

# مطالعه‌ی آزمایشگاهی و تحلیلی میراگر تسلیمی فولادی با هدف بهبود عملکرد لرزه‌ی آن

Original Article

کیانوش نیک‌هوش (دانشجوی دکتری)

محمدعلی کافی\* (دانشیار)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

در این نوشتار پس از مطالعه و مرور نتایج مطالعات و کارهای گذشته پیرامون میراگرهای تسلیمی فولادی شکاف‌دار کوشیده‌ایم با شناخت رفتار این میراگرها راهکارهایی برای بهبود یا بهینه‌سازی رفتار آنها با استفاده از افزایش تعداد ردیف پره‌ها و معرفی الگوی جدید هندسی ارائه کنیم. در این بررسی به صورت کلی هفت نمونه‌ی آزمایشگاهی طرح و ساخت، تحت مطالعات آزمایشگاهی قرار گرفت که شامل یک نمونه‌ی مرجع به همراه سه نمونه با یک ردیف پره و سه نمونه‌ی دیگر با دو ردیف پره است که در آزمایشگاه تحت بارگذاری دوره‌ی قرار گرفتند. مطالعه‌ی آزمایشگاهی رفتار نمونه‌های مزبور نشان داد که سوق دادن رفتار میراگر از حالت خمشی به برشی می‌تواند باعث افزایش انرژی تلف شده شود اما این تغییر رفتار ظرفیت تغییر مکانی آنها را تا اندازه‌ی کاهش می‌دهد. برای جلوگیری از کاهش ظرفیت تغییر مکانی نشان داده شد که با ایده طراحی میراگرها به صورت دو ردیفه یا چند ردیفه می‌توان مانع از کاهش ظرفیت مزبور شد و در مجموع به عملکرد بهتری از میراگر (افزایش سختی حدود ۲ برابر و میرایی مؤثر حدود ۱/۲۵ برابر) دست یافت. همچنین یک نسبت ابعادی مجاز برای جلوگیری از کمانش کلی میراگر نیز در این تحقیق پیشنهاد شد.

واژگان کلیدی: میراگر تسلیمی، بارگذاری دوره‌ی، رفتار خمشی، رفتار برشی، انرژی تلف شده.

k.nikhoosh.phd@semnan.ac.ir  
mkafi@semnan.ac.ir

## 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، غیرفعال، نیمه‌فعال و ترکیبی تقسیم‌بندی کرد. 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 عمده‌ی 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 لرزه‌ی شناخته می‌شوند جذب می‌شود. مرایای استفاده از چنین سیستمی عبارت است از: ۱. جذب تغییر شکل‌های غیرارتجاعی در میراگرها و کاهش شدید خسارت در سازه اصلی؛ ۲. کاهش تغییر مکان‌های جانبی سازه که به نوبه‌ی خود باعث کاهش خسارت اجزای غیرسازه‌ی می‌شود؛ ۳. سهولت بازرسی، تعمیر یا تعویض این ادوات بدون نیاز به

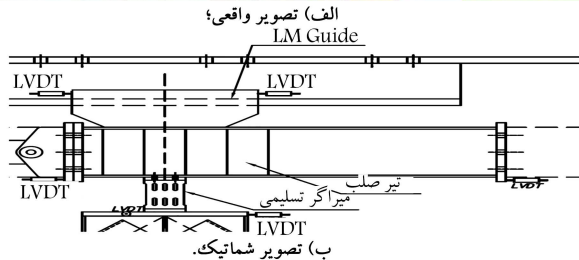
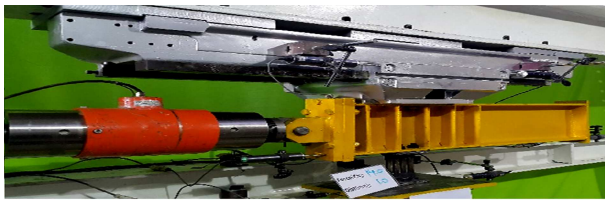
تخلیه‌ی ساکنین ساختمان.<sup>[۱]</sup> در زمینه‌ی سیستم‌های کنترل غیرفعال، تاکنون انواع مختلفی از میراگرهای تسلیمی فولادی توسط محققین مختلف پیشنهاد شده است. از جمله این میراگرها می‌توان به میراگر ADAS<sup>[۲]</sup>، TADAS<sup>[۳]</sup>، میراگر دوپل ضربدری<sup>[۴]</sup> و میراگر آکاردئونی<sup>[۵]</sup> اشاره کرد. از زمان معرفی میراگرهای تسلیمی تحقیقات و تلاش‌های زیادی برای بهبود رفتار آنها انجام شده است. معرفی یک نوع میراگر ضد کمانش را می‌توان نمونه‌ی از این تلاش‌ها در راستای هدف ذکر شده دانست.<sup>[۶]</sup> معرفی یک نوع اتصال نیمه‌گیردار با استفاده از میراگر شکاف‌دار تسلیمی و بررسی رفتار لرزه‌ی آن نمونه‌ی دیگری از تحقیقات انجام شده در این زمینه است.<sup>[۷]</sup> در تحقیق دیگری مطالعه بر روی بهینه‌سازی شکل میراگر برشی و ارائه‌ی یک شکل بهینه برای یک پانل برشی تسلیم شونده و مطالعه‌ی رفتار آن مورد توجه قرار گرفته است.<sup>[۸]</sup> اثر استفاده از فولاد با مقاومت تسلیم پایین در رفتار میراگر تسلیمی برشی نیز توسط برخی دیگر از محققین مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته است.<sup>[۹]</sup>

\* نویسنده مسئول

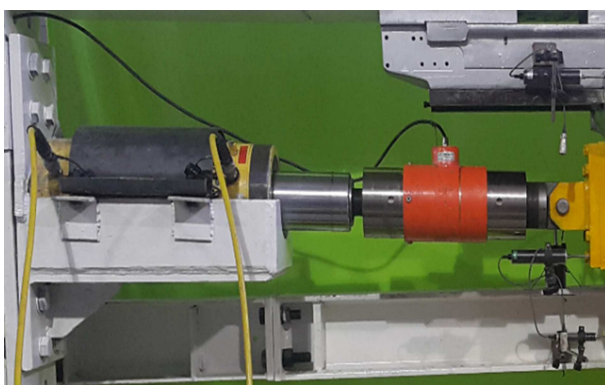
تاریخ: دریافت ۱۳۹۸/۲/۲۳، اصلاحیه ۱۳۹۸/۴/۱، پذیرش ۱۳۹۸/۴/۱۱

DOI:10.24200/J30.2019.53141.2534

میراگر مورد مطالعه در این مقاله از نوع میراگر فولادی شکاف‌دار (SSD)<sup>۱</sup> است. نمونه‌ی از نحوه‌ی به کارگیری این نوع میراگر در یک مهاربند شورون در شکل ۱



شکل ۲. محل قرارگیری LVDT ها.



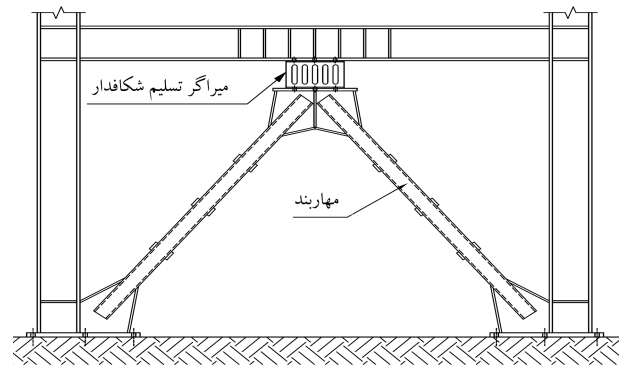
شکل ۳. جک مورد استفاده.

جدول ۱. مشخصات هندسی نمونه‌های آزمایشگاهی (کلیه ابعاد به میلی‌متر).

