

Experimental and numerical evaluation of two-level pipe damper

Hossein Tizhoosh Sardroodi¹, Elham Moaddab^{2*}

1- Student of Master degree, Seraj higher education institute, Tabriz, Iran

2- Assistant professor, Seraj higher education institute, Tabriz, Iran

ABSTRACT

In this paper, a new kind of ring damper composed of three rings is introduced and investigated numerically and experimentally. The proposed damper combined three steel ring damper in order to dissipate energy of two different level of predefined excitation such as moderate and severe one. first fuse (outer pipe) and second fuse (inner pipes) can absorb energy in moderate and severe earthquakes respectively. To evaluate the introduced damper, numerical finite element models are developed to clarify the effect of thickness and diameter variation of main fuse. Results of force- displacement curves obtained from cyclic loading confirmed the two level performance of models. Stiffness and fore increase improved the energy dissipation capacity after the predefined displacement gap. Also, damping ratio are calculated for all samples and results showed that equivalent damping ratio have been improved when main fuse was engaged. Two experimental samples have been constructed based on numerical models and examined under cyclic loading. Defined results of experiments showed that samples could tolerate 20 cycles of 10 times of yield displacement amplitude. Good agreement between numerical model and experimental samples results have been achieved.

ARTICLE INFO

Receive Date: 08 February 2019

Revise Date: 17 May 2019

Accept Date: 08 June 2019

Keywords:

Pipe damper

Severe earthquakes

Moderate earthquakes

Energy dissipation

Damping

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/JSCE.2019.171319.1780

*Corresponding author: Elham Moaddab

Email address: e.moaddab@seraj.ac.ir

بررسی آزمایشگاهی و عددی میراگر لوله‌ای دوسطحی

حسین تیزهوش سردرودی^۱، الهام مودب^{۲*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران سازه، موسسه ی آموزش عالی غیرانتفاعی و غیر دولتی سراج، تبریز، ایران

۲- استادیار، موسسه‌ی آموزش عالی غیر انتفاعی و غیر دولتی سراج، تبریز، ایران

چکیده

در این مطالعه به بررسی عددی و آزمایشگاهی میراگر لوله‌ای جدید تشکیل شده از سه حلقه پرداخته شده است. میراگر مورد بررسی از ترکیب سه حلقه فولادی تو در تو تشکیل شده است که قادر به اتلاف انرژی در دوسطح مختلف تحریک متفاوت می‌باشد. فیوز اول (حلقه بیرونی) در تحریکهای با دامنه کم و فیوز دوم (حلقه‌های داخلی) در تحریکهای با دامنه زیاد انرژی ورودی را جذب می‌نماید. به این منظور مدل‌های عددی با ساختار پیشنهادی برای میراگر لوله‌ای دوسطحی با تغییرات قطر و ضخامت در فیوز اول تحت بارگذاری چرخه‌ای قرار گرفت و منحنی نیرو تغییرمکان برای مدل‌ها به دست آمد. نتایج نشان داد پیکربندی پیشنهادی به خوبی عملکرد دو سطحی میراگر را تامین می‌کند. افزایش سختی و نیروی قابل تحمل بعد از تاخیر تغییرمکانی باعث افزایش میزان جذب انرژی در سیکل‌های بالاتر شد. بررسی میرایی معادل محاسبه شده در مدل‌ها نشان داد استفاده از فیوز دوم در تغییرمکان‌های زیاد موجب شده است که میرایی در بازه‌ی تغییرمکانی لازم بهبود یابد.

دو نمونه‌ی آزمایشگاهی منطبق بر مدل‌های عددی، ساخته شد و تحت بارگذاری چرخه‌ای با دامنه‌ی ثابت قرار گرفت. نتایج ثبت شده از آزمایش نشان داد هر دو نمونه بدون افت مقاومت توانستند تا تغییرمکان ۱۰ برابر تغییرمکان تسلیم در ۲۰ چرخه‌ی متوالی را تحمل کنند. همچنین تطابق مناسبی بین نتایج مدل‌های عددی آزمایشگاهی به دست آمد

کلمات کلیدی: میراگر لوله‌ای، تحریک شدید، تحریک متوسط، اتلاف انرژی، میرایی

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	10.22065/JSCE.2019.171319.1780	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2019.171319.1780	۱۴۰۰/۰۳/۳۰	۱۳۹۸/۰۳/۱۸	۱۳۹۸/۰۳/۱۸	۱۳۹۸/۰۲/۲۷	۱۳۹۷/۱۱/۱۹
الهام مودب e.moaddab@seraj.ac.ir				*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:		

۱- مقدمه

مشاهدات میدانی در خرابی‌های به وجود آمده در زمین‌لرزه‌های کوبه و نورتریج مشخص کرد سازه‌هایی که حتی بر اساس آیین‌نامه‌های مهندسی طراحی و ساخته شده بودند نیز آسیب‌های زیادی متحمل شده بودند [۱]. خرابی اجزای سازه‌ای به نحوی بود که عملاً استفاده از سازه‌ها را بعد از زمین‌لرزه غیر ممکن ساخته بود و یا بهسازی ساختمانهای آسیب دیده غیر اقتصادی تشخیص داده شد. پس از زمین‌لرزه‌های یاد شده کنترل و هدایت خرابی‌های سازه‌ای به اعضا تحت عنوان فیوزهای سازه‌ای یکی از راهکارهای مناسبی بود که مورد توجه مهندسين سازه قرار گرفت. این المانها تحت عنوان اجزای شکل‌پذیر (فیوز) با قابلیت جذب انرژی بالا قادر به کاهش نیروهای لرزه‌ای وارد بر دیگر اعضا (اعضای نیرویی)، بهبود میرایی و شکل‌پذیری سازه در زمین‌لرزه‌های شدید هستند.

