می‌باشد. این میراگرها به دلیل ضخامت زیاد نوارها، نسبت به کمانش مقاوم می‌باشند. در تحقیق مذکور نسبت ابعادی بهینه برای پره‌های میراگر مورد مطالعه قرار گرفته است [۱۸].

با توجه به مطالعات انجام شده قبلی، در تحقیق پیش رو سعی بر آن است که اثر شکل پره، بخصوص نمونه‌های با شکاف بیضوی را بر روی رفتار و عملکرد میراگرهای تسلیمی مورد مطالعه و بررسی قرار داده و با تعیین شکل بهینه (از بین نمونه‌های مورد مطالعه) نسبت ابعادی مطلوب را نیز برای آن تعیین و ارائه شود، همچنین برای اولین بار این میراگرها در قاب مهار بندی مورد آزمایش قرار گرفته و لذا سعی شده است رفتار میراگر در وضعیت و شبیه سازی واقعی تری نسبت به مطالعات پیشین مورد بررسی قرار گیرد.

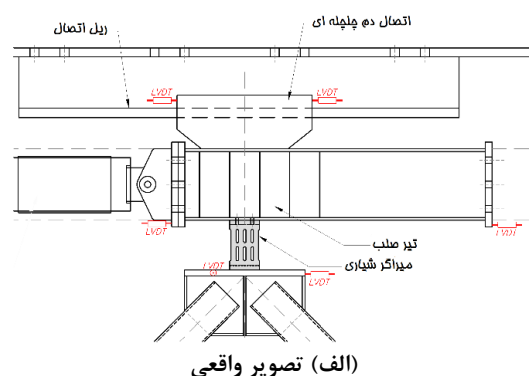
## ۲- مطالعه آزمایشگاهی

در این بخش مشخصات نمونه‌ها، مصالح، چیدمان آزمایش و سایر جزئیات مطالعه آزمایشگاهی ارائه گردیده است. آزمایش انجام شده در محل آزمایشگاه سازه دانشکده مهندسی عمران دانشگاه سمنان صورت گرفته و از امکانات و تجهیزات آن آزمایشگاه بهره گرفته شده است. LVDTهای<sup>۴</sup> مورد استفاده در این آزمایش از دو نوع ۲۵ میلی‌متری و ۵۰ میلی‌متر بوده است. محل قرارگیری LVDTها برای بررسی رفتار نمونه در جهات مختلف و همچنین بررسی رفتار خارج از صفحه‌ای نمونه در نظر گرفته شده است. در

شکل ۲ محل قرارگیری LVDTها به صورت واقعی و شماتیک، نشان داده شده است.



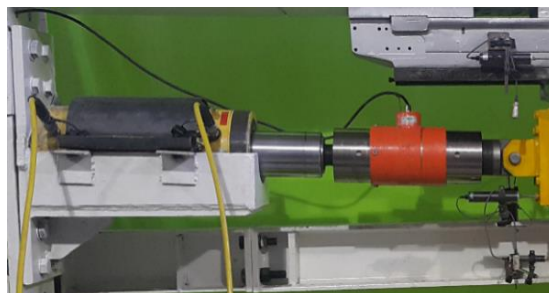
(ب) تصویر شماتیک



(الف) تصویر واقعی

شکل ۲: محل قرارگیری LVDTها

در سامانه و فرآیند آزمایش‌های سازه‌ای، یک جک ۱۰۰ تنی رفت و برگشتی متصل به نیوتن متر نیز وظیفه اعمال نیرو به قسمت فوقانی نمونه که معادل تیر سقف صلب قاب مهار بندی است را عهده‌دار می‌باشد. در شکل ۳ جک مورد استفاده برای آزمایش، نشان داده شده است.

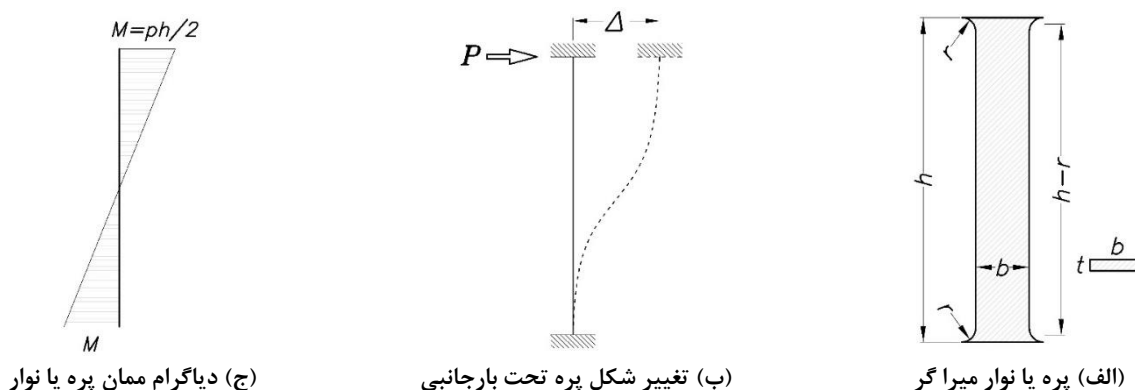


<sup>۴</sup> Linear Variable Displacement Transformer

شکل ۳: جک و بار سنج سامانه آزمایش

## ۲-۱- انتخاب شکل پره ها

در شکل ۴ رفتار یک عدد پره بصورت معادل با یک تیر دو سرگیردار نشان داده شده است. این رفتار ساده شده زمانی که سختی پره نسبت به سختی نواحی تکیه گاهی آن به میزان قابل توجهی کمتر باشد می تواند باعث ساده شدن روابط تحلیلی گردد. برای استفاده از این نوع میراگرها در طراحی سازه ها داشتن مقاومت، سختی و تغییرمکان تسلیم آنها ضروری است. در مطالعات پیشین روابطی برای محاسبه پارامترهای ذکر شده در حالت پره های با مقطع ثابت و باریک شونده خطی ارائه شده است [۱۸ و ۱۹] و اصول محاسبه پارامترهای ذکر شده از روش های تحلیلی، فرض نمودن آنها بصورت یک تیر دوسرگیردار است و برای شکل های هندسی پیچیده تر مفروض برای پره، می توان از روش اجزای محدود نیز استفاده نمود.



(ج) دیاگرام ممان پره یا نوار

(ب) تغییر شکل پره تحت بار جانبی

(الف) پره یا نوار میراگر

شکل ۴: پره معادل شده با یک تیر دوسرگیردار

برای رسیدن به یک شکل بهینه برای پره بایستی کلیه مقاطع پره در طول آن تحت نیروی جانبی  $P$  بطور همزمان تسلیم گردند. با توجه به افزایش ممان از محل تکیه گاه به سمت مرکز پره برای اینکه تسلیم مقاطع بطور همزمان اتفاق بیفتد واضح است که با حرکت به سمت مرکز پره ابعاد مقطع بایستی کاهش یابد. نظر به اینکه افزایش ممان از محل تکیه گاه به سمت مرکز پره بصورت خطی می باشد برای اینکه کلیه مقاطع پره تحت نیروی جانبی مذکور تحت اثر خمش بطور همزمان تسلیم گردند می توان نشان داد که در صورت ثابت بودن ضخامت مقطع  $t$  این شکل بهینه یک سهمی می باشد [۱۸]. پیروی از یک شکل سهمی باعث می گردد که شروع تسلیم تنها در لبه پره ها اتفاق بیفتد. بعلاوه با پیروی از این شکل ابعاد مقطع در مرکز پره به صفر میرسد که با توجه به وجود برش و هم به لحاظ کاربردی امکان پذیر نمیباشد.

نتیجه اینکه با توجه به وجود برش در طول پره و دخیل بودن تنش های ناشی از آن و سایر مسائل از جمله مسئله مهم خستگی کم چرخه، باعث میشود که انتخاب شکل بهینه برای پره دشوار گردد. در این تحقیق برای مطالعه اثر شکل پره بر روی رفتار میراگر، سه نوع شکل برای پره در نظر گرفته شده و پس از انجام مطالعه آزمایشگاهی و عددی نتایج بدست آمده مورد تحلیل، بررسی و مقایسه قرار گرفته اند. شکل های در نظر گرفته شده در این تحقیق شامل حالت ساده (پره با مقطع یکنواخت)، باریک شونده خطی و باریک شونده غیرخطی (با ایجاد شکاف بیضی شکل) فرض شد و مورد بررسی و مطالعه قرار گرفت.

## ۲-۲- مشخصات نمونه ها

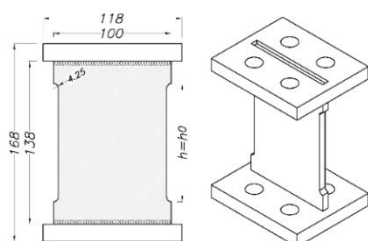
میراگرهای آزمایشگاهی مورد مطالعه جمعاً برابر ۱۰ نمونه می باشند. نمونه های ذکر شده شامل یک نمونه توپر به عنوان نمونه مرجع و سه دسته دیگر، هر کدام شامل سه نمونه با چهار پره با یک شکل معین می باشد که با ایجاد شکاف از نمونه مرجع حاصل شده اند. در هر دسته تنها ارتفاع پره ها متغیر بوده و خواص هندسی اصلی آنها به شرح زیر در نظر گرفته شده اند:

۱) دسته اول شامل سه نمونه شکاف دار با پره ساده (مقطع یکنواخت) است که عرض پره در همگی آنها ثابت ولی ارتفاع آنها متغیر و برابر ۸۰، ۹۰ و ۱۰۰ میلیمتر می باشد.