نمونه	t	b	h <sub>o</sub>	h	c	h/b
DSSH۱	۸	۱۶٫۵	۸۰	۸۰	۰	۴٫۸۵
DSSH۲	۸	۱۶٫۵	۹۰	۹۰	۰	۵٫۴۵
DSSH۳	۸	۱۶٫۵	۱۰۰	۱۰۰	۰	۶٫۰۶
DSDH۱	۸	۱۶٫۵	۸۰	۲۱	۲۸	۱٫۲۸
DSDH۲	۸	۱۶٫۵	۹۰	۲۶	۲۸	۱٫۵۸
DSDH۳	۸	۱۶٫۵	۱۰۰	۳۱	۲۸	۱٫۸۸
DFE	۸	۹۱٫۲۵	۱۰۰	-	-	-

### ۱.۲. مشخصات نمونه‌ها

نمونه‌های آزمایشگاهی مورد مطالعه به صورت کلی هفت نمونه بوده و شامل سه نمونه‌ی شکافدار ساده دارای چهار پره‌ی یکنواخت در یک ردیف، سه نمونه دارای چهار پره‌ی یکنواخت در دو ردیف و یک نمونه بدون شکاف و کاملاً توپر به عنوان نمونه‌ی مرجع است. ضخامت و عرض همه‌ی پرها در تمامی نمونه‌ها ثابت و ارتفاع آنها به عنوان متغیر در نظر گرفته شد. به این ترتیب نسبت بدون بعد ارتفاع به عرض پره‌ها، متغیر اصلی در مطالعه‌ی پارامتریک و ارائه‌ی نتایج این تحقیق محسوب می‌شود. در جدول ۱ نامگذاری پارامترهای هندسی نمونه‌ها در شکل ۴ نشان داده شده است.



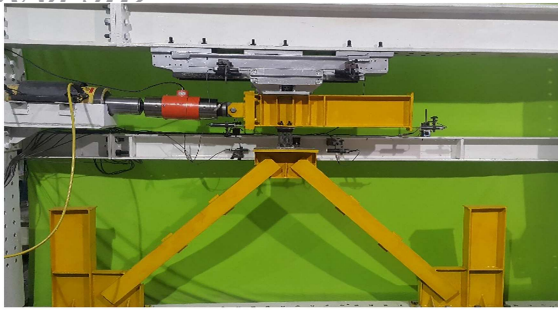
شکل ۱. کاربرد میراگر تسلیمی در یک مهاربند شورون.

نشان داده شده است. این نوع میراگر ابتدا در سال ۲۰۰۸ معرفی شد؛ در مقاله‌ی مربوطه اثر شکاف‌های ایجاد شده در سه آزمایش مختلف مورد بررسی قرار گرفت.<sup>[۱۱]</sup> در مطالعه‌ی که در سال ۲۰۱۵ بر روی این میراگرها انجام شد، نشان داده شد که اگر لبه‌ی شکاف‌های ایجاد شده به صورت محدب باشد مانع از وقوع خستگی کم دوره<sup>۲</sup> شده و در بارگذاری دوره‌ی رفتار با ثبات‌تری را نشان می‌دهد.<sup>[۱۲]</sup> در مطالعه‌ی دیگری اثر شکاف با ارتفاع‌های متغیر مورد بررسی قرار گرفت و نشان داده شد که اگر پره‌های میانی لاغرتر و پره‌های کناری ضخیم‌تر باشند انرژی تلف شده در بارگذاری دوره‌ی مقداری افزایش می‌یابد.<sup>[۱۳]</sup>

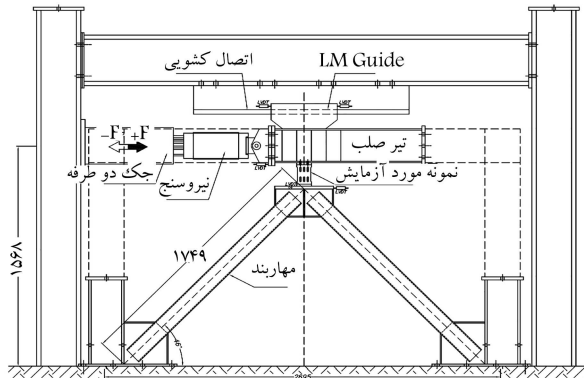
در تحقیق دیگری اثر شکاف با شکل‌های مختلف (پره‌ها یا نوارها با مقطع متغیر) مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این تحقیق بیانگر آن بود که پره‌های با شکل‌های دمبلی و باریک‌شونده‌ی تدریجی دارای عملکرد بهتری در زلزله هستند.<sup>[۱۴]</sup> تحقیق دیگری که در سال ۲۰۱۸ بر روی این نوع میراگرها صورت گرفته است شامل میراگرهایی است که پره‌های آن دارای مقطع متغیر با ضخامت زیاد (ضخامت ثابت) است. این میراگرها به دلیل ضخامت زیاد نوارها، نسبت به کماتش مقاوم‌اند. در تحقیق مذکور نسبت ابعادی بهینه برای پره‌های میراگر مورد مطالعه قرار گرفته است.<sup>[۱۵]</sup> با توجه به مطالعات انجام شده قبلی، در تحقیق پیش رو سعی بر آن است که به نحوی رفتار میراگرهای تسلیمی با مقطع ثابت را بهبود داده و با توجه به مطالعات آزمایشگاهی انجام شده و محدودیت‌های آن، یک نسبت ابعادی بهینه برای میراگرهای مذکور پیشنهاد و ارائه شود.

### ۲. مطالعه‌ی آزمایشگاهی

در این بخش مشخصات نمونه‌ها، مصالح، چیدمان آزمایش و سایر جزئیات مطالعه‌ی آزمایشگاهی ارائه شده است. آزمایش انجام شده در محل آزمایشگاه دانشکده‌ی مهندسی عمران دانشگاه سمنان صورت گرفته و از امکانات و تجهیزات آن آزمایشگاه بهره گرفته شده است. ترانسفورماتورهای تفاضلی متغیر خطی (LVDT)<sup>۳</sup> مورد استفاده در این آزمایش از دو نوع ۲۵ میلی‌متری و ۵۰ میلی‌متر بوده است. محل قرارگیری LVDT ها برای بررسی رفتار نمونه در جهات مختلف و همچنین بررسی رفتار خارج از صفحه‌ی نمونه در نظر گرفته شده است. در شکل ۲ محل قرارگیری LVDT ها به صورت واقعی و شماتیک، نشان داده شده است. یک جک ۱۰۰ تنی رفت و برگشتی متصل به نیوتن متر نیز وظیفه‌ی اعمال نیرو به قسمت فوقانی نمونه را عهده‌دار است. در شکل ۳ جک مورد استفاده برای آزمایش نشان داده شده است.



الف) تصویر واقعی از سامانه آزمایش؛



ب) تصویر شماتیک و شرح جزئیات سامانه.

شکل ۶. طراحی سیستم سامانه آزمایش برای بارگذاری دوره‌یی.

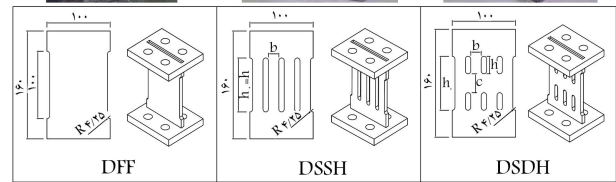
استفاده از سیستم ریل هادی یا ریل دم‌چلچله‌یی (LMguid) که بخشی از یک دستگاه تراشکاری است، به منظور شبیه‌سازی سقف صلب و آزادی حرکت تنها در جهت افقی، برای این سامانه‌ی آزمایش مورد استفاده قرار گرفته است. برای طراحی سامانه‌ی آزمایش پس از محاسبه‌ی بیشینه‌ی ظرفیت باربری نمونه‌ها، نمونه بر روی یک مهاربند با پیکربندی شورون نصب شد. مقطع مهاربندها به نحوی محاسبه و انتخاب شد که ظرفیت کشسان و ظرفیت کماتشی آن به میزان قابل توجهی از ظرفیت خمیری نمونه‌ی تحت آزمایش بیشتر باشد. اتصال فوقانی میراگر از نوع ریلی و متصل به یک نیوتن متر<sup>۵</sup> است. یکی از شاخص‌های این کار، آزمایش میراگر در داخل قاب است لذا با تشریح سامانه‌ی آزمایش، به ویژه LMguid و شبیه‌سازی سقف صلب، همچنین با فرض مفصلی بودن اتصال تیر و ستون، سامانه‌ی طراحی شده را می‌توان معادل رفتار قاب ساده دارای مهاربند در نظر گرفت.