طراحی المان‌های تلف‌کننده انرژی یا فیوزها روند حساسی است که عدم انتخاب دقیق ظرفیت آنها و تناسب آن با نیروی ورودی زلزله می‌تواند باعث افزایش زیاد سختی و در نتیجه افزایش نیروی اعمال شده بر اعضای نیرویی شود. اگر چه تناسب نیروی ورودی و ظرفیت برای این المانها در زمین‌لرزه‌های با شدت زیاد از طریق پلاستیک شدن فیوزها برقرار می‌شود ولی تا زمانی که شدت تحریکهای وارده کمتر از زمین‌لرزه‌ی طرح باشد، رفتار الاستیک فیوزها موجب برهم خوردن این تناسب می‌شود [۲]. افزایش سختی سازه، افزایش نیرو در اعضای نیرویی و عدم اتلاف انرژی در زمین‌لرزه‌های متوسط، مفهوم جدید فیوزهای ترکیبی را مطرح کرده است که ترکیبی از چند سیستم اتلاف انرژی برای کنترل یا جذب انرژی در سطوح مختلف تحریک می‌باشد.

اخیراً میراگرهای ترکیبی جهت افزایش بازه‌ی عملکردی میراگرهای غیرفعال به صورت متناسب با نیروی ورودی زلزله معرفی شده‌اند. اساس پیشنهاد این نوع میراگرها به منظور استفاده از یک دستگاه واحد برای کنترل سطوح مختلف ارتعاش استوار است. سیستم‌های کنترل ترکیبی در واقع باعث کاهش برخی محدودیت‌های موجود در هر یک از سیستم‌های کنترل معمول (وابسته به تغییر مکان یا وابسته به سرعت) می‌شوند، در نتیجه این سیستم‌ها قادر به اتلاف انرژی در سطوح مختلفی از شدت‌های ارتعاش هستند. عملکرد ترکیبی مناسب میراگرهای پیشنهاد شده می‌تواند برخی ضعف‌های میراگرهای وابسته به سرعت و تغییر مکان را جبران می‌کند. ترکیبات متفاوتی از میراگرهای وابسته به تغییر مکان با انواع وابسته به سرعت آن برای کنترل دو سطح نیروی جانبی ناشی از باد و زلزله در سالهای اخیر پیشنهاد شده است. به عنوان نمونه در سال ۲۰۰۷ میراگر ویسکو پلاستیک با ورق‌های فلزی تسلیمی توسط ایراهیم و همکاران معرفی شد. هدف آنها اثر برقراری تعادل مناسب بین سختی و میرایی ایجاد شده توسط رفتار ترکیبی این دو میراگر در سازه بود به نحوی که میراگر پیشنهادی می‌توانست در بازه‌های کوچک تغییر مکان از مزایای میراگر وابسته به سرعت از نوع ویسکو پلاستیک استفاده کند و در تغییر مکانهای بزرگتر عملکرد ترکیبی میراگر ویسکو پلاستیک و میراگر فلزی میرایی سازه را افزایش می‌داد [۳]. نوع دیگری از ترکیب میراگرها برای بهبود رفتار بادبندهای کمانش‌تاب قبل از رسیدن به تسلیم با میراگرهای ویسکوز پیشنهاد شد. با این ترکیب میراگرهای ویسکوز قادر به اتلاف انرژی در محدوده‌ای از تغییر مکانهای مربوط به زلزله‌های متوسط یا ارتعاشات ناشی از باد می‌شدند [۴]. موارد مشابه دیگری به همین منظور توسط محققان مورد ارزیابی و تحقیق قرار گرفت. نتایج تحلیلهای لرزه‌ای در نشان داد علی‌رغم مزیت‌های میراگرهای ترکیبی، در برخی موارد استفاده از ترکیب میراگرهای وابسته به تغییر مکان و سرعت از اثر بخشی میراگرهای وابسته به سرعت می‌کاهد [۵-۷].

میراگرهای وابسته تغییر مکان از انواع میراگرهایی هستند که به دلیل ساده بودن تکنولوژی ساخت، بیش از دیگر انواع میراگرها مورد توجه قرار گرفته‌اند. مثالی از سیستم‌های اتلاف انرژی وابسته به تغییر مکان شامل انواع مختلفی از میراگرهای اصطکاکی [۸، ۹] و میراگرهای تسلیمی [۱۰، ۱۱] یا بادبندهای کمانش‌تاب [۱۲] هستند که ترکیبات مختلفی از آنها برای کنترل سطوح متفاوتی از ارتعاش ناشی از زمین‌لرزه پیشنهاد شده است. لی و همکاران در سال ۲۰۱۷ ترکیبی از دو میراگر تسلیمی TADAS و اصطکاکی ارائه دادند که قادر بود در زمین‌لرزه‌های متوسط با قسمت اصطکاکی و در زمین‌لرزه‌های با شدت بیشتر با ترکیب هر دو قسمت تسلیمی و اصطکاکی انرژی وارده را تلف کند [۱۳]. ترکیب دو میراگر از نوع بادبندهای کمانش‌تاب [۱۴] و ترکیب میراگر TADAS [۱۵] نیز از انواع میراگرهایی است که به همین منظور در سالهای اخیر مورد توجه قرار گرفته است.