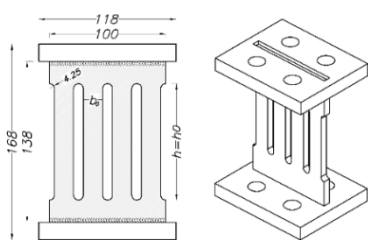
۲) دسته دوم شامل سه نمونه میراگر دارای پره با مقطع متغیر خطی (باریک شونده خطی) است که عرض قسمت باریک و قسمت پهن در همه آنها ثابت اما ارتفاع آنها متغیر (برابر ۸۰، ۹۰ و ۱۰۰ میلیمتر) می باشد.

۳) دسته سوم نیز شامل سه نمونه دارای پره با مقطع متغیر غیر خطی (منحنی بیضی شکل) است که عرض قسمت باریک و پهن در همه آنها ثابت بوده و ارتفاع آنها به عنوان متغیر (همان ۸۰، ۹۰ و ۱۰۰ میلیمتر) در نظر گرفته شده است.

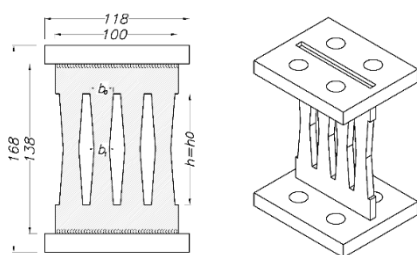
ضخامت پره‌ها در کلیه نمونه‌ها ثابت و برابر ۸ میلیمتر بوده و به این ترتیب متغیر اصلی در هر دسته ارتفاع پره‌ها می باشد. با توجه به ثابت بودن عرض قسمت باریک و پهن پره‌ها در هر دسته از نمونه‌ها، نسبت بدون بعد ارتفاع به عرض بیشتر پره (قسمت پهن)، متغیر اصلی در مطالعه پارامتریک و ارائه نتایج این تحقیق محسوب می گردد. در شکل ۵ عکس واقعی نمونه‌ها در کنار نمایه ترسیمی و اندازه گذاری شده با نامگذاری نمونه‌ها و پارامترهای تعیین کننده هندسی مربوط به هر نمونه نشان داده شده است.



DFF

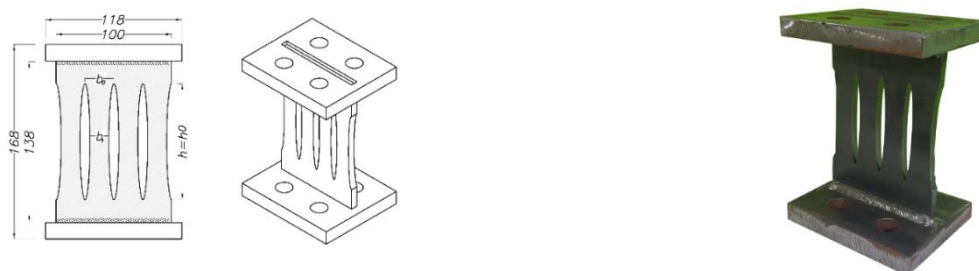


SDSH



SDPH





## SDEH

شکل ۵: نمونه واقعی و مشخصات هندسی و پارامترهای تعیین کننده نمونه‌های آزمایشگاهی (کلیه اندازه‌ها به میلی متر)

شکل های ارائه شده گویای آن است که رفتار مورد انتظار چه در حوزه الاستیک و یا پلاستیک از این میرا گرها در امتداد صفحه جان آنها میباشد؛ لذا برای جلوگیری از رفتار و کماتش خارج از صفحه، در نظر گرفتن یک ضخامت حداقل برای تیغه میانی (جان میرا گر) ضروری میباشد که شرح کامل تری در این خصوص و در بخش ۴ ارائه شده است.

در جدول ۱ نیز مقادیر عددی پارامترهای مذکور و سایر مشخصات نمونه‌های ذکر شده ارائه شده است.

جدول ۱: مشخصات هندسی نمونه‌های آزمایشگاهی (کلیه ابعاد به میلی متر)

دسته بندی	نمونه	t	b <sub>0</sub>	b <sub>1</sub>	h	b <sub>1</sub> /b <sub>0</sub>	h/b <sub>0</sub>
نمونه مرجع	DFP	8	91.5	91.5	100	1	1.09
دسته اول (پره با مقطع ثابت)	SDSH1	8	16.5	16.5	80	1	4.85
	SDSH2	8	16.5	16.5	90	1	5.45
	SDSH3	8	16.5	16.5	100	1	6.06
دسته دوم (پره با مقطع باریک‌شونده خطی)	SDPH1	8	19	12.5	80	0.66	4.21
	SDPH2	8	19	12.5	90	0.66	4.74
	SDPH3	8	19	12.5	100	0.66	5.26
دسته سوم (شکاف بیضی شکل)	SDEH1	8	25	16.5	80	0.66	3.20
	SDEH2	8	25	16.5	90	0.66	3.60
	SDEH3	8	25	16.5	100	0.66	4.00

## ۲-۳- مشخصات مصالح

مشخصات مصالح فولادی مورد استفاده از انجام آزمایش کشش استاندارد یک نمونه منشوری با مقطع مستطیل به ابعاد ۲/۷ در ۶ میلی متر به دست آمد. مشخصات مصالح حاصل از آزمایش مذکور در جدول ۲ ارائه شده است.

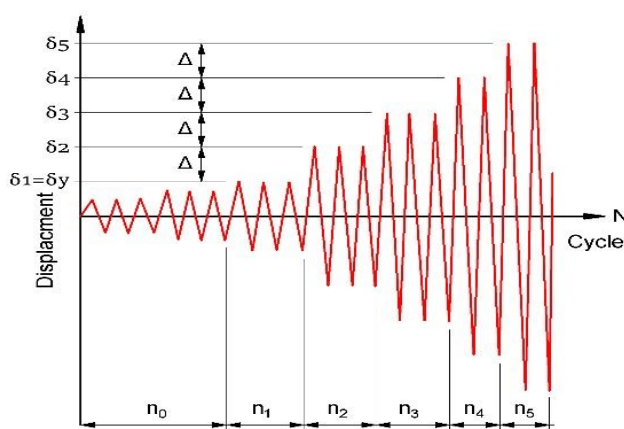
جدول ۲: مشخصات مصالح فولاد مورد استفاده (واحدها نیوتن و میلی متر)

نمونه	تنش تسلیم	تنش نهایی	کرنش حداکثر
S <sub>t</sub> 37	۲۵۰	۴۳۴	۰/۴

## ۲-۴- برنامه و چیدمان آزمایش

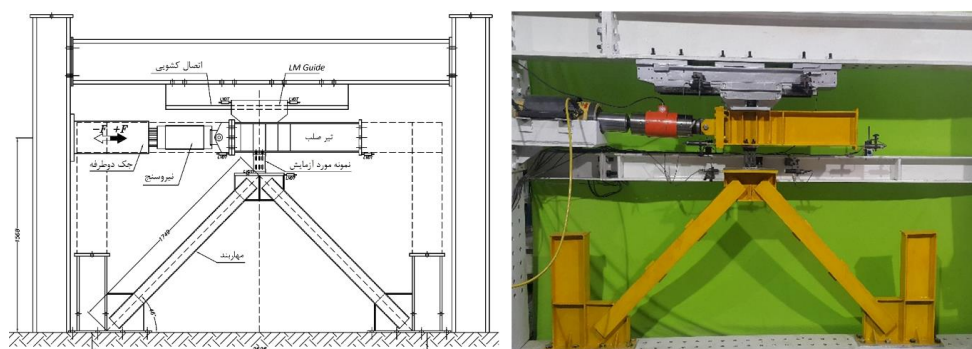
نمونه‌های آزمایشگاهی شرح داده شده طی برنامه در نظر گرفته شده تحت بارگذاری استاتیکی چرخه‌ای قرار گرفتند. برای اعمال بار چرخه‌ای مذکور از تاریخچه بارگذاری افزایشی بر مبنای پروتکل ATC-24 [۲۰] (شکل ۶) استفاده شده است. براساس این پروتکل روند بارگذاری و جابه‌جایی بدین صورت می‌باشد، در هر سیکل سه رفت و برگشت در نظر گرفته شده که به ترتیب جابه‌جایی در هر سیکل بر

حسب میلی متر عبارت است از ۰/۵، ۱، ۱/۵، ۲/۵، ۵، ۷/۵، ۱۰، ۱۲/۵، ۱۵، ۲۰ و در برخی نمونه‌ها تا جابه‌جایی ۲۲/۵ بارگذاری ادامه داشته است. بارگذاری نمونه‌ها تا مرحله انهدام کامل پیش رفته است.