### ۳. روابط تحلیلی

در این بخش روابط مربوط به سختی کشسانی، نیرو و تغییرمکان تسلیم میراگر براساس اصول مکانیک جامدات ارائه شده است. از این روابط می‌توان برای طراحی میراگر متناسب با نیاز سازه استفاده کرد.

#### ۱.۳. سختی کشسانی

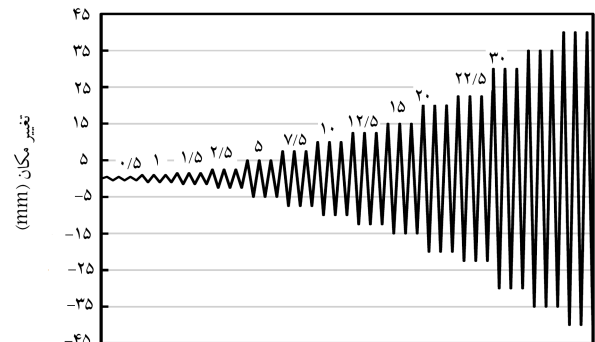
در شکل ۷ رفتار یک عدد پره به صورت معادل با یک تیر دوسرگیردار نشان داده شده است. این رفتار ساده شده زمانی که سختی پره نسبت به سختی نواحی تکیه‌گاهی آن اختلاف زیادی داشته باشد (کمتر باشد) قابل استفاده بوده و به میزان قابل توجهی



شکل ۴. هندسه و پارامترهای تعیین‌کننده مشخصات نمونه‌های آزمایشگاهی (کلیه‌ی اندازه‌ها به میلیمتر).

جدول ۲. مشخصات مصالح فولاد مورد استفاده (واحد‌ها نیوتن و میلی‌متر).

نمونه	تنش تسلیم	تنش نهایی	کرنش بیشینه
$S_t 37$	۲۵۰	۴۳۴	۰/۴



سیکل

شکل ۵. تاریخچه بارگذاری دوره‌یی افزایشی.

### ۲.۲. مشخصات مصالح

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

### ۳.۲. برنامه و چیدمان آزمایش

نمونه‌های آزمایشگاهی شرح داده شده طی برنامه‌ی در نظر گرفته شده تحت بارگذاری استاتیکی دوره‌یی قرار گرفت. برای اعمال بار دوره‌یی مذکور از تاریخچه‌ی بارگذاری افزایشی بر مبنای پروتکل ATC-24<sup>[۱۶]</sup> استفاده شده است (شکل ۵). براساس این پروتکل روند بارگذاری و جابه‌جایی بدین صورت است: در هر سیکل سه رفت و برگشت در نظر گرفته شده که به ترتیب جابه‌جایی در هر سیکل بر حسب میلی‌متر 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 مرحله‌ی انهدام کامل پیش رفته است. تصویر واقعی و شرح جزئیات نصب ادوات اندازه‌گیری مربوط به سیستم چیدمان<sup>۴</sup> آزمایش در شکل ۶ نشان داده شده است.

## Archive of SID

که در آن  $F_y$  تنش تسلیم فولاد مورد استفاده در ساخت میراگرهاست. برای میراگرهای با دو ردیف پره در صورتی که  $c$  به اندازه‌ی کافی از  $b$  بزرگتر باشد تسلیم در دو انتهای پره رخ داده و استفاده از رابطه‌ی ۴ برای محاسبه‌ی نیروی تسلیم همچنان معتبر است. با معین بودن نیروی تسلیم از رابطه‌ی ۴ و سختی کشسانی از رابطه‌ی ۲ یا ۳ تغییر مکان تسلیم را می‌توان از رابطه‌ی ۵ محاسبه کرد:

$$\Delta_y = \frac{P_y}{k} \quad (5)$$

برای برآورد ظرفیت خمیری میراگر در صورتی که از ضریب شکل مقطع مستطیل  $(Z/S = 1/5)$  استفاده شود از رابطه‌ی ۵ می‌توان به رابطه‌ی ۶ برای محاسبه‌ی این نیرو رسید:

$$P_p = \frac{nb^2 t F_y}{2h} \quad (6)$$

در صورت حاکم شدن رفتار برشی، نیروی تسلیم در برش برای یک مقطع مستطیل شکل از رابطه‌ی ۷ به دست می‌آید:

$$P_{ys} = \frac{2nbtF_y}{3\sqrt{3}} \quad (7)$$

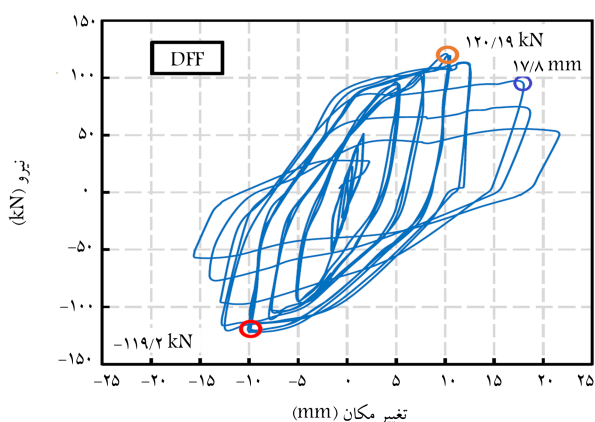
با توجه به نوع رفتار حاکم شده نیروی تسلیم میراگر برابر حداقل مقدار دو نیروی به دست آمده از روابط ۴ و ۷ خواهد بود.

## ۴. تحلیل نتایج مطالعه‌ی آزمایشگاهی

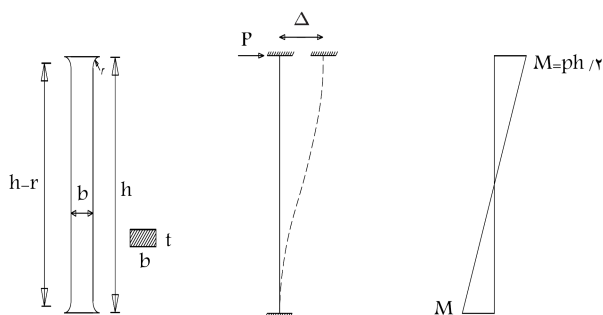
در این بخش پس از ارائه خروجی حاصل از مطالعه‌ی آزمایشگاهی به بررسی، مقایسه و تحلیل نتایج به دست آمده پرداخته شده است. خروجی‌های مورد بحث شامل رفتار دوره‌یی، سختی مؤثر، انرژی تلف شده و میرایی ویسکوز معادل در رفتار دوره‌یی است.

### ۱.۴. رفتار دوره‌یی نمونه‌ها

آزمایش نمونه‌های مورد مطالعه با بارگذاری استاتیکی دوره‌یی طبق الگوی بارگذاری ارائه شده در شکل ۵ انجام و تغییرات نیرو - تغییر مکان آنها ثبت شد. نمودار دوره‌یی حاصل از این آزمایش‌ها تحت بارگذاری ذکر شده در نمونه‌ی DFF، نمونه‌ی مرجع مورد نظر بدون هیچ پره‌یی (نمونه توپر) در شکل ۸ ارائه شده است. در شکل ۸ و ۹



شکل ۸. رفتار دوره‌یی نیرو - تغییر مکان نمونه مرجع.