میراگرهای لوله‌ای از جمله میراگرهای ساده و مورد توجهی است که در ابتدا برای مستهلک کردن ضربه‌های ناشی از برخورد در وسایل نقلیه مورد استفاده قرار گرفته است [۱۶]. ظرفیت شکل‌پذیری بالای لوله‌ها، کاربرد آنها را در سازه‌ها مطرح ساخته است [۱۷]. تحقیقات گسترده‌ای در زمینه‌ی به کارگیری لوله‌ها در انتهای مهاربندها به عنوان فیوز انجام یافته است. نتایج مطالعات عددی و آزمایشگاهی حاکی از رفتار پایدار چرخه‌ای مهاربندهای مجهز به لوله‌های فلزی است [۱۸، ۱۹]. ترکیب میراگرهای لوله‌ای توسط زهرایی و همکاران نیز مورد توجه واقع شد [۲۰]. این محققین در یک بررسی جامع با ترکیب لوله‌های هم‌مرکز توانستند میراگری دوسطحی برای زمین‌لرزه پیشنهاد دهند [۲۱].

با توجه به مزایای استفاده از میراگرهای لوله‌ای در بهبود اتلاف انرژی و رفتار چرخه‌ای بادبندها، در این مطالعه میراگر حلقوی دوسطحی‌ای پیشنهاد شده است که بتواند به منظور ایجاد روند اتلاف انرژی از پیش تعیین‌شده‌ای را فراهم کند. به نحوی که هم در زلزله‌های با شدت متوسط و هم در زمین لرزه‌های شدید انرژی وارد از تحریک زمین‌لرزه را جذب کند. در مکانیزم تعریف شده برای میراگر پیشنهادی فیوز دوم بدون ورود به مرحله تسلیم کارایی خود را برای عملکرد در زلزله‌های سطح شدید حفظ می‌نماید ولی در زلزله‌های سطح بالاتر (زمین‌لرزه‌ی طرح) هر دو سیستم به صورت یک سیستم واحد، اتلاف انرژی کنند. هدف از ارائه‌ی میراگر پیشنهادی، استفاده از وسیله‌ی واحد برای اتلاف انرژی است که بتواند مشخصات دینامیکی از جمله سختی و میرایی سازه را متناسب با دوسطح مختلف زمین لرزه اصلاح نماید. میراگر پیشنهادی از سه حلقه‌ی تو در تو تشکیل شده است که شامل سه جزء (۱) حلقه‌ی خارجی با سختی کم (به عنوان فیوز اول در تحریک‌های با دامنه‌ی تغییرمکان متوسط ۲) حلقه‌ی داخلی با سختی زیاد (به عنوان فیوز اول در زمین‌لرزه‌های شدید) (۳) دستگیره با فاصله‌ی تغییرمکانی می‌باشد. در این مطالعه به بررسی آزمایشگاهی و عددی میراگر حلقوی دوسطحی اصلاح شده پرداخته شده است. در این راستا دو نمونه‌ی آزمایشگاهی تحت بارگذاری با جزئیات متفاوت ساخته شدند و تحت بارگذاری چرخه‌ای قرار گرفتند. نتایج حاصل از بارگذاری چرخه‌ای به عنوان منحنی‌های نیرو تغییرمکان ارائه شده است. این نمونه‌ها برای صحت‌سنجی مدل عددی در نرم‌افزار ANSYS مورد استفاده قرار گرفته است. برای توسعه‌ی مدل‌های عددی از ۸ مدل میراگر با قطر و ضخامت متفاوت تحت بارگذاری چرخه‌ای استفاده شده است و در نهایت میزان اتلاف انرژی، میرایی و اسکوز معادل و شکل‌پذیری برای مدل‌های عددی با تغییرات قطر و ضخامت مقایسه شده است.