شکل ۶: تاریخچه بارگذاری چرخه‌ای افزایشی (ATC-24)

طراحی و محل نصب ادوات اندازه‌گیری مربوط به سیستم چیدمان<sup>۵</sup> آزمایش در شکل ۷ نشان داده شده است.



شکل ۷: طراحی سیستم سامانه آزمایش برای بارگذاری چرخه‌ای

استفاده از سیستم و اتصال LM-Guide (دم چلچله‌ای) بخشی از یک دستگاه تراشکاری می‌باشد که به منظور شبیه‌سازی سقف صلب و تامین و تضمین آزادی حرکت تنها در جهت افقی، برای این سامانه آزمایش مورد استفاده قرار گرفته است. برای طراحی سیستم سامانه آزمایش پس از محاسبه حداکثر ظرفیت باربری نمونه‌ها، نمونه بر روی یک مهاربندی با پیکربندی شورون نصب گردید. مقطع مهاربندها به نحوی محاسبه و انتخاب گردید که ظرفیت الاستیک و ظرفیت کمانشی آن به میزان قابل توجهی از ظرفیت پلاستیک نمونه تحت آزمایش بیشتر باشد. اتصال فوقانی میراگر از نوع ریلی و متصل به یک نیوتن‌متر<sup>۶</sup> می‌باشد.

یکی از شاخصه‌های بارز و نوین این مطالعه، آزمایش میراگر در داخل قاب است. لذا با تشریح سامانه آزمایش، بویژه LM-Guide و شبیه‌سازی سقف صلب و همچنین با فرض مفصلی بودن اتصال تیر و ستون، سامانه طراحی شده را می‌توان معادل رفتار قاب ساده دارای مهاربند در نظر گرفت.

### ۳- تحلیل نتایج مطالعه آزمایشگاهی

در این بخش پس از ارائه خروجی حاصل از مطالعه آزمایشگاهی به بررسی، مقایسه و تحلیل نتایج بدست آمده پرداخته شده است. خروجی‌های مورد بحث شامل رفتار چرخه‌ای، سختی موثر، انرژی تلف شده، میرایی ویسکوز معادل و کمانش جانبی می‌باشد.

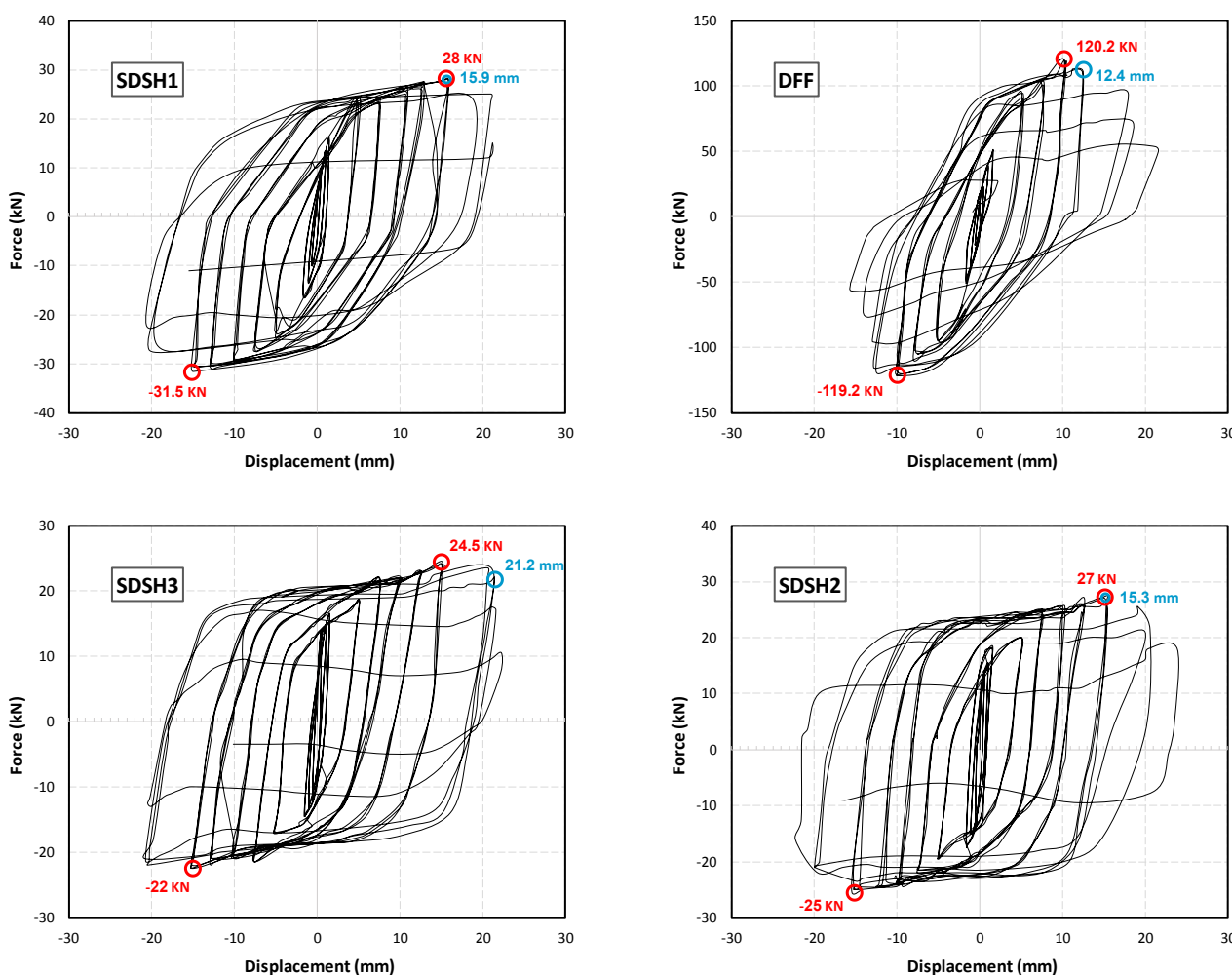
<sup>۵</sup> Setup  
<sup>۶</sup> Load Cell