شکل ۷. پره معادل شده با یک تیر دوسرگیردار. (ب) تغییر شکل پره تحت بار جانبی؛ (الف) پره یا نوار؛ (پ) دیاگرام ممان.

شکل ۷. پره معادل شده با یک تیر دوسرگیردار.

باعث ساده و سرراست شدن محاسبات می‌شود. برای میراگرهای با یک ردیف پره با ملاحظه‌ی هندسه‌ی آنها می‌توان مشاهده کرد که این شرط فراهم است؛ اما برای میراگرهای با دو ردیف پره می‌توان نشان داد که در صورتی که نسبت  $h/b$  (شکل ۴) به اندازه‌ی کافی از نسبت  $2r/c$  بزرگتر باشد ( $r$  شعاع انحنا انتهای پره‌ها و  $2r$  فاصله آزاد بین هر دو پره است) شرط مزبور فراهم می‌شود.

با توجه به بزرگ بودن نسبت ارتفاع مقطع به طول تیر (طول پره)، تغییر شکل برشی سهم قابل توجهی در تغییر شکل کل داشته و باید در محاسبات منظور شود. با توضیحات ذکر شده میزان سختی کشسانی یک عدد پره از رابطه‌ی ۱ قابل محاسبه است:

$$k_1 = \frac{Etb^3}{h^3(1 + 3b^2/h^2)} \quad (1)$$

که در آن  $E$  مدول کشسانی فولاد میراگر بوده و سایر پارامترها که مربوط به مشخصات هندسی میراگر است قبلاً در شکل ۴ ارائه شده است. در این رابطه از وجود انحنای کوچک در انتهای پره صرف نظر شده است؛ لذا برای حصول نتیجه‌ی دقیقتر بهتر است (در صورتی که  $r$  نسبت به  $h$  کوچک باشد) در هنگام استفاده از رابطه‌ی ۱ از  $r - h$  به جای  $h$  استفاده شود.

با مشخص بودن سختی یک عدد پره و یکنواخت بودن کلیه پره‌ها، سختی کشسانی برای میراگرهای با  $n$  پره در یک ردیف و  $2n$  پره در دو ردیف (دو ردیف پره در  $n$  ستون) را می‌توان به ترتیب از روابط ۲ و ۳ محاسبه کرد:

$$k = nk_1 \quad (2)$$

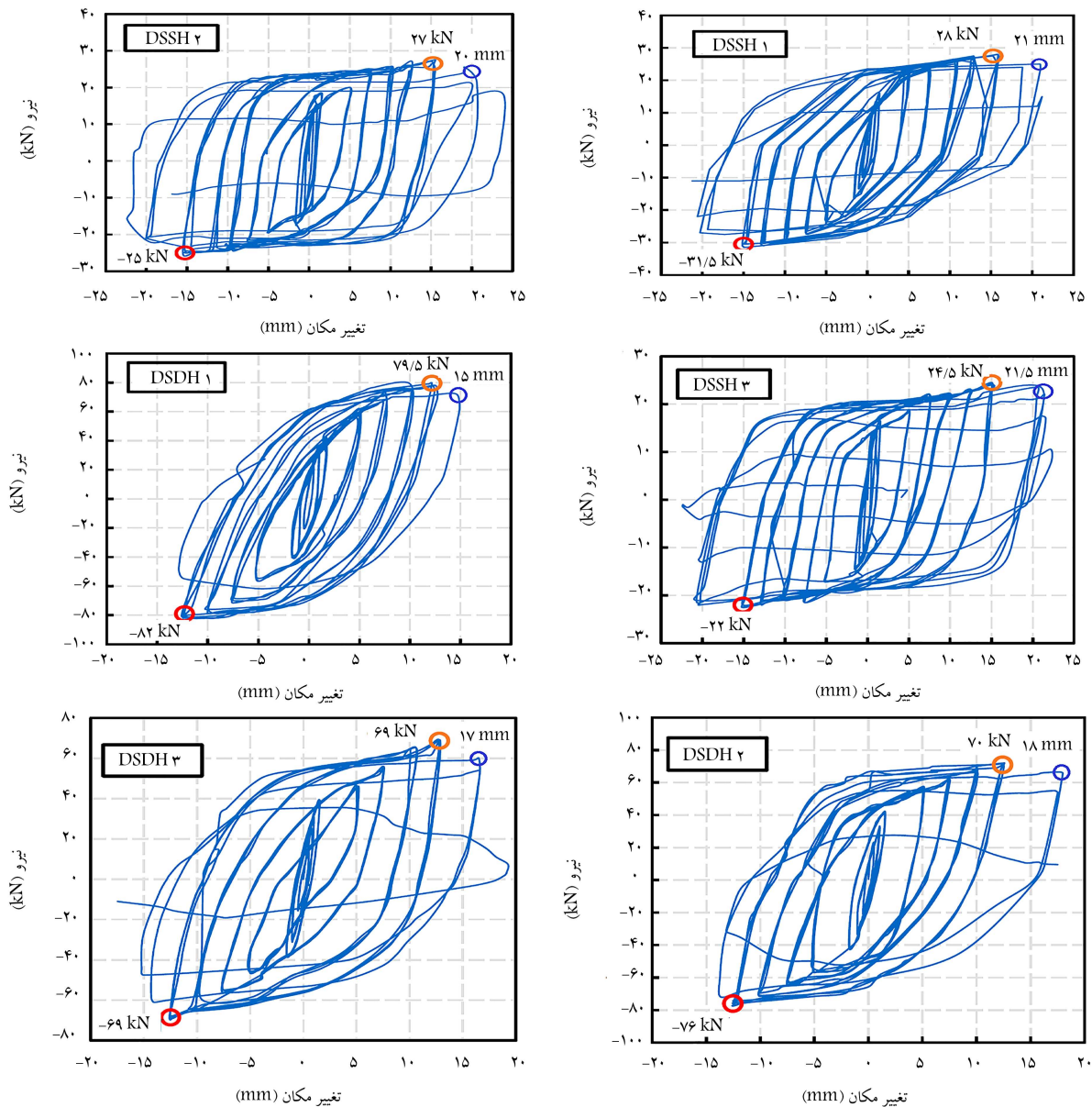
$$k = \frac{nk_1}{2} \quad (3)$$

قابل ذکر است که برای کلیه‌ی نمونه‌های مورد مطالعه در این تحقیق نسبت  $h/b$  بیش از  $4/2$  برابر نسبت  $2r/c$  بوده و لذا شرط ذکر شده برای استفاده از روابط فوق برای این نمونه‌ها تأمین شده است.

### ۲.۳. نیرو و تغییر مکان تسلیم

با فرض غالب بودن رفتار خمشی و تشکیل مفصل خمیری در دو انتهای هر پره و با مراجعه به نمودار ممان در شکل ۷، رابطه‌ی ۴ برای محاسبه‌ی نیروی تسلیم میراگر قابل استنتاج است:

$$P_{yb} = \frac{nb^2 t F_y}{3h} \quad (4)$$



شکل ۹. رفتار دوره‌یی نیرو - تغییر مکان نمونه‌ها.

$h/b$  کمتر تلقی شود؛ زیرا با افزایش تعداد ردیف پره‌ها می‌توان ظرفیت تغییر مکانی آنها را افزایش داد. توجه به این موضوع که در بخش ۵ به آن پرداخته شده است از مباحث کلیدی این مقاله محسوب می‌شود.

در شکل ۱۰ تغییر شکل یافته نمونه‌های DSSH ۱ و DSDH ۱ در موقعیت بیشینه‌ی ظرفیت نیروی آنها ارائه شده است.