۲- میراگر حلقوی دوسطحی اصلاح شده

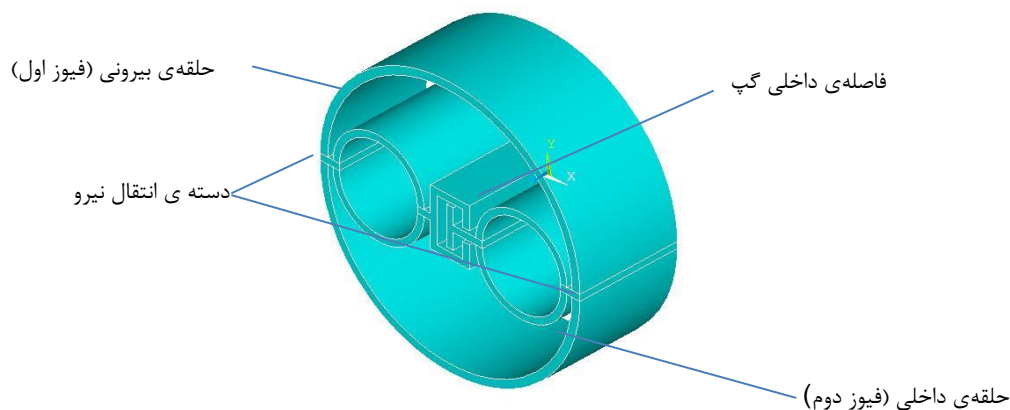
• جزئیات عملکرد

میراگر تسلیمی دوسطحی حلقوی که در این تحقیق پیشنهاد شده است از ترکیب موازی سه حلقه‌ی فولادی با یک فاصله‌ی تغییر مکانی تشکیل شده است. حلقه‌های فولادی برای افزایش شکل‌پذیری و قابلیت جذب انرژی بادبندهای هم‌مرکز پیشنهاد شدند. تحقیقات نشان داده است حلقه‌های فولادی قادر به تحمل چرخه‌های متعدد بارگذاری هستند و به دلیل شکل‌پذیری زیاد قادر به جذب انرژی بسیار زیادی می‌باشند [۱۷].

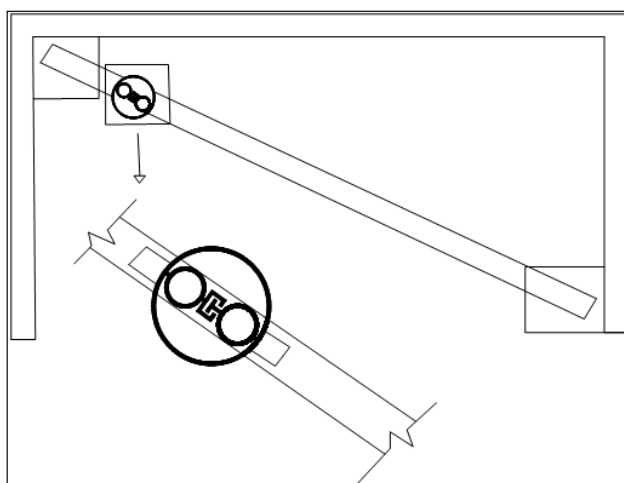
هندسه‌ی شماتیک میراگر حلقوی دوسطحی اصلاح شده‌ی پیشنهادی را نشان می‌دهد. این میراگر تسلیمی، ترکیبی از دو حلقه‌ی فولادی و یک ناحیه‌ی انتقال می‌باشد که در شکل ۲ موقعیت قرارگیری این میراگر ارائه شده است.

تحت زمین‌لرزه‌های با شدت کم که در آنها سازه تغییرمکان جانبی کمتری را تجربه می‌کند، اتلاف انرژی با پلاستیک شدن حلقه‌ی خارجی (فیوز اول) انجام می‌گیرد. این حلقه به دلیل داشتن قطر بزرگتر سختی الاستیک کمتری نسبت به حلقه‌ی داخلی دارد. در زمین‌لرزه‌های با شدت بالا به دلیل زیاد بودن انرژی ورودی تغییر مکانهای ایجاد شده در سازه افزایش می‌یابد و به همین دلیل نیاز سازه به سختی بیشتر افزایش می‌یابد. در مقادیر تغییر مکانهای نسبی بزرگتر، کرنش‌های پلاستیک در دو حلقه خارجی و داخلی (فیوز دوم) به صورت هم‌زمان اتفاق می‌افتد که انتظار می‌رود باعث افزایش قابل توجه مقدار جذب انرژی و افزایش سختی در زمان بالا رفتن شدت زمین‌لرزه می‌شود.

پس از تغییر شکل حلقه‌ی خارجی (بیشتر از فاصله‌ی گپ طراحی شده) با افزایش شدت زمین لرزه و در نتیجه افزایش تغییر مکان سازه، حلقه‌های میانی به لبه‌ی جز نگهدارنده برخورد می‌کند و انتقال نیرو به حلقه‌ی داخلی اتفاق می‌افتد. عملکرد توام این سه حلقه با هم موجب افزایش سختی، مقاومت و همین‌طور مشارکت در جذب انرژی می‌شود. افزایش سختی و مقاومت فراهم شده توسط حلقه‌ی داخلی موجب کاهش تغییر مکانهای وارد شده بر سازه در حین زمین لرزه‌های شدید می‌شود. نحوه‌ی قرارگیری میراگر دوسطحی در قاب سازه‌ای نشان داده شده است.