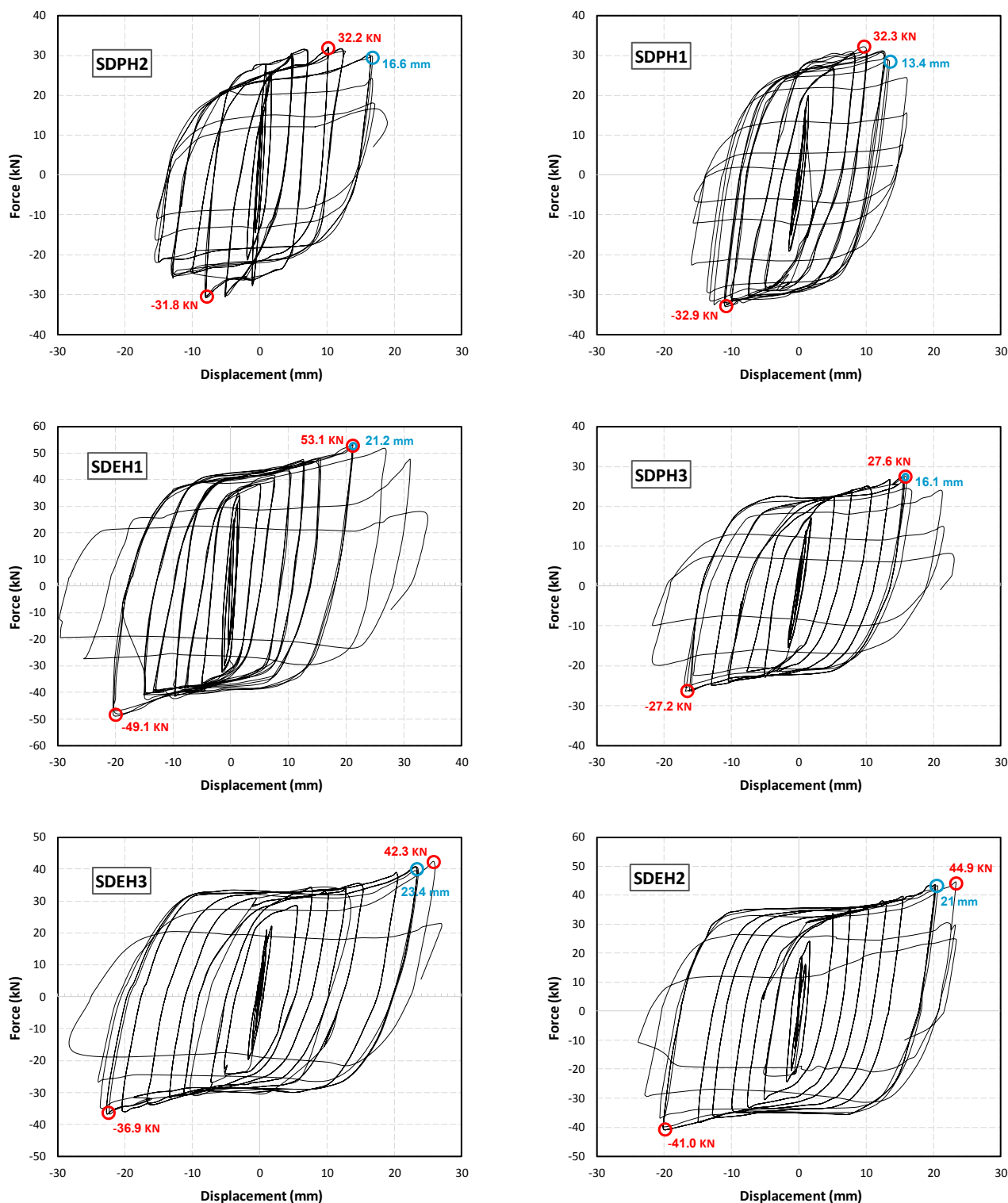
## ۳-۱- رفتار چرخه‌ای نمونه‌ها

آزمایش نمونه‌های مورد مطالعه با بارگذاری استاتیکی چرخه‌ای طبق الگوی بارگذاری ارائه شده در شکل ۶ انجام و تغییرات نیرو-تغییرمکان آنها ثبت گردید. نمودار چرخه‌ای حاصل از این آزمایش‌ها تحت بارگذاری ذکر شده برای کلیه نمونه‌ها در شکل ۸ ارائه شده است. در شکل ۸ همچنین مقادیر نیروی حداکثر و تغییرمکان حداکثر که بیانگر ظرفیت نیرو و تغییرمکان هر نمونه می‌باشد درج گردیده است. مقادیر تغییرمکان حداکثر با فرض این قید که نمونه سه سیکل متوالی با دامنه ثابت را بدون زوال مقاومت محسوسی طی نموده باشد بدست آمده است. معیار ذکر شده با عکسهایی که در لحظه وقوع ترک یا پارگی گرفته شده اند با تغییرمکان های مورد نظر انطباق قابل قبولی دارد. لازم به ذکر است که دوره تناوب عکس برداری صورت گرفته در مطالعه آزمایشگاهی در پایان هر سه سیکل بارگذاری بوده است.

بررسی روند تغییرات ظرفیت تغییرمکان نمونه‌ها اگر چه بیانگر روند کاملاً منظمی نمی‌باشد، اما نشان می‌دهد که افزایش ارتفاع پره‌ها یا بعبارت دیگر افزایش نسبت  $h/b_0$ ، عموماً باعث افزایش ظرفیت تغییرمکانی آنها شده است. شایان ذکر است که کاهش نسبت  $h/b_0$  باعث سوق دادن رفتار پره‌ها از حالت خمشی به رفتار برشی می‌گردد.



شکل ۸: رفتار چرخه‌ای نیرو-تغییرمکان نمونه‌ها

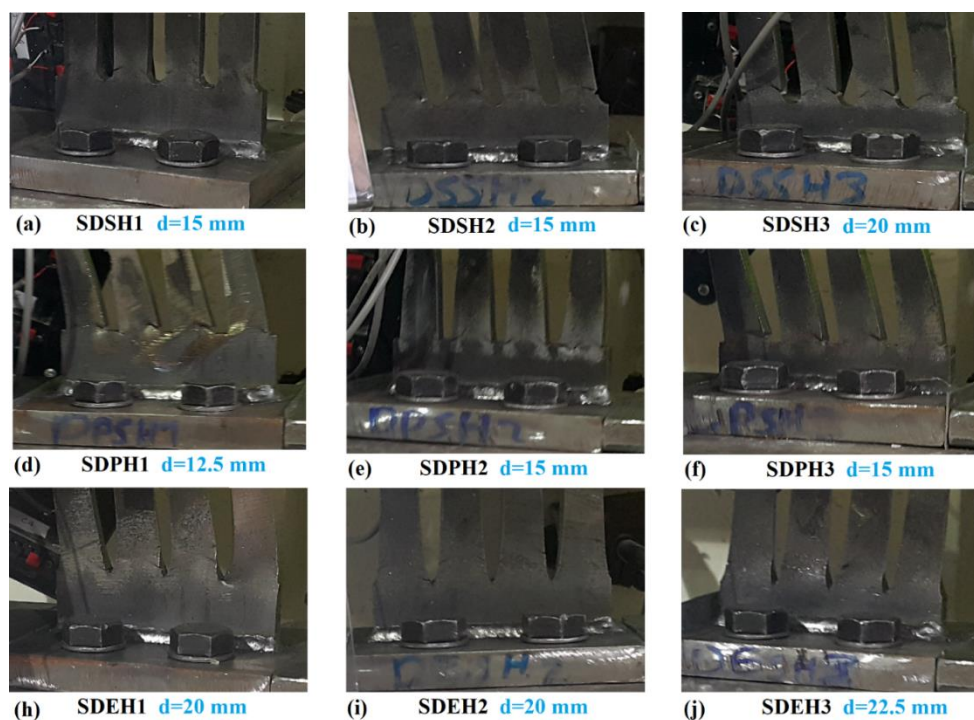


شکل ۸ (ادامه): رفتار چرخه‌ای نیرو-تغییر مکان نمونه‌ها

مقایسه اثر شکل پره‌ها از طرف دیگر حاکی از آن است که نمونه‌های با شکاف بیضی شکل، ظرفیت تغییر مکانی آنها به نحو قابل ملاحظه‌ای بیشتر از میراگرها با پره‌های مقطع ثابت و باریک شونده خطی می‌باشد. انتظاری که قبل از انجام آزمایش، از نمونه‌های با مقطع باریک شونده خطی میرفت آن بود که این نمونه‌ها ظرفیت تغییر مکانی بالاتری را نسبت به نمونه‌های با مقطع یکنواخت از خود نشان

بدهند. زیرا با توجه قرار داشتن ممان حداکثر در دو انتهای هر پره و از سوی دیگر ثابت بودن ابعاد مقطع انتظار میرود که تسلیم تنها در دو انتهای پره این نمونه ها رخ داده و در نتیجه با متمرکز شدن خسارت در این محدوده تحت بارگذاری چرخه ای دوام کمتری را نسبت به نمونه های با مقطع باریک شونده خطی از خود نشان بدهند. بررسی عکسهای حاصل از انجام مطالعات آزمایشگاهی بر روی این نمونه ها (مقطع باریک شونده خطی) حاکی از آن است که اولین ترکهای ایجاد شده از محل گوشه پایین یا بالای هر پره شروع شده است. با توجه به تیز بودن این گوشه ها و عدم در نظر گرفتن گوشه گرد<sup>۷</sup> در هنگام طراحی یا ساخت این نمونه ها، وقوع ترکهای زودرس و پایین بودن ظرفیت تغییرمکانی آنها در بارگذاری چرخه ای را میتوان ناشی از پدیده خستگی کم چرخه در آنها دانست. این نتیجه بیانگر اهمیت زیاد این پدیده در طراحی میراگرهای تسلیم شونده تحت بارگذاری چرخه ای می باشد.

در شکل ۹ تغییر شکل نمونه ها در موقعیت حداکثر تغییر مکان قابل تحمل (ظرفیت تغییر مکان) توسط آنها ارائه شده است. بررسی عکسهای بدست آمده از این نمونه نشان میدهد که در نمونه های با مقطع یکنواخت وقوع ترکها در هر سه نمونه درست بلافاصله پس از انحنا (فیلت) دو انتهای هر پره رخ داده است. خوشبختانه با توجه به سطح اولیه صاف و نسبتا صیقلی نمونه ها (به غیر از نمونه SDPH1) ناحیه تسلیم شده پس از اعمال بارگذاری بعلت تغییر رنگ و تا اندازه ای پوسته پوسته شدن سطح آنها تا حد خوبی قابل تشخیص است. بررسی عکسها از این جهت نشان میدهد که تسلیم در نمونه های با مقطع یکنواخت تنها در یک ناحیه محدود در دو قسمت انتهایی هر پره متمرکز شده و این موضوع همراه با تکرار بارگذاری و کرنش های تجمعی بوجود آمده در یک ناحیه محدود را میتوان از دلایل اصلی ضعف این نمونه ها دانست. بررسی عکسهای مشابه مربوطه به نمونه های با مقطع باریک شونده خطی نشان میدهد که تسلیم در این نمونه ها در طول بزرگتری از انتهای پره رخ داده است. علیرغم وقوع تسلیم در ناحیه بزرگتر به علت وجود گوشه های تیز و تسلیم موضعی در این نواحی، این نمونه ها نیز دچار پدیده خستگی کم چرخه شده و با وقوع ترکهای زودرس در این قسمتها ظرفیت تغییر مکانی آنها بطور کلی کمتر از نمونه ها با پره های مقطع یکنواخت بوده است. بررسی عکسهای بدست آمده مربوط به نمونه های با شکاف بیضی نشان میدهد که علاوه بر بزرگتر بودن طول ناحیه تسلیم شده نسبت به مقطع باریک شونده خطی، تسلیم به قسمت میانی مقطع (جان مقطع) نیز گسترش یافته است.