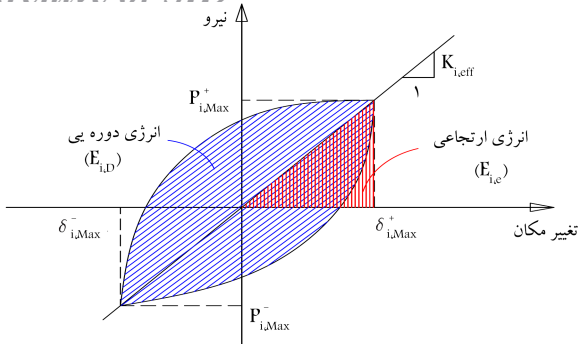
با توجه به این که این دو نمونه دارای کمترین نسبت  $h/b$  در گروه خود هستند بیشترین ظرفیت نیرو را از خود نشان داده‌اند. تغییر شکل این نمونه‌ها نشان می‌دهد که تسلیم در ناحیه‌ی خود پره اتفاق افتاده و ناحیه خارج از پره تغییر شکل محسوسی نکرده است؛ این موضوع مؤید فرضیات مطرح شده برای ساده‌سازی روابط در بخش روابط تحلیلی است.

در شکل ۱۱ منحنی پوش نمونه‌ها ارائه شده است. نتایج به دست آمده از منحنی پوش نشان می‌دهد که نمونه‌های دارای دو ردیف پره دارای ظرفیت باربری

مقادیر نیروی بیشینه و تغییر مکان حداکثر که بیانگر ظرفیت نیرو و تغییر مکان هر نمونه است درج شده است.

مقادیر تغییر مکان بیشینه با این قید که ظرفیت نیروی نظیر آن بیش از ۲۰ درصد از بیشینه نیروی نمونه کاهش نیافته باشد به دست آمده است. با توجه به مقایسه‌ی مقادیر نیروی بیشینه نمونه‌ها، می‌توان عنوان کرد که با کاهش مقدار  $h/b$  (ارتفاع پره‌ها) مقادیر نیروی بیشینه (ظرفیت نیرویی یا باربری) افزایش می‌یابد.

مقایسه‌ی مقادیر ظرفیت تغییر مکان‌ها اگرچه به طور کلی بیانگر روند کاملاً منظمی نبود، اما نشان داد که ظرفیت تغییر مکانی نمونه‌های DSDH که به طور کلی دارای نسبت  $h/b$  کمتری در مقایسه با نمونه‌های DSSH هستند، کاهش یافته است. لازم به یادآوری است که کاهش نسبت  $h/b$  به معنای غالب شدن رفتار برشی در پره‌ها بر... رفتار خمشی آنهاست. شایان توجه است که این موضوع (کاهش ظرفیت تغییر مکانی با کاهش  $h/b$ ) نباید لزوماً به معنای ضعف نمونه‌های دارای



شکل ۱۲. سختی مؤثر و انرژی دوری در بارگذاری دوره‌یی.

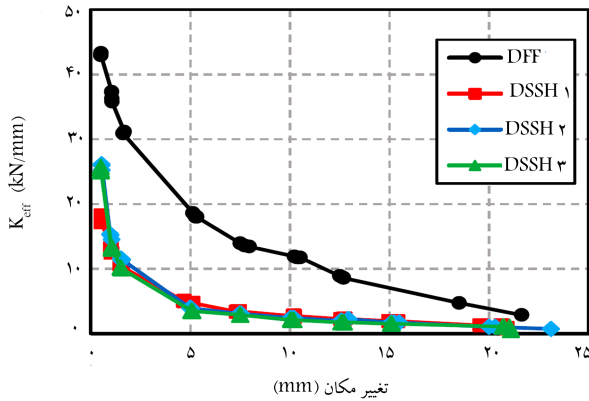


الف) تغییر شکل نمونه ۱ DSDH در موقعیت بیشینه نیرو

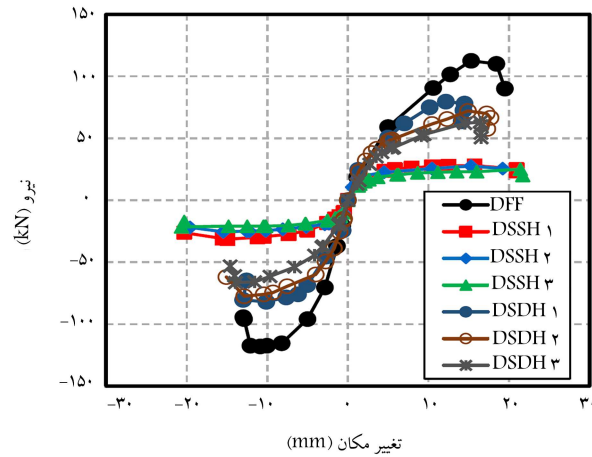


ب) تغییر شکل نمونه ۱ DSSH در موقعیت بیشینه نیرو.

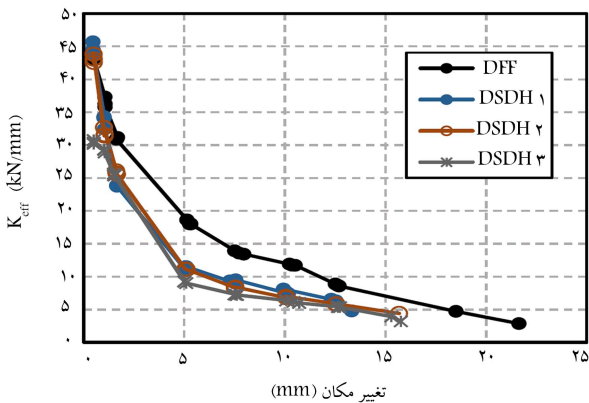
شکل ۱۰. تغییر شکل نمونه‌های ۱ DSDH و ۱ DSSH.



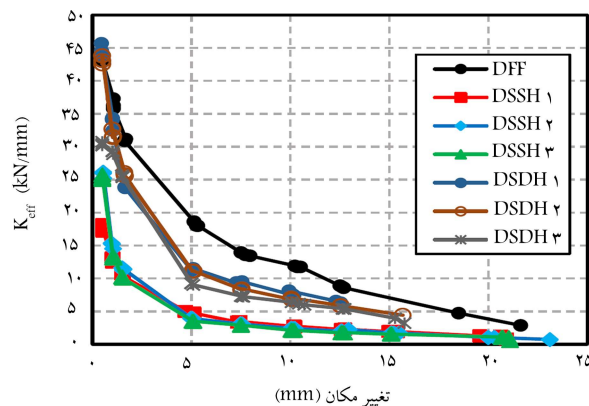
شکل ۱۳. سختی مؤثر نمونه‌های یک ردیف پره.



شکل ۱۱. منحنی پوش نمونه‌ها.



شکل ۱۴. سختی مؤثر نمونه‌های دو ردیف پره.



شکل ۱۵. مقایسه‌ی سختی نمونه‌ها با یکدیگر.

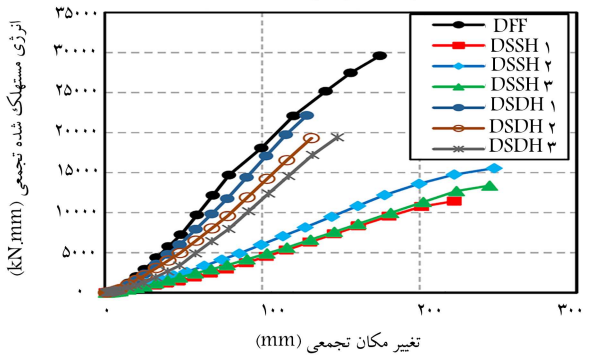
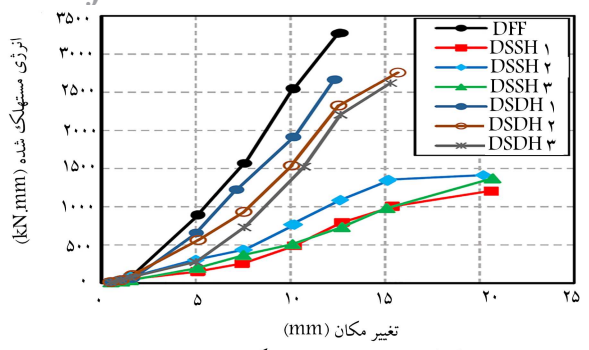
بهتری نسبت به نمونه‌های تک‌ردیف پره هستند. از ملاحظه‌ی این منحنی‌ها مشاهده می‌شود که ظرفیت تغییر مکانی نمونه‌های دارای دو ردیف پره نسبت به نمونه‌های با یک ردیف پره حدود ۱۷ درصد کاهش یافته است. به عبارت دیگر مشاهدات اولیه حاکی از آن است که تمایل به سمت رفتار برشی تا حدی از ظرفیت تغییر مکانی نمونه‌ها کاسته است. با توجه به نتایج به دست آمده می‌توان گفت نمونه دارای دو ردیف پره در یک  $h/b$  معین می‌تواند رفتار بهتری از سایر نمونه‌های یک ردیفه و دو ردیفه از خود نشان دهد.