شکل ۱: ساختار هندسی میراگر دوسطحی حلقوی



شکل ۲: موقعیت قرارگیری میراگر حلقوی دوسطحی اصلاح شده در قاب

• مفهوم طراحی

طراحی میراگرهای دوسطحی روندی مشابه طراحی میراگرهای معمول غیر فعال از نوع وابسته به تغییر مکان را دنبال می‌کند [۱۵]. مقدار سختی‌های مورد نیاز برای هر فاز با توجه به رفتار کلی میراگر باید تعیین شود. نمودار نشان داده شده در شکل ۳ منحنی نیرو تغییر مکان را برای دو فیوز تسلیم شونده‌ی حلقوی و منحنی دوسطحی تجمعی را نشان می‌دهد. K_{d1} و K_{d2} به ترتیب سختی الاستیک فیوز اول (حلقه‌ی بیرونی) و دوم (حلقه‌های داخلی) است. رابطه‌ی نیرو-تغییر مکان تا تغییر مکان‌های u کوچکتر از تغییر مکان تسلیم فیوز اول Δ_{yd1} به صورت خطی است و فقط تاثیرات سختی فیوز اول در آن مشاهده می‌شود. پس از افزایش تغییر مکان اعمالی به بیش از تغییر مکان تسلیم فیوز اول و تا قبل از رسیدن به تاخیر تغییر مکانی (Δ_{gap}) سختی پس از تسلیم با مقدار αK_{d1} به رابطه‌ی نیرو

تغییر مکان اضافه می‌شود. تا زمانی که تغییر مکان اعمالی در محدوده‌ی بین تغییر مکان تسلیم حلقه‌ی دوم و تاخیر تغییر مکانی Δ_{gap} قرار گیرد در این حالت نیروی الاستیک فیوز دوم، به صورت تجمعی با نیروی نهایی فیوز اول جمع می‌شود. این روند ب پس از تغییر مکان تسلیم فیوز دوم، Δ_{yd2} ، نیز ادامه می‌یابد. ولی با این تفاوت که نیروی پس از تسلیم فیوز دوم به مجموع مقاومتها اضافه می‌شود. معادلات نیرو تغییر مکان را می‌توان برای دو فیوز تسلیمی با فاصله‌ی تغییر مکانی به صورت زیر بیان کرد.

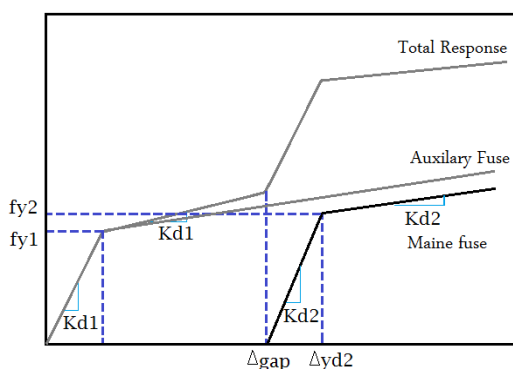
$$F_s = K_{d1} \times U \quad \text{if } u \leq \Delta_{yd1} \quad (1-1)$$

$$F_s = \alpha K_{d1} \times (u - \Delta_{yd1}) + f_{y1} \quad \text{if } \Delta_{yd1} < u \leq \Delta_{gap} \quad (2-1)$$

$$F_s = \alpha K_{d1} \times (u - \Delta_{yd1}) + f_{y1} + K_{d2} \times (u - \Delta_{gap}) \quad \text{if } \Delta_{gap} < u \leq \Delta_{yd2} \quad (3-1)$$

$$F_s = \alpha K_{d1} \times (u - \Delta_{yd1}) + f_{y1} + f_{y2} + K_{d2} \times (u - \Delta_{yd2}) \quad \text{if } \Delta_{yd2} \leq u \quad (4-1)$$

نمودار ساده شده‌ی روابط ذکر شده در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳: منحنی نیرو تغییر مکان چند خطی برای میراگر دوسطحی

مقدار فاصله‌ی تغییر مکانی Δ_{gap} بر اساس حدودهای تغییر مکان همانطور که در قبل به آنها اشاره شد هر یک از این فیوزها در زلزله‌های با شدت مختلف وارد عمل میشوند. فیوز اول در زلزله‌های متوسط و فیوز دوم در زلزله‌های شدید دارای عملکرد غیرار اتجاعی خواهند بود. بنابراین در حالتی که شدت زلزله متوسط باشد، انتظار رفتار غیرخطی فقط در فیوز شماره اول وجود دارد. در ادامه برای طراحی و تعیین ابعاد اولیه بجای تعریف شتاب نگاشتهای با قدرت متوسط از جابجایی‌های متناظر در هر سطح، بهره گرفته شد. بدین منظور از جدول سطوح جابجایی سازه برای اجزای قائم به نقل از fema356 استفاده شده است [۲۲]. بر اساس این جدول تغییر مکان متناظر با سطح عملکرد ایمنی جانی که برابر ۲ درصد و برای سطح عملکرد بالاتر برابر ۱ درصد در نظر گرفته شده است. در این مطالعه مقدار ۲ درصد دریافت به عنوان تغییر مکان نسبی طبقه در زمین لرزه‌های شدید و ۱ درصد برای زمین لرزه‌های متوسط در نظر گرفته شده است.