شکل ۹: وضعیت تغییر شکل نمونه ها در موقعیت ظرفیت تغییر مکانی آنها

<sup>7</sup> Fillet

## ۲-۳- سختی موثر

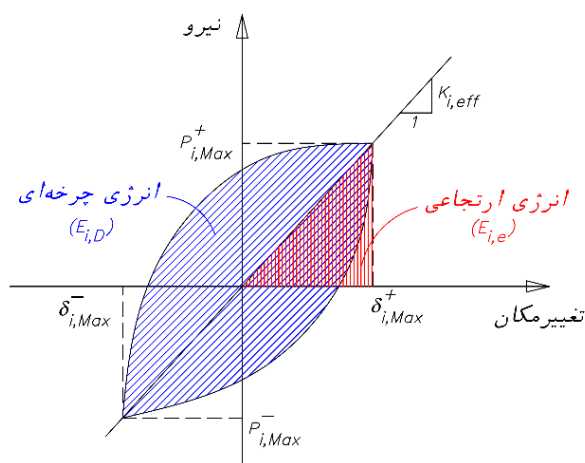
با استفاده از سختی موثر می‌توان انرژی ارتجاعی میراگر در هر چرخه را محاسبه نمود، این انرژی تمایل دارد که میراگر را به وضعیت اولیه آن بازگرداند؛ واضح است که با وارد شدن میراگر به فاز خمیری این انرژی برای برگرداندن میراگر به وضعیت اولیه کافی نبوده و عمده این انرژی از طریق نیروی خارجی اعمال شده تامین می‌گردد.

در شکل ۱۰ انرژی ارتجاعی و انرژی چرخه‌ای تلف شده در یک چرخه ارائه شده است. از رابطه (۱) می‌توان برای محاسبه سختی موثر ( $k_{i,eff}$ ) استفاده نمود:

$$k_{i,eff} = \frac{\left( |P_{i,max}^+| + |P_{i,max}^-| \right)}{\left( |\delta_{i,max}^+| + |\delta_{i,max}^-| \right)} \quad (1)$$

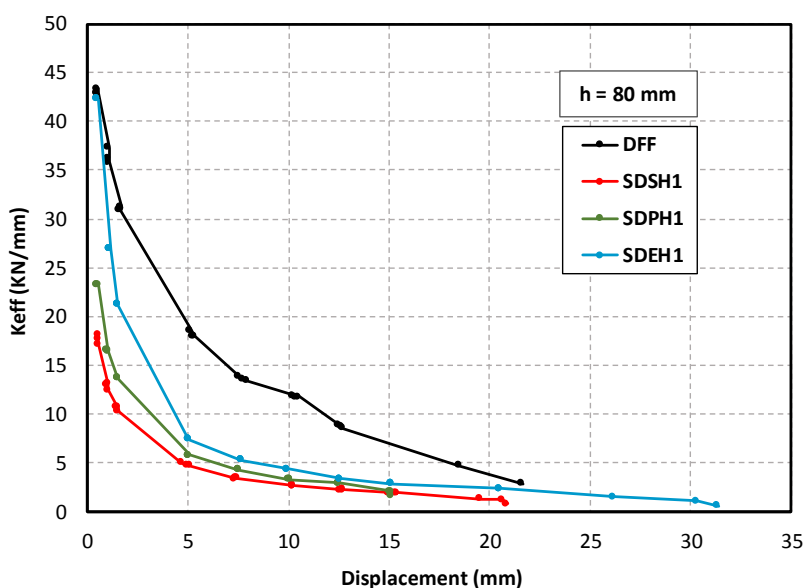
کلید پارامترهای به کار رفته در این رابطه در شکل ۱۰ [۲۱] تعریف و نشان داده شده‌اند.

در شکل‌های ۱۱ تا ۱۳ تغییرات سختی موثر نمونه‌ها با ارتفاع پره یکسان بر حسب تغییر مکان آنها ارائه شده است. در شکل ۱۱ نمونه‌های با ارتفاع پره برابر ۸۰ میلیمتر به همراه نمونه مرجع (نمونه توپر)، نمونه‌های با ارتفاع پره برابر ۹۰ میلیمتر به همراه نمونه مرجع و در شکل ۱۳ با ارتفاع پره برابر ۱۰۰ میلیمتر با یکدیگر مقایسه شده‌اند. ملاحظه این منحنی‌ها بطور کلی نشان دهنده آن است که با افزایش ارتفاع سختی موثر نمونه‌ها کاهش می‌یابد. مشاهده این منحنی‌ها در هر دسته با ارتفاع ثابت بیانگر آن است که در همه آنها سختی میراگرهای با شکل باریک شونده خطی از حالت ساده (پره با مقطع یکنواخت) و میراگرهای با شکل بیضی از باریک شونده خطی بالاتر می‌باشد. مقایسه این منحنی‌ها همچنین نشان می‌دهد که با افزایش ارتفاع پره‌ها، سختی موثر نمونه‌ها به یکدیگر نزدیک‌تر شده و میتوان گفت که اثر شکل پره بر روی این پارامتر کاهش می‌یابد. البته بایستی دقت نمود که این نتیجه گیری با فرض ثابت بودن نسبت  $b1/b0$  بدست آمده و نتیجه مذکور با قید این فرض معتبر می‌باشد.



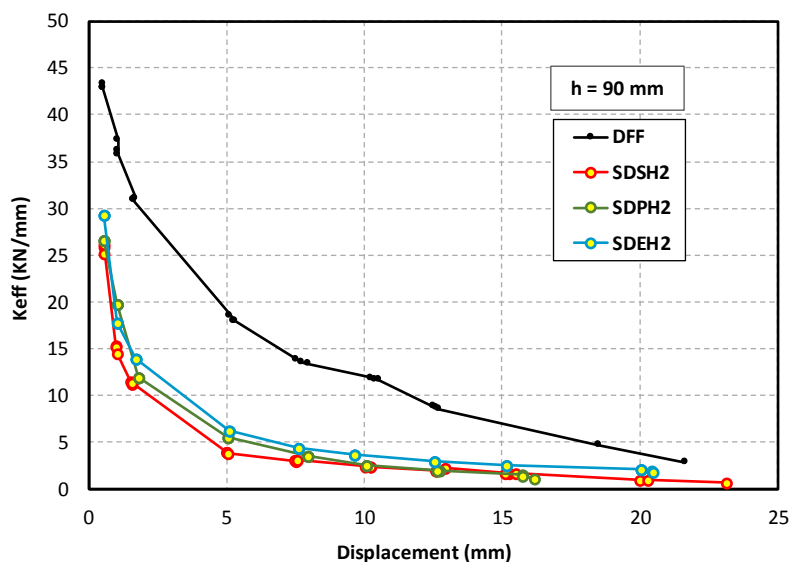
شکل ۱۰: سختی موثر و انرژی چرخه‌ای در بارگذاری چرخه‌ای

روند تغییرات منحنی‌های سختی موثر، بیانگر آن است که در تغییر مکان‌های کوچک سختی موثر به طور کلی زیاد بوده و با افزایش تغییر مکان مقدار آن به سرعت کاهش یافته و به سمت مقدار ثابتی گرایش پیدا می‌کند. رفتار نمونه‌ها همچنین حاکی از آن است که با افزایش بیشتر تغییر مکان، اختلاف سختی موثر نمونه‌ها به سرعت کاهش می‌یابد. نکته دیگر اینکه مقایسه این نمودارها نشان می‌دهد که روند کاهش سختی موثر در نمونه‌های با شکاف بیضی از نمونه‌های با پره باریک شونده خطی و نمونه‌های با مقطع ثابت با سرعت کندتری اتفاق می‌افتد. واضح است که سرعت نرم شوندگی بالا (افت سختی شدید) در سازه‌ها مطلوب نبوده و احتمال وقوع پدیده طبقه نرم را نیز افزایش می‌دهد.