#### ۲.۴. سختی مؤثر

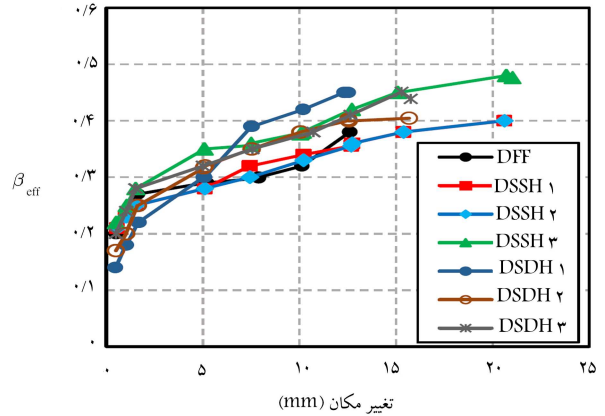
با استفاده از سختی مؤثر می‌توان انرژی ارتجاعی میراگر در هر چرخه را محاسبه کرد، این انرژی تمایل دارد که میراگر را به وضعیت اولیه‌ی آن بازگرداند. واضح است که با وارد شدن میراگر به فاز خمیری این انرژی برای برگرداندن میراگر به وضعیت اولیه کافی نبوده و عمده این انرژی از طریق نیروی خارجی اعمال شده تأمین می‌شود. در شکل ۱۲ انرژی ارتجاعی و انرژی دوری تلف شده در یک چرخه ارائه شده است. از رابطه‌ی ۸ می‌توان برای محاسبه‌ی سختی مؤثر ( $k_{i,eff}$ ) استفاده کرد:

$$k_{i,eff} = \frac{(|P_{i,max}^+| + |P_{i,max}^-|)}{(|\delta_{i,max}^+| + |\delta_{i,max}^-|)} \quad (8)$$

تمامی پارامترهای به کار رفته در این رابطه در شکل ۱۲ تعریف [۱۷] و نشان داده شده است. در شکل‌های ۱۳ تا ۱۵ تغییرات سختی مؤثر نمونه‌ها بر حسب تغییر



شکل ۱۶. انرژی مستهلک شده در هر دوره و انرژی مستهلک شده‌ی تجمعی.



شکل ۱۷. میرایی مؤثر (میرایی ویسکوز معادل).

ردیف پره را که رفتار خمشی در آنها غالب‌تر است نشان می‌دهند؛ اما نمونه‌ی مرجع (توپرا) که دارای بیشترین رفتار برشی است میرایی مؤثر کمتری را نسبت به نمونه‌های با دو ردیف پره نشان می‌دهد. میزان متوسط افزایش میرایی مؤثر در میراگرهای با دو ردیف پره نسبت به نمونه‌ی مرجع و نمونه‌های با یک ردیف پره در حدود (۰/۰۸ تا ۰/۲۵) برابر افزایش) است. افزایش میرایی مؤثر در کاهش پاسخ سازه، به خصوص در پاسخ به زلزله‌های حوزه‌ی نزدیک بسیار مهم بوده و در کاهش آسیب و خسارت وارده به آنها نقش قابل توجهی ایفا می‌کند.

### ۵. بهبود عملکرد میراگر با افزایش تعداد ردیف پره‌ها

در بخش رفتار دوره‌ی نمونه‌ها اشاره شد که با گرایش بیشتر نمونه‌ها به سمت رفتار برشی، ظرفیت تغییر مکانی آنها تا حدی کاهش می‌یابد. از طرف دیگر در بخش

مکان آنها ارائه شده است. در شکل ۱۳ نمونه‌های یک ردیف پره به همراه نمونه‌ی مرجع (نمونه‌ی توپرا)، در شکل ۱۴ نمونه‌های دو ردیف پره به همراه نمونه‌ی مرجع (نمونه‌ی توپرا) و در شکل ۱۵ تمام نمونه‌ها با یکدیگر مقایسه شده است.

روند تغییرات منحنی‌های سختی مؤثر، بیان می‌دارد که در تغییر مکان‌های کوچک سختی مؤثر به طور کلی زیاد بوده و با افزایش تغییر مکان مقدار آن سریعاً کاهش یافته و به سمت مقدار ثابتی گرایش پیدا می‌کند. همانطور که انتظار می‌رفت ارتفاع پره‌ها تأثیر زیادی در میزان سختی مؤثر داشته است. رفتار نمونه‌ها همچنین حاکی از آن است که با افزایش بیشتر تغییر مکان، اختلاف سختی مؤثر نمونه‌ها به سرعت کاهش می‌یابد. مقایسه‌ی این نمودارها نشان می‌دهد که سرعت کاهش سختی مؤثر در نمونه‌های با یک ردیف پره (نمونه‌های DSSH که رفتار خمشی در آنها غالب‌تر است) بسیار سریع‌تر است از نمونه‌های با دو ردیف پره (نمونه‌های DSDH که رفتار برشی در آنها غالب‌تر است). واضح است که سرعت نرم‌شوندگی بالا (افت سختی شدید) در سازه‌ها مطلوب نیست و نیز احتمال وقوع پدیده‌ی طبقه‌ی نرم را افزایش می‌دهد. میزان سختی مؤثر نمونه‌های با دو ردیف پره نسبت به نمونه‌های با یک ردیف پره، با فرض ثابت بودن ارتفاع کل (h<sub>o</sub>) نمونه، افزایشی در حدود ۲ برابر را نشان می‌دهد.

### ۳.۴. انرژی تلف شده و میرایی ویسکوز معادل

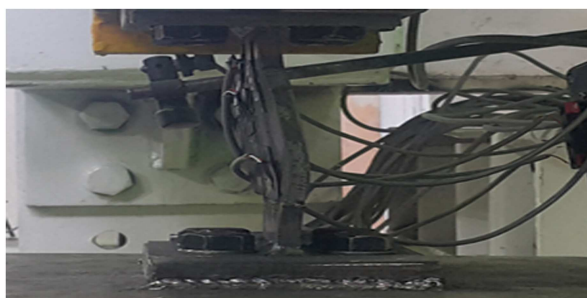
انرژی مستهلک شده در هر چرخه و انرژی مستهلک شده‌ی تجمعی نمونه‌های مورد بررسی در شکل ۱۶ ارائه شده است. چنان که مشاهده می‌شود انرژی تلف شده در نمونه‌های با دو ردیف پره بسیار بیشتر از نمونه‌های با یک ردیف پره است. به عبارت دیگر می‌توان گفت که با حاکم شدن رفتار برشی انرژی تلف شده نیز افزایش می‌یابد به نحوی که در هر دسته از نمونه‌ها (DSSH یا DSDH) با کاهش نسبت h/b انرژی بیشتری توسط نمونه مورد نظر جذب می‌شود. مشاهده‌ی این منحنی‌ها از طرف دیگر بیانگر آن است که گرایش نمونه‌ها به سمت رفتار برشی تا حدی می‌تواند باعث کاهش ظرفیت تغییر مکانی آنها شود. در بخش ۵ نشان داده خواهد شد که با افزایش تعداد ردیف پره‌ها می‌توان این نقیصه را جبران کرد.