۳- مطالعات عددی

• مدل المان محدود میراگر دوسطحی

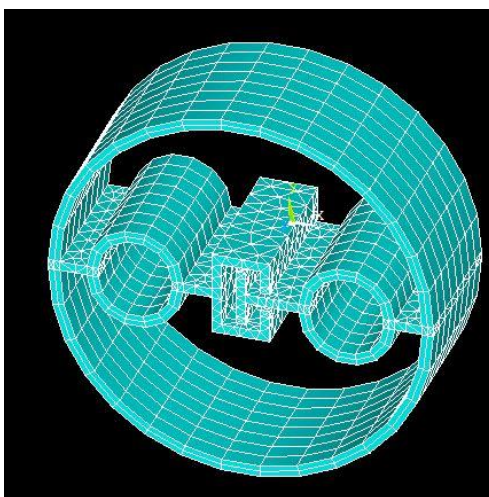
اثرات تغییرات ابعاد هندسی متفاوت میراگر دوسطحی در رفتار چرخه‌ای آنها با استفاده از نرم افزار المان محدود ANSYS V17 [۲۳] مورد مطالعه قرار گرفته است. تغییرات ابعاد هندسی شامل تغییرات ضخامت و قطر فیوز داخلی است که مطابق با جدول ۱ انتخاب

شده اند. در مدل‌های با نام‌های ti-6 تا ti-12 مشخصات و ابعاد حلقه ی خارجی (فیوز اول) ثابت نگه داشته شده است و فقط ضخامت حلقه‌های داخلی (فیوز دوم) از ۶ تا ۱۲ میلی متر تغییر داده شده است. مدل‌های Di-80 تا Di-140 نیز شامل تغییرات قطر حلقه‌ی داخلی (فیوز دوم) می‌باشد که مشخصات حلقه‌ی خارجی از جمله قطر و ضخامت ثابت در نظر گرفته شده است.

برای مدل‌سازی حلقه‌های فولادی و دستگیره‌ها از المان هشت گرهی SOLID285 استفاده شده است که می‌تواند اثرات تغییر شکل‌های بزرگ و کرنش‌های بزرگ را مدل‌سازی کند و این یکی از خصوصیات مهم در رفتار چرخه ای میراگرها می‌باشد. برای سادگی تحلیل‌ها، جوشهای به کار رفته برای اتصال قطعات با اتصال صلب (مدلسازی شده اند به نحوی که حرکت نسبی بین قطعات حذف شود. همچنین از المان‌های از المانهای تماسی سطحی CONTACT 174 و TARGET170 برای شبیه سازی برخورد بین سطوح خارجی فیوز دوم با دیواره داخلی المان نگهدارنده استفاده شده است. این المان‌های تماسی توانایی شبیه سازی تماس غیر خطی بین المان‌های سطحی و حجمی را دارا می‌باشند. نحوه ی مش‌بندی در شکل ۴ نشان داده شده است. در این تصویر مشاهده می‌شود که نوع مش‌بندی برای لوله‌ها از نوع مش‌بندی با المان‌های هشت گرهی و از نوع مش بندی دستی می‌باشد در حالیکه برای دستگیره‌ها از مش‌بندی آزاد که تاثیری در رفتار چرخه‌ای میراگر دوسطحی ندارند، استفاده شده است. از مصالح متفاوت برای مشخصات مصالح به کار گرفته شده در مدل المان محدود استفاده شده است که مشخصات به کار گرفته شده در لوله‌ها منطبق بر نتایج آزمایشگاهی نمونه های تست کشش است و نوع دوم مصالح برای دستگیره‌ها از فولاد پر مقاومت St-52 استفاده شده است.

یکی از دو انتهای دستگیره‌های انتقال نیرو در تمامی جهات به صورت انتقالی و دورانی مقید شده است و در انتهای دیگر تغییر مکان در راستای x منطبق بر الگوی بارگذاری به گره مرجع ۲ از طریق به هم بستن گره‌ها^۲ اعمال شده است. تمام گره‌ها در مقابل حرکت خارج از صفحه در راستای z (عمود بر صفحه ی حرکت) محدود شده‌اند.

برای انتخاب ابعاد مناسب حلقه‌ها، از ضخامت و قطری که در بازار به نام تجاری مانیسمن موجود است استفاده شده است. این لوله‌ها از نوع لوله‌های بدون درزی هستند که برای حذف اثرات کیفیت جوشکاری و خمکاری ورق‌ها انتخاب شده اند. رفتار میراگر ترکیبی، تحت تاثیر پارامترهایی چون ضخامت و قطر حلقه‌های داخلی و خارجی می‌باشد بنابراین در این بخش از مطالعه، ۸ مدل المان محدود غیر خطی سه بعدی با قطر و ضخامت‌های مختلف در لوله‌های داخلی و خارجی مدل‌سازی شده اند. مشخصات این مدل‌ها در جدول ۱ ارائه شده است. همچنین طول لوله‌ها به دلیل ملاحظات معماری مساوی ۲۰۰ میلی متر و قطر حلقه‌ی خارجی به ۴۰۰ میلی متر محدود شده است.