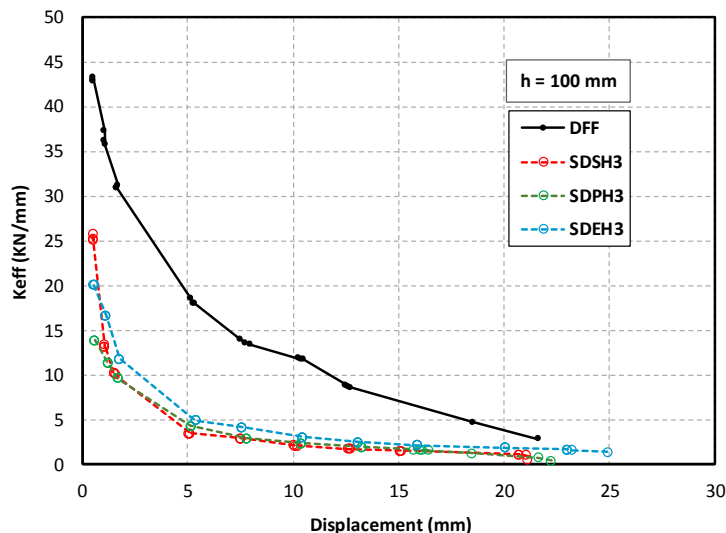
شکل ۱۱: سختی موثر نمونه‌های مختلف با ارتفاع پره برابر ۸۰ میلی‌متر

میزان سختی موثر نمونه‌های با مقطع باریک شونده خطی نسبت به نمونه‌های با مقطع یکنواخت در تغییر مکان‌های کمتر از حدود ۵ میلی‌متر (معادل دررفت نسبی کمتر از حدود ۰.۰۰۲ برای ارتفاع طبقه ۳ متر) برای  $h=80\text{mm}$  افزایشی در حدود ۱.۳ برابر، و نمونه با شکاف بیضوی نسبت به مقطع باریک شونده خطی افزایشی در حدود ۱.۵ برابر را نشان می‌دهد. این مقادیر برای  $h=90\text{mm}$  به ترتیب در حدود ۱.۲۵ و ۱.۲۰، و برای  $h=100\text{mm}$  به ترتیب در حدود ۱.۱ و ۱.۲۵ می‌باشد. مقدار متوسط افزایش در محدوده تغییر مکان یا دررفت نسبی ذکر شده (تغییر مکان ۵ میلی‌متر یا دررفت نسبی ۰.۰۰۲ برای ارتفاع طبقه ۳ متر) فارغ از اثر ارتفاع پره برای مقطع باریک شونده خطی نسبت به مقطع ثابت در حدود ۱.۲۲ و نمونه با شکاف بیضوی نسبت به مقطع باریک شونده خطی در حدود ۱.۳۲ می‌باشد.



شکل ۱۲: سختی موثر نمونه‌های مختلف با ارتفاع پره برابر ۹۰ میلی‌متر

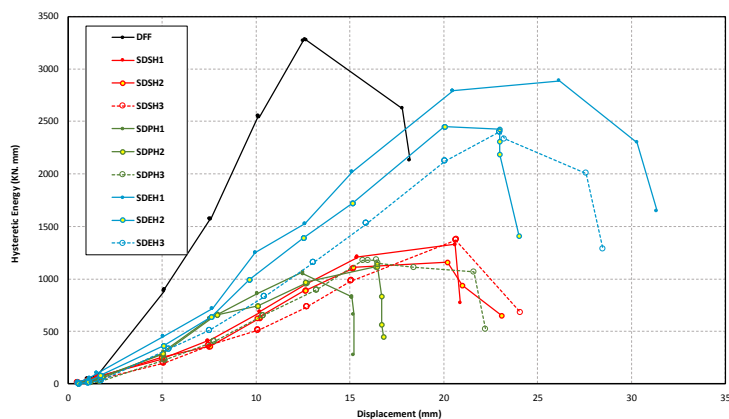
برای تغییر مکانهای بزرگتر از ۵ میلیمتر (معادل دریافت نسبی بیشتر از حدود 0.002 برای ارتفاع طبقه ۳ متر)، سختی موثر نمونه با مقطع یکنواخت و باریک شده خطی تقریباً برابر، اما نمونه‌های با شکاف بیضی این مقدار بطور متوسط افزایشی در حدود 1.6 برابر بیشتر از نمونه‌های با مقطع یکنواخت یا باریک شونده خطی برای هر سه ارتفاع ۸۰، ۹۰ و ۱۰۰ میلیمتر را نشان میدهد.



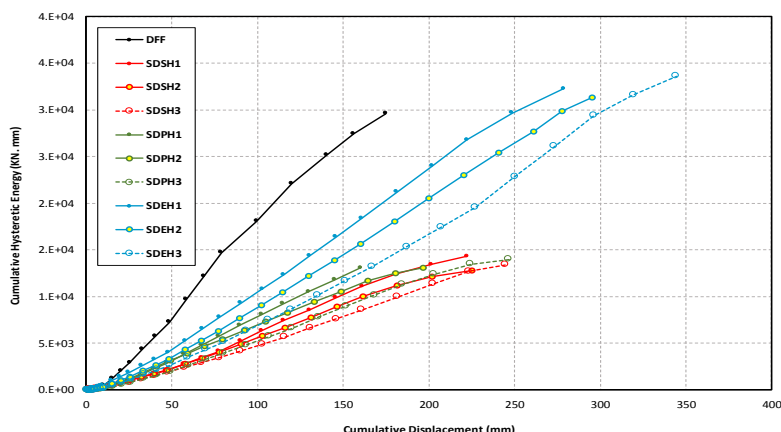
شکل ۱۳: سختی موثر نمونه‌های مختلف با ارتفاع پره برابر ۱۰۰ میلیمتر

### ۳-۳- انرژی تلف شده و میرایی و بسکوز معادل

انرژی مستهلک شده در هر چرخه و انرژی مستهلک شده تجمعی نمونه‌های مورد بررسی در **Error! Reference source not found** ارائه گردیده است. مشاهده منحنی‌های ارائه شده نشان دهنده آن است که بطور کلی انرژی تلف شده در نمونه‌ها با پره مقطع یکنواخت از همه نمونه‌ها کمتر و نمونه‌های با شکاف بیضی شکل از سایر نمونه‌ها بیشتر می‌باشد. مشاهده این منحنی‌ها همچنین نشان میدهد که با کاهش ارتفاع پره‌ها (کاهش نسبت  $h/b_0$ )، انرژی تلف شده افزایش می‌یابد. این موضوع به تنهایی نمی‌تواند بعنوان یک مزیت تلقی گردد، زیرا همانطور که در بخش ۳-۱ ذکر گردید مشاهدات نشان میدهد که کاهش ارتفاع پره‌ها (کاهش نسبت  $h/b_0$ )، غالباً باعث کاهش عمر میراگر (کاهش ظرفیت تغییر مکان) تحت بارهای چرخه‌ای نیز شده است. نکته دیگری که از مشاهده منحنی انرژی تلف شده (**Error! Reference source not found**) قابل توجه می‌باشد آن است که بر خلاف منحنی‌های مربوط به نمونه‌های با شکاف بیضی شکل، اغلب منحنی‌های انرژی تلف شده پس از رسیدن به انرژی حداکثر، دچار افت ناگهانی در میزان جذب انرژی شده‌اند، اما افت انرژی در نمونه‌های با شکاف بیضی شکل با شیب ملایم تری اتفاق افتاده است.



شکل ۱۴: انرژی مستهلک شده در هر چرخه و انرژی مستهلک شده تجمعی



شکل ۱۴ (ادامه): انرژی مستهلک شده در هر چرخه و انرژی مستهلک شده تجمعی

در شکل ۱۵ میزان میرایی ویسکوز معادل بر حسب تغییرمکان برای هر میراگر ارائه شده است. میرایی ویسکوز معادل یا میرایی موثر که رفتار یک سیستم غیرخطی را با یک سیستم خطی با میرایی ویسکوز، معادل سازی می کند در واقع به نوعی بیانگر نسبتی از انرژی تلف شده به انرژی ارتجاعی حاصل از سختی سکانتی در تغییرمکان حداکثر (سختی موثر) در هر چرخه می باشد. میرایی موثر را با توجه به شکل ۱۰ می توان از رابطه (۲) محاسبه نمود [۲۰].

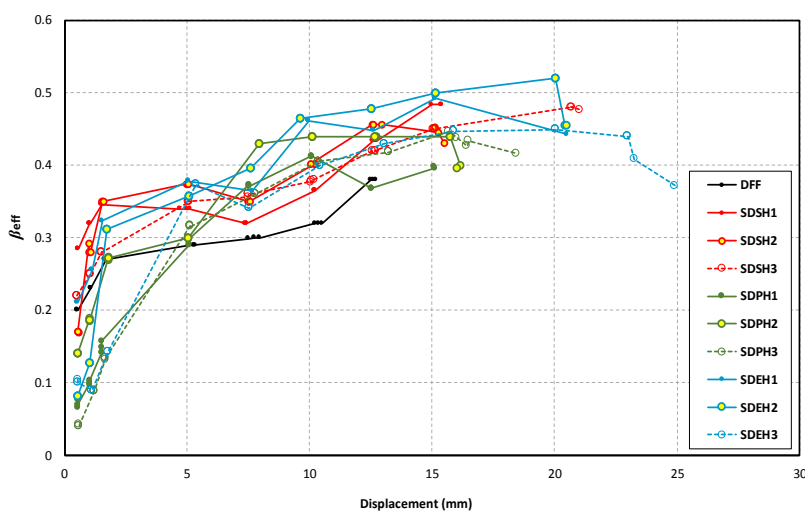
$$\beta_{i \text{ eff}} = \frac{E_{i D}}{4\pi E_{i e}} = \frac{2E_{i D}}{\pi k_{i \text{ eff}} \left( \left| \delta_{i \text{ max}}^+ \right| + \left| \delta_{i \text{ max}}^- \right| \right)^2} \quad (2)$$

که در آن  $\beta_{i \text{ eff}}$  میرایی موثر مربوط به چرخه نام می باشد. سایر پارامترهای بکار رفته در این رابطه نیز قبلا در شکل ۱۰ تعریف و ارائه شده اند.