در شکل ۱۷ میزان میرایی ویسکوز معادل بر حسب تغییر مکان برای هر میراگر ارائه شده است. میرایی ویسکوز معادل یا میرایی مؤثر که رفتار یک سیستم غیرخطی را با یک سیستم خطی با میرایی ویسکوز معادل سازی می‌کند در واقع بیانگر نسبتی از انرژی تلف شده به انرژی ارتجاعی حاصل از سختی سکانتی در تغییر مکان بیشینه (سختی مؤثر) در هر چرخه است. میرایی مؤثر را با توجه به شکل ۱۲ می‌توان از رابطه‌ی ۹ محاسبه کرد.<sup>[۱۷]</sup>

$$\beta_{i \text{ eff}} = \frac{E_i D}{4\pi E_i e} = \frac{2E_i D}{\pi k_{i \text{ eff}} (|\delta_{i \text{ max}}^+| + |\delta_{i \text{ max}}^-|)^2} \quad (9)$$

که در آن  $\beta_{i \text{ eff}}$  میرایی مؤثر مربوط به چرخه‌ی iام است. سایر پارامترهای بکار رفته در این رابطه نیز قبلاً در شکل ۱۲ تعریف و ارائه شده است.

ملاحظه‌ی روند تغییرات هر منحنی به تنهایی نشان می‌دهد که با افزایش تغییر مکان و به تبع آن افزایش خمیری شدن میراگر، در ابتدا میزان میرایی مؤثر به سرعت افزایش یافته و پس از رسیدن به یک مقدار بیشینه با یک شیب ملایم کاهش می‌یابد. مقایسه‌ی منحنی‌ها با هم نشان می‌دهد که غالب شدن رفتار برشی تا یک حد معین می‌تواند میرایی مؤثر را افزایش دهد. به عبارت دیگر نمونه‌های با دو ردیف پره که رفتار برشی در آنها غالب‌تر است عمده‌تاً میرایی مؤثر بیشتری از نمونه‌های با یک



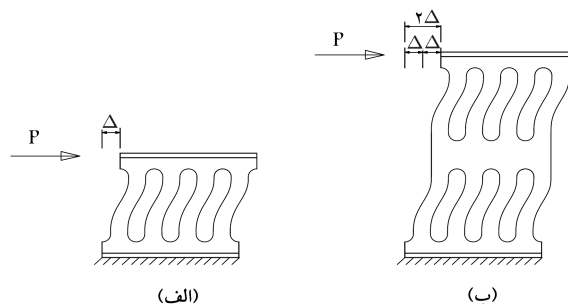
شکل ۱۹. کمانش کلی در نمونه DSDH1.

نسبت لاغری  $h_0/t$  برای دو نمونه‌ی ذکر شده به ترتیب برابر ۱۲/۵ و ۱۰ است. با توجه به این که دو نمونه‌ی مذکور در مطالعه‌ی آزمایشگاهی تحت بارگذاری دوره‌یی اعمال شده دچار کمانش کلی شدند، کمترین مقدار توصیه شده برای نسبت  $h/b$  برابر ۱/۵۸ (مربوط به نمونه DSDH2 که نسبت لاغری آن برابر ۱۱/۲۵ است) پیشنهاد می‌شود. با فرض خطی بودن رابطه‌ی کمانش بین نسبت‌های  $h_0/t$  و  $h/b$  برای سایر نسبت‌های  $h_0/t$  می‌توان از تناسب استفاده کرد؛ به این ترتیب که مثلاً اگر مقدار  $h_0/t$  دو برابر شود حداقل مقدار توصیه شده برای  $h/b$  نیز دو برابر می‌شود. در هر حال استفاده از تحلیل‌های نظری، مدل‌های عددی یا مطالعات آزمایشگاهی جدید برای سایر نسبت‌های  $h/t$  نیز قابل کاربرد و توصیه است.

## ۷. نتیجه‌گیری

در این تحقیق، تعدادی نمونه میراگر تسلیمی شکاف‌دار با نسبت‌های مختلفی از طول به عرض پره ( $h/b$ )، به صورت یک ردیفه و دوردیفه مورد مطالعه‌ی آزمایشگاهی قرار گرفت. نمونه‌های مورد نظر تحت بارگذاری دوره‌یی استاتیکی قرار گرفت و پس از پردازش داده‌های به دست آمده از انجام آزمایش‌ها، نتایج زیر حاصل شد:

۱. نتایج اولیه‌ی به دست آمده از بارگذاری دوره‌یی نشان داد که با کاهش نسبت طول به عرض پره‌ها و حاکم شدن رفتار برشی در پره‌ها ظرفیت نیرویی میراگرها افزایش می‌یابد، اما ظرفیت تغییر مکانی آنها حدود ۱۷٪ کاهش می‌یابد.
۲. مقایسه‌ی پارامتر سختی مؤثر نمونه‌ها نشان داد که سختی مؤثر در میراگرهای با رفتار غالب در خمش، با افزایش تغییر مکان و گسترش تسلیم فولاد، مقدار این پارامتر به سرعت دچار افت و کاهش شدید می‌شود اما هرچه رفتار میراگرها به سمت رفتار برشی گرایش پیدا کند، نرخ کاهش سختی مؤثر آرامتر و با سرعت کمتری اتفاق می‌افتد. این موضوع در جلوگیری از وقوع افت ناگهانی مقاومت و کاهش سرعت سازوکار خرابی در سازه و همچنین بهبود عملکرد کلی سازه حائز اهمیت است. با ثابت بودن ارتفاع نمونه‌ها و سایر مشخصات، سختی مؤثر نمونه‌های با دو ردیف پره در حدود ۲ برابر نمونه‌های با یک ردیف پره مشاهده شد.
۳. مقایسه‌ی انرژی‌های تلف شده بین میراگرهای با رفتار خمشی و رفتار برشی بیانگر جذب انرژی بالاتر در میراگرهای با رفتار برشی است.
۴. بررسی تغییرات میرایی مؤثر میراگرها نشان داد که غالب شدن رفتار برشی تا یک حد معین، می‌تواند باعث افزایش ۱/۲۵ برابری میرایی مؤثر نسبت به نمونه‌های با رفتار خمشی شود.
۵. در این تحقیق نشان داده شد که افزایش تعداد ردیف پره‌ها می‌تواند ظرفیت



شکل ۱۸. افزایش تغییر مکان میراگر با افزایش تعداد ردیف پره‌ها به ازای یک نیروی ثابت.

مربوط به مقایسه‌ی انرژی تلف شده نمونه‌ها نیز مشخص شد که میزان جذب انرژی در نمونه‌هایی که رفتار برشی در آنها غالب‌تر است بیشتر است، اما ظرفیت تغییر مکانی این نمونه‌ها تاحدی کاهش یافته است. برای دستیابی به میراگری که دارای جذب انرژی بالا و در عین حال ظرفیت تغییر مکانی بالا باشد، ایده‌ی پیشنهادی در نوشتار حاضر این است که از یک طرف با پایین نگه داشتن نسبت  $h/b$  تا یک حد بهینه (برای این که رفتار برشی حاکم شود) و از طرف دیگر با افزایش تعداد ردیف پره‌ها می‌توان به این هدف دست یافت. در بیان این که افزایش تعداد ردیف پره‌ها چگونه می‌تواند ظرفیت تغییر مکانی میراگر را افزایش دهد، چنانچه مطابق شکل ۱۸ یک میراگر با یک ردیف پره (شکل الف) و یک میراگر با دو ردیف پره (شکل ب) در نظر گرفته شود، ملاحظه می‌شود که تحت یک نیروی معین تغییر مکان میراگر با دو ردیف پره دو برابر میراگر یک ردیفه خواهد بود.