شکل ۴: نمونه مدل المان محدود سازی شده در نرم افزار Ansys

¹ Rigid link

² Master Node

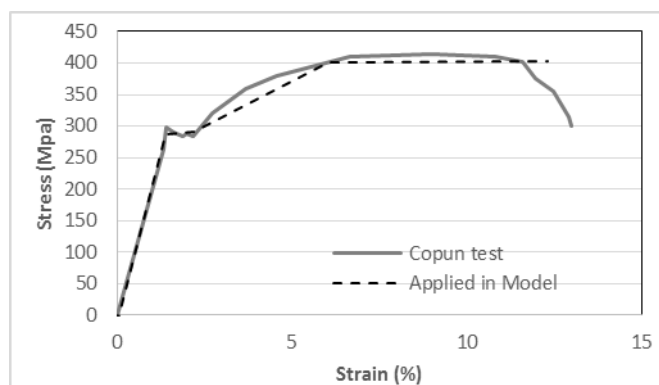
³ Couple set

جدول ۱: مشخصات تغییرات اعمال شده روی ضخامت حلقه داخلی

مدل	حلقه‌ی خارجی (فیوز اول)			حلقه‌ی داخلی (فیوز)		
	قطر (mm)	ضخامت (mm)	نسبت قطر به ضخامت	قطر (mm)	ضخامت (mm)	نسبت قطر به ضخامت
ti-6	۴۰۰	۱۲	۳۳/۳	۱۰۰	۶	۱۶/۶۷
ti-8	۴۰۰	۱۲	۳۳/۳	۱۰۰	۸	۱۲/۵
ti-10	۴۰۰	۱۲	۳۳/۳	۱۰۰	۱۰	۱۰
ti-12	۴۰۰	۱۲	۳۳/۳	۱۰۰	۱۲	۸/۳۳
Di-80	۴۰۰	۱۲	۳۳/۳	۸۰	۱۰	۸
Di-100	۴۰۰	۱۲	۳۳/۳	۱۰۰	۱۰	۱۰
Di-120	۴۰۰	۱۲	۳۳/۳	۱۲۰	۱۰	۱۲
Di-140	۴۰۰	۱۲	۳۳/۳	۱۴۰	۱۰	۱۴

• مشخصات مصالح

به طور معمول فولاد موجود لوله‌های مانیسمان کربن بیشتری نسبت به فولادهای ساختمانی از نوع نرمه دارند. برای مدلسازی رفتار غیر خطی لوله‌ها تحت بارگذاری چرخه‌ای، مصالح الاستو پلاستیک با رفتار چند خطی و سخت شدگی سینماتیکی استفاده شده است. تحقیقات نشان می‌دهد استفاده از سخت شدگی سینماتیکی نتایج مناسب‌تری در صحت سنجی نتایج آزمایشگاهی ارائه میکند [۲۴]. مشخصات به دست آمده برای منحنی تنش و کرنش بر اساس نمونه‌های کششی اخذ شده از لوله‌های انتخاب شده می‌باشد. در مجموع سه نمونه تحت بارگذاری کششی یونیورسال بر اساس استاندارد ASTM E8/E8M – 09 [۲۵] آماده سازی و آزمایش شدند (شکل ۶). نتایج حاصل از سه آزمایش به صورت متوسط در شکل ۵ ارائه شده است. رفتار خطی تا تنش تسلیم 285 MPa به دست آمده است. متوسط تنش نهایی برای مقاومت‌ها هر سه نمونه‌ی آزمایش شده برابر 400 MPa در نظر گرفته شده است.