ملاحظه روند تغییرات هر منحنی به تنهایی نشان می دهد که با افزایش تغییرمکان و به تبع آن افزایش خمیری شدن میراگر، در ابتدا میزان میرایی موثر به سرعت افزایش یافته و پس از رسیدن به یک مقدار حداکثر ثابت شده و یا با یک شیب ملایم کاهش می یابد. مقایسه منحنی های میرایی موثر با همدیگر اگرچه نشان دهنده روند کاملا منظمی نمی باشد اما بطور کلی نشان می دهد که در بین نمونه هایی که ارتفاع آنها ثابت می باشد نمونه های با شکاف بیضی شکل، در اکثر تغییر مکانها بیشترین مقدار میرایی موثر را از خود نشان داده است. جالب توجه است که با افزایش تغییرمکان بیشتر از حدود ۵ میلیمتر تقریبا کلیه نمونه های شکافدار دارای میرایی موثر بزرگتری از نمونه توپر می باشند. با مراجعه به تعریف میرایی موثر (رابطه ۲)، با توجه به اینکه این پارامتر بیانگر نسبت انرژی تلف شده به سختی موثر (ضرب در یک مقدار ثابت) می باشد. این نمودارها نشان می دهند که ایجاد شکاف با اشکال متفاوت در یک میراگر تسلیمی در واقع باعث تغییر نسبت انرژی تلف شده به سختی موثر می گردد. به عبارت دیگر ایجاد شکاف با یک شکل مناسب و نسبت ابعادی بهینه می تواند باعث افزایش این نسبت شده و با توجه به طیف پاسخ لرزه ای باعث کاهش پاسخ سازه گردد. مقایسه منحنی های شکل ۱۵ همچنین نشان می دهد که در هر دسته از نمونه ها، نمونه های با ارتفاع پره ۹۰ میلیمتر غالبا دارای میرایی موثر بیشتری نسبت به ارتفاع پره ۸۰ میلیمتر دارد، اما با افزایش ارتفاع پره به ۱۰۰ میلیمتر میرایی موثر دوباره کاهش یافته است. این به معنای آن است که با افزایش ارتفاع پره به ۱۰۰ میلیمتر با وجودی که سختی موثر نمونه های مربوط به آن نسبت به ارتفاع ۹۰ میلیمتر تا حدی کاهش داشته است اما کاهش انرژی جذب شده توسط این نمونه ها بیشتر از کاهش نمونه های ۹۰ میلیمتری بوده است. لذا از این لحاظ می توان گفت که نسبت  $h/b_0$  بهینه برای نمونه های با مقطع ثابت برابر ۵.۴۵، باریک شونده خطی برابر ۴.۷۴ و برای نمونه با شکاف بیضی برابر ۳.۶ می باشد. میزان متوسط افزایش میرایی موثر با مقطع باریک شونده خطی برای  $h/b_0=4.74$  نسبت به نمونه مرجع (نمونه توپر) پس از تغییر مکان ۵ میلیمتر (معادل دریافت

نسبی<sup>۸</sup> بیشتر از حدود 0.002 برای ارتفاع طبقه ۳ متر) برابر در حدود 0.1 (یعنی افزایشی در حدود 1.3 برابر نمونه مرجع) و برای مقطع با شکاف بیضی شکل در حدود 0.15 (یعنی افزایشی در حدود 1.45 برابر نمونه مرجع) میباشد. میزان متوسط افزایش میرایی موثر نمونه با شکاف بیضی شکل نسبت به مقطع باریک شونده خطی برای نسبتهای بهینه ذکر شده ( $h/b_0=3.60$ ) برای نمونه با شکاف بیضی شکل و ( $h/b_0=4.74$ ) برای باریک شونده خطی) پس از تغییر مکان ذکر شده (معادل دریافت نسبی بالاتر از حدود 0.002 برای ارتفاع طبقه ۳ متر) در حدود 0.04 (یعنی افزایشی در حدود 1.1 برابر نمونه باریک شونده خطی) میباشد.

افزایش میرایی موثر در کاهش پاسخ سازه، بخصوص در پاسخ به زلزله‌های حوزه نزدیک بسیار مهم بوده و در کاهش آسیب و خسارت وارده به آنها میتواند نقش قابل توجهی داشته باشد.



شکل ۱۵: میرایی موثر (میرایی ویسکوز معادل)

#### ۴- کمانش و میزان قابل قبول $h/b_0$

طبق اصول مکانیک و تحلیل سازه با کاهش طول تیر دو سر گیردار (شکل ۴) و افزایش ممان اینرسی مقطع آن، سختی تیر افزایش می‌یابد. افزایش سختی پره‌ها در جهت اعمال بار احتمال کمانش جانبی میراگر قبل از وقوع تسلیم و یا رسیدن میراگر به حداکثر مقاومت خود را افزایش می‌دهد. مشاهدات حاصل از نتایج تحلیل آزمایشگاهی نشان داد که از بین کلیه نمونه‌ها تنها نمونه مرجع (DFF) و نمونه SDEH1 (نمونه با شکاف بیضی با ارتفاع پره ۸۰ میلی‌متر) کمی قبل از رسیدن به مقاومت حداکثر خود دچار کمانش جانبی کلی گردیدند. با توجه به ثابت بودن نسبت  $b_1/b_0$  نسبت  $h/b_0$  را میتوان بعنوان معیاری از سختی و نسبت  $h/t$  را بعنوان معیاری از میزان لاغری نمونه‌ها در نظر گرفت. در بین نمونه‌های مورد مطالعه، نمونه DFF با نسبت  $h/b_0=1.09$  و نمونه SDEH1 با نسبت  $h/b_0=3.20$  دارای پایین‌ترین نسبت  $h/b_0$  می‌باشند. وقوع کمانش کلی در نمونه SDEH1 در شکل ۱۶ نشان داده شده است.

نسبت لاغری  $h/t$  برای دو نمونه ذکر شده به ترتیب برابر 12.5 و 10 می‌باشد. با توجه به اینکه دو نمونه مذکور در مطالعه آزمایشگاهی تحت بارگذاری چرخه‌ای اعمال شده دچار کمانش کلی گردیدند، حداقل مقدار توصیه شده نسبت  $h/b_0$  برای نمونه‌های با شکاف بیضی شکل برابر 3.6 (مربوط به نمونه SDEH2 که نسبت لاغری آن برابر ۱۱/۲۵ می‌باشد) پیشنهاد می‌گردد. با فرض خطی بودن رابطه کمانش بین نسبت‌های  $h/t$  و  $h/b_0$ ، برای سایر نسبت‌های  $h/t$  می‌توان از تناسب استفاده نمود؛ به این ترتیب که به عنوان مثال اگر مقدار  $h/t$  دو برابر گردد حداقل مقدار توصیه شده برای  $h/b_0$  نیز دو برابر می‌گردد. در هر حال استفاده از تحلیل‌های تئوری، مدل‌های عددی و یا مطالعات آزمایشگاهی جدید برای سایر نسبت‌های  $h/t$  نیز قابل کاربرد و توصیه می‌باشد. با توجه به اطلاعات موجود، حداقل مقدار قابل

<sup>8</sup> Drift Ratio



توصیه لاغری ( $h/t$ ) با نسبت  $h/b_0$  برابر 4.85 و 4.21 به ترتیب برای پره با مقطع یکنواخت و مقطع باریک شونده خطی برابر 10 پیشنهاد میگردد.



شکل ۱۶: کمانش کلی در نمونه SDEH1

## ۵- جمع بندی و نتیجه گیری

در این تحقیق، تعدادی نمونه میراگر تسلیمی شکافدار با سه شکل مختلف برای پره شامل مقطع ثابت، باریک شونده خطی و باریک شونده غیرخطی (با شکاف بیضوی) با نسبت‌های مختلفی از طول به عرض پره ( $h/b_0$ )، مورد مطالعه آزمایشگاهی قرار گرفت. نمونه‌های مورد نظر تحت بارگذاری چرخه‌ای استاتیکی قرار گرفته و پس از پردازش داده‌های به دست آمده از انجام آزمایش‌ها، نتایج زیر حاصل گردید:

۱- نتایج اولیه به دست آمده از بارگذاری چرخه‌ای نشان داد که با کاهش نسبت طول به عرض قسمت پهن پره‌ها ( $h/b_0$ ) و حاکم شدن رفتار برشی در پره‌ها ظرفیت نیرویی میراگرها افزایش می‌یابد، اما ظرفیت تغییرمکانی آنها تا حدی کاهش می‌یابد. کاهش ظرفیت تغییرمکانی در نمونه‌های با پره مقطع ثابت و باریک شونده خطی قابل ملاحظه‌ای در نمونه‌های با شکاف بیضوی چندان قابل توجه نبود.