از سوی دیگر چنانچه فرض شود با افزایش نیرو هر دو میراگر نشان داده شده تبدیل به سازوکار شوند، با در نظر گرفتن این که در دو انتهای همه‌ی پره‌ها مفصل خمیری تشکیل شود نیروی بیشینه (ظرفیت نیرویی) هر دو میراگر با هم برابر خواهد بود؛ با این توضیح که میراگر با تعداد ردیف بیشتر، دیرتر (در تغییر مکان بزرگ‌تر) به این ظرفیت نیرویی می‌رسد. از بحث مطرح شده می‌توان نتیجه گرفت که افزایش تعداد ردیف پره‌ها می‌تواند باعث افزایش ظرفیت تغییر مکانی میراگر شود. برای دستیابی به رفتار دلخواه و مطلوب (برحسب نیاز سازه یا مدنظر طراح) از میراگر، استفاده از مدل‌های عددی کالیبره شده با نتایج آزمایشگاهی (اما با تعداد ردیف مورد نظر) بر اساس قضاوت مهندسی حاصل از ایده‌ی مطرح شده در این بخش، قابل توصیه است.

## ۶. کمانش و میزان بهینه‌ی $h/b$

در بخش‌های قبلی بیان شد که کاهش نسبت  $h/b$  باعث تمایل رفتار میراگر به سمت رفتار برشی شده و در نتیجه رفتار و عملکرد مطلوب‌تری را می‌توان از آن انتظار داشت. با توجه به این که با کاهش  $h/b$ ، سختی میراگر افزایش می‌یابد احتمال این که میراگر قبل از رسیدن به ظرفیت بیشینه‌اش، دچار کمانش کلی شود نیز افزایش می‌یابد. بنابراین می‌توان گفت که کاهش دادن  $h/b$  تا اندازه‌یی مجاز و بهینه است که منجر به کمانش کلی یا جانبی میراگر نشود. در بین نمونه‌های مورد مطالعه ابتدا نمونه‌ی DFF با نسبت  $h/b = ۱/۰۹$  و بعد از آن نمونه DSDH1 با نسبت  $h/b = ۱/۲۸$  دارای پایین‌ترین نسبت  $h/b$  هستند. با توجه به این که وقوع کمانش کلی به لاغری نمونه مرتبط است نسبت  $h_0/t$  را می‌توان برای بیان میزان لاغری میراگر در نظر گرفت. وقوع کمانش کلی در نمونه DSDH1 در شکل ۱۹ نشان داده شده است.



است، اما با افزایش پره‌ها به دلیل کاهش فاصله بین هر دو پره و تشابه نمونه دارای پره با نمونه‌ی توپر، می‌توان گفت که با افزایش پره می‌توان به سختی و ظرفیت باربری مشابه با نمونه بدون پره دست یافت. در نتیجه می‌توان گفت هرچه تعداد پره‌ها بیشتر باشد می‌توان رفتار و عملکرد مشابه نمونه توپر و در برخی ویژگی‌ها رفتاری بهتر از آن را شاهد بود.

۸. در نمونه‌هایی که دارای دو ردیف پره هستند، انرژی تلف شده در هر دوره بیشتر از نمونه‌ی دارای یک ردیف پره است. بر همین اساس خرابی و آسیب وارده به سازه کاهش می‌یابد.

۹. در نهایت با توجه به نتایج به دست آمده می‌توان گفت، نمونه‌ی دارای دو ردیف پره با یک نسبت معین  $h/b$  دارای بازده و شرایط بهتری نسبت به نمونه‌های دارای یک ردیف پره است و نسبت به نمونه‌ی مرجع نیز می‌تواند میرایی بالاتری از خود نشان دهد.

تغییر مکانی میراگر را افزایش دهد. در نتیجه با کاهش نسبت طول به عرض پره و افزایش تعداد ردیف پره‌ها می‌توان به یک میراگر با عملکرد مطلوب‌تر نیز دست یافت.

۶. کاهش نسبت طول به عرض پره باعث افزایش سختی میراگر شده و این موضوع با افزایش تغییر مکان می‌تواند باعث کم‌انرژی‌گی میراگر و عدم دستیابی به ظرفیت بیشینه‌ی آن شود. کمترین مقدار مجاز توصیه شده برای نسبت طول به عرض پره بستگی به نسبت ارتفاع به ضخامت میراگر (که معیاری از لاغری میراگر است) دارد. برای نسبت لاغری ۱۱/۲۵ نسبت ۱/۵۸ برای نسبت طول به عرض پره پیشنهاد شد.

۷. افزایش پره در افزایش سختی و ظرفیت باربری میراگر مؤثر است. البته در مقایسه با نمونه‌ی توپر (بدون پره) سختی و ظرفیت باربری نمونه توپر به مراتب بیشتر

## پانویس‌ها

1. steel slit damper (SSD)
2. low cycle fatigue
3. linear variable displacement transformer (LVDT)
4. setup
5. load cell

## منابع (References)

1. Benavent-Climent, A. "A brace-type seismic damper based on yielding the walls of hollow structural sections", *Engineering Structures*, **32**(4), pp. 1113-1122 (2010).
2. Whittaker, A.S., Bertero, V.V., Thompson, C.L. and et al. "Seismic testing of steel plate energy dissipation devices", *Earthquake Spectra*, **7**(4), pp. 563-604 (1991).
3. Mohammadi, R.K., Nasri, A. and Ghaffary, A. "TADAS dampers in very large deformations", *International Journal of Steel Structures*, **17**(2), pp. 515-524 (2017).
4. Li, H.-N. and Li, G. "Experimental study of structure with "dual function" metallic dampers", *Engineering Structures*, **29**(8), pp. 1917-1928 (2007).
5. Nateghi-Alahi, F. and Torbat Esfahani, M. "Ea aboamd-bitnols", *Sharif Journal of Civil Engineering*, **31.2**(3.1), pp. 19-29, (2015).
6. Deng, K., Pan, P., Li, W. and et al. "Development of a buckling restrained shear panel damper", *Journal of Constructional Steel Research*, **106**, pp. 311-321 (2015).
7. Oh, S.-H., Kim, Y.-J. and Ryu, H.-S. "Seismic performance of steel structures with slit dampers", *Engineering Structures*, **31**(9), pp. 1997-2008 (2009).
8. Deng, K., Pan, P., Sun, J. and et al. "Shape optimization design of steel shear panel dampers", *Journal of Constructional Steel Research*, **99**, pp. 187-193 (2014).
9. Zhu, B., Wang, T. and Zhang, L. "Quasi-static test of assembled steel shear panel dampers with optimized shapes", *Engineering Structures*, **172**, pp. 346-357 (2018).
10. Xu, L.-Y., Nie, X. and Fan, J.-S. "Cyclic behaviour of low-yield-point steel shear panel dampers", *Engineering Structures*, **126**, pp. 391-404 (2016).
11. Chan, R.W. and Albermani, F. "Experimental study of steel slit damper for passive energy dissipation", *Engineering Structures*, **30**, pp. 1058-1066 (2008).
12. Teruna, D.R., Majid, T.A. and Budiono, B. "Experimental study of hysteretic steel damper for energy dissipation capacity", *Advances in Civil Engineering*, **2015**, pp.311-323 (2015).
13. Zheng, J., Li, A. and Guo, T. "Analytical and experimental study on mild steel dampers with non-uniform vertical slits", *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, **14**(1), pp. 111-123, (2015).
14. Lee, C.-H., Ju, Y.K., Min, J.-K. and et al. "Non-uniform steel strip dampers subjected to cyclic loadings", *Engineering Structures*, **99**, pp. 192-204 (2015).
15. Ahmadi Amiri, H., Najafabadi, E.P. and Estekanchi, H.E. "Experimental and analytical study of block slit damper", *Journal of Constructional Steel Research*, **141**, pp. 167-178 (2018).
16. Applied Technology Council, ATC-24, Guidelines for Cyclic Seismic Testing of Component of Steel structures, Redwood City, CA (1992).
17. Chopra, A.K. Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering: Prentice Hall Englewood Cliffs, NJ, (1995).