۲- روند تغییرات پارامتر سختی موثر نمونه‌ها نشان داد که بطور کلی مقدار این پارامتر با افزایش تغییرمکان و گسترش تسلیم فولاد، مقدار این پارامتر به سرعت دچار افت و کاهش شدید می‌گردد. میزان افت این پارامتر برای میراگرها با شکاف بیضی شکل در مقایسه با پره با مقطع یکنواخت و باریک شونده خطی بطور محسوس و قابل توجهی کمتر می‌باشد. مقدار متوسط افزایش در محدوده تغییر مکان کمتر از ۵ میلیمتر یا دریفت نسبی 0.002 برای ارتفاع طبقه ۳ متر برای مقطع باریک شونده خطی نسبت به مقطع ثابت در حدود 1.22 برابر و نمونه با شکاف بیضوی نسبت به مقطع باریک شونده خطی در حدود 1.32 برابر می‌باشد.

۳- میزان سختی موثر در تغییرمکانهای بزرگتر از ۵ میلیمتر (معادل دریفت نسبی بیشتر از حدود 0.002 برای ارتفاع طبقه ۳ متر)، برای نمونه با مقطع یکنواخت و باریک شونده خطی تقریباً برابر، اما نمونه‌های با شکاف بیضوی این پارامتر بطور متوسط افزایشی در حدود 1.6 برابر بیشتر از نمونه‌های با مقطع یکنواخت یا باریک شونده خطی را نشان می‌دهد.

۴- مقایسه انرژی‌های تلف شده بین میراگرها با پره با اشکال مختلف بیانگر جذب انرژی بالاتر در میراگرهای با مقطع باریک شونده خطی نسبت به مقطع ثابت و افزایش جذب انرژی در میراگرهای با شکاف بیضی شکل نسبت به مقطع باریک شونده خطی می‌باشد.

۵- بررسی اثر شکل پره بر میرایی موثر میراگرهای مورد مطالعه نشان داد که مقدار بهینه  $h/b_0$  برای میراگرهای با مقطع ثابت برابر 5.45، مقطع باریک شونده خطی برابر 4.74 و باریک شونده با شکاف بیضوی برابر 3.60 می‌باشد. برای  $h/b_0$  های ذکر شده میرایی موثر در تغییر مکان بیش از ۵ میلیمتر (معادل دریفت نسبی بیش از 0.002 برای ارتفاع طبقه برابر ۳ متر) در نمونه‌های با مقطع باریک شونده

خطی در حدود 1.3 برابر و در نمونه های با شکاف بیضی شکل در حدود 1.45 برابر نسبت به نمونه مرجع (نمونه توپر) افزایش مشاهده گردید.

۶- نتایج تحقیق نشان داد که در  $h/b_0$  های برابر، پره با شکاف بیضی بیشترین ظرفیت تغییرمکان را از خود نشان داده است. در مقدار  $h/b_0$  بهینه ظرفیت تغییر مکان در نمونه با شکاف بیضی نسبت به مقطع باریک شونده خطی افزایشی در حدود ۲۷٪ را نشان داد.

۷- کاهش نسبت طول به عرض پره باعث افزایش سختی میراگر شده و این موضوع با افزایش تغییرمکان می‌تواند باعث افزایش نیرو و نهایتاً کمانش کلی میراگر قبل از دستیابی به ظرفیت حداکثر آن گردد. حداقل مقدار مجاز توصیه شده برای نسبت طول به عرض پره بستگی به نسبت ارتفاع به ضخامت میراگر (که معیاری از لاغری میراگر می‌باشد) دارد. برای نسبت لاغری ۱۰ حداقل نسبت  $h/b_0$  برای مقطع ثابت 4.85 و برای مقطع باریک شونده خطی 4.21 برای جلوگیری از کمانش کلی پیشنهاد گردید. برای نسبت لاغری 11.25 برای میراگر با شکاف بیضی نیز حداقل نسبت  $h/b_0$  برابر 3.6 پیشنهاد گردید.

۸- در نهایت و در مجموع میتوان گفت که نمونه های با شکاف بیضی عملکرد و بازدهی بالاتری را نسبت به نمونه های با مقطع ثابت و حتی باریک شونده خطی از خود نشان دادند. عمر بالاتر این نمونه ها تحت بارگذاری تکرار شونده (افزایش ظرفیت تغییر مکان) و افزایش میرایی موثر از بارزترین شاخصه های این میراگرها بود که نسبت به شکلهای دیگر افزایش قابل توجه و محسوسی را نشان داد.

## مراجع

- [۱] A. Benavent-Climent, "A brace-type seismic damper based on yielding the walls of hollow structural sections," *Engineering Structures*, vol. 32, no. 4, pp. 1113-1122, (2010).
- [۲] A. S. Whittaker, V. V. Bertero, C. L. Thompson, and L. J. Alonso, "Seismic testing of steel plate energy dissipation devices," *Earthquake Spectra*, vol. 7, no. 4, pp. 563-604, (1991).
- [۳] R. K. Mohammadi, A. Nasri, and A. Ghaffary, "TADAS dampers in very large deformations," *International Journal of Steel Structures*, vol. 17, no. 2, pp. 515-524, (2017).
- [۴] H.-N. Li, and G. Li, "Experimental study of structure with "dual function" metallic dampers," *Engineering Structures*, vol. 29, no. 8, pp. 1917-1928, (2007).
- [۵] F. Nateghi-Alahi, and M. Torbat Esfahani, "Experimental and analytical behavior of accordion metallic dampers by increasing the number of layers," *Sharif Journal of Civil Engineering*, vol. 31.2, no. 3.1, pp. 19-29, (2015).
- [۶] K. Deng, P. Pan, W. Li, and Y. Xue, "Development of a buckling restrained shear panel damper," *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 106, pp. 311-321, (2015).
- [۷] Abdolrahim Jalali, Mojtaba Daie, Seyed Vahid Mousavi Nazhadan, Pedram Kazemi- Arbat and Mahdi Shariati, "Seismic performance of structures with pre-bent strips as a damper," *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 7(26), pp. 4061-4072, (2012).
- [۸] S.-H. Oh, Y.-J. Kim, and H.-S. Ryu, "Seismic performance of steel structures with slit dampers," *Engineering Structures*, vol. 31, no. 9, pp. 1997-2008, (2009).
- [۹] M. Shariati, M.M. Tahir, Tee Chin Wee, S.N.R. Shah, A. Jalali, "Experimental investigations on monotonic and cyclic behavior of steel pallet rack connections" *Engineering Failure Analysis*, Volume 85, March 2018, Pages 149-166.
- [۱۰] Mahdi Shariati, Ali Toghroli, Abdolrahim Jalali and Zainah Ibrahim, "Assessment of stiffened angle shear connector under monotonic and fully reversed cyclic loading " *Structural and Mechanical Engineering*, 2017, Pages 64-68.
- [۱۱] K. Deng, P. Pan, J. Sun, J. Liu, and Y. Xue, "Shape optimization design of steel shear panel dampers," *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 99, pp. 187-193, (2014).

- [۱۲] B. Zhu, T. Wang, and L. Zhang, "Quasi-static test of assembled steel shear panel dampers with optimized shapes," *Engineering Structures*, vol. 172, pp. 346-357, (2018).
- [۱۳] L.-Y. Xu, X. Nie, and J.-S. Fan, "Cyclic behaviour of low-yield-point steel shear panel dampers," *Engineering Structures*, vol. 126, pp. 391-404, (2016).
- [۱۴] R. W. Chan, and F. Albermani, "Experimental study of steel slit damper for passive energy dissipation," *Engineering Structures*, vol. 30, pp. 1058-1066, (2008).
- [۱۵] D. R. Teruna, T. A. Majid, and B. Budiono, "Experimental study of hysteretic steel damper for energy dissipation capacity," *Advances in Civil Engineering*, vol. 2015, (2015).
- [۱۶] J. Zheng, A. Li, and T. Guo, "Analytical and experimental study on mild steel dampers with non-uniform vertical slits," *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, vol. 14, no. 1, pp. 111-123, (2015).
- [۱۷] C.-H. Lee, Y. K. Ju, J.-K. Min, S.-H. Lho, and S.-D. Kim, "Non-uniform steel strip dampers subjected to cyclic loadings," *Engineering Structures*, vol. 99, pp. 192-204, (2015).
- [۱۸] H. Ahmadi Amiri, E. P. Najafabadi, and H. E. Estekanchi, "Experimental and analytical study of Block Slit Damper," *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 141, pp. 167-178, (2018).
- [۱۹] M.A. Kafi, K. Nik-Hoosh, "The geometric shape effect of steel slit dampers in their behavior," *Magazine of Civil Engineering*, vol. 87(3), pp. 3-17, (2019).
- [۲۰] Applied Technology Council, ATC-24, Guidelines for Cyclic Seismic Testing of Component of Steel structures, Redwood City, CA (1992).
- [۲۱] A. K. Chopra, Dynamics of structures: theory and applications to earthquake engineering: Prentice Hall Englewood Cliffs, NJ, (1995).