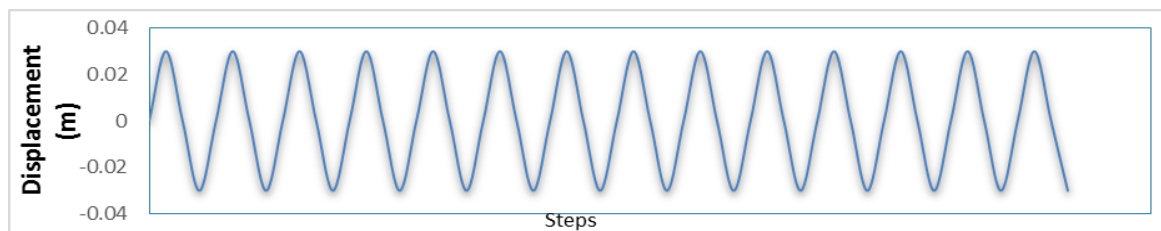
شکل ۵: نمودار تنش-کرنش متوسط مصالح



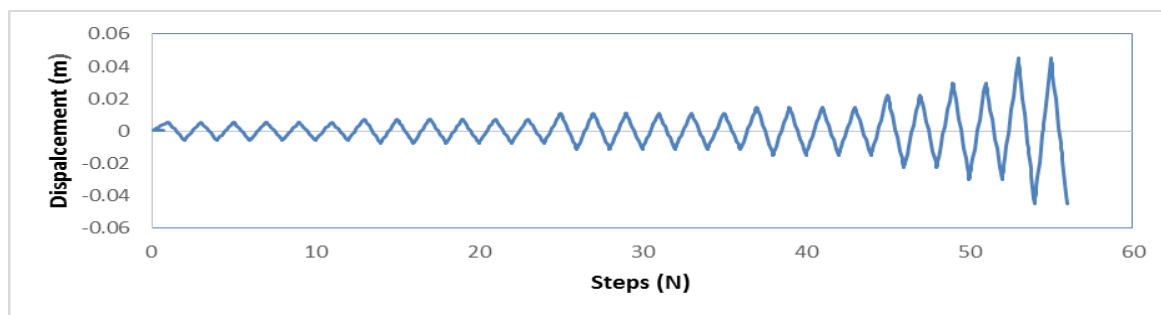
شکل ۶: نمونه‌های کششی تست شده

• بارگذاری

بارگذاری بصورت چرخه‌ای استاتیکی در دو حالت با دامنه ثابت منطبق با شکل ۷-الف و با دامنه فزاینده منطبق با شکل ۷-ب به نمونه اعمال شده است. دامنه‌ی ثابت در شکل ۷-الف جهت آزمایش نمونه‌ها استفاده شده است. دستگاه آزمایش مورد استفاده در این تحقیق از نوع مدل STM-250 می‌باشد که قادر به دریافت الگوی بارگذاری فزاینده نیست بنابراین الگوی بارگذاری چرخه‌ای با دامنه‌ی ثابت جهت آزمایش انتخاب شد. مقدار دامنه‌ی تغییرشکلی برابر ۳۰ میلی‌متر و برابر با ۴ درصد دریافت برای قاب سازه‌ای با ارتفاع ۳ متر و مقیاس نیم اعمال گردید. بر اساس پیشنهاد دستورالعمل بهسازی لرزه‌ای تعداد ۲۰ سیکل بارگذاری برای اطمینان از عملکرد میراگرها در شرایط آزمایشگاهی اعمال شده است. برای نمونه‌ی آزمایشگاهی بارگذاری با دامنه ثابت و برای ۸ مدل عددی بارگذاری بصورت با دامنه فزاینده انتخاب شده است.



(الف)

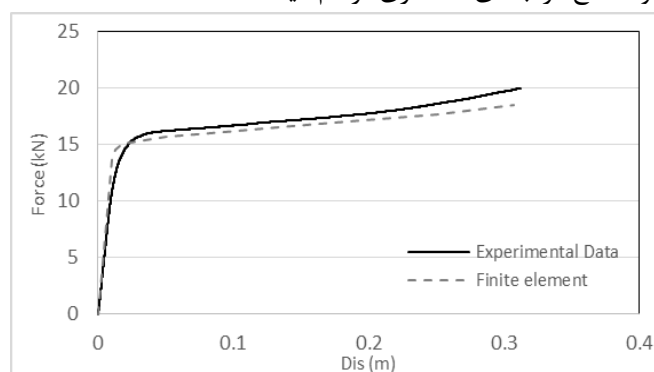


(ب)

شکل ۷: تاریخچه بارگذاری (الف) دامنه‌ی ثابت برای نمونه‌های آزمایشگاهی (ب) دامنه فزاینده برای مدل‌های عددی

• صحت سنجی اولیه مدل عددی

جهت اعتبار بخشی به نتایج مدل‌های المان محدود و بالا بردن دقت مدل‌های عددی در گام نخست، لوله‌ای با قطر ۱۰۰ میلی‌متر و ضخامت ۶ میلی‌متر و طول ۱۰۰ میلی‌متر در آزمایشگاه تحت بارگذاری یکسویه‌ی فشاری قرار گرفت. نتایج به دست آمده از مدلسازی عددی در نرم افزار ANSYS V.17 با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است (شکل ۸). هر چند که در مراحل بعدی نتایج مدل آزمایشگاهی میراگر حلقوی دوسطحی اصلاح شده با مدل عددی مقایسه شده است ولی استفاده از نتایج آزمایش چرخه‌ای لوله‌ی تک با مشخصات یاد شده، روند درستی برای انتخاب مش و مصالح در ابتدای مدلسازی فراهم می‌کند.



شکل ۸: نتایج صحت سنجی اولیه عددی با نتایج آزمایشگاهی برای لوله‌ی تک

• نتایج تحلیل

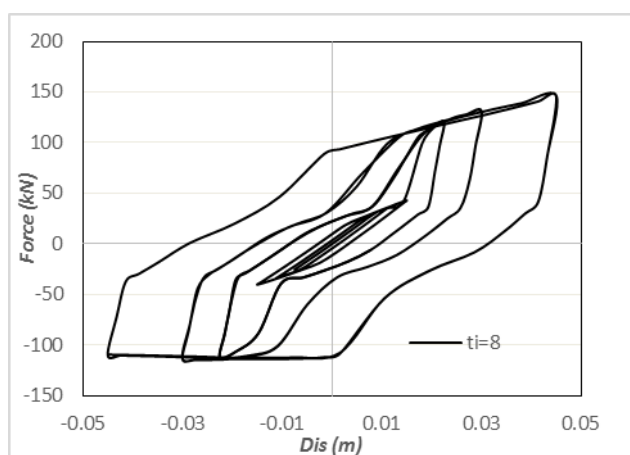
نسبت قطر به ضخامت در پایداری چرخه‌های هیستریزس تاثیر عمده‌ی دارد. با کاهش بیش از حد این نسبت، به دلیل کم‌انرژی موضعی تحت بارهای کم فشاری، افت مقاومت و سختی و پاسخ چرخه‌ای ناپایدار در لوله‌ها اتفاق می‌افتد [۲۶]. همچنین طبق رابطه‌ی (۵) نشان داده شده است که افزایش قطر و یا کاهش طول و ضخامت باعث کاهش ظرفیت باری آنها می‌شود.

$$F = \frac{Lt^2}{R} \quad (۵)$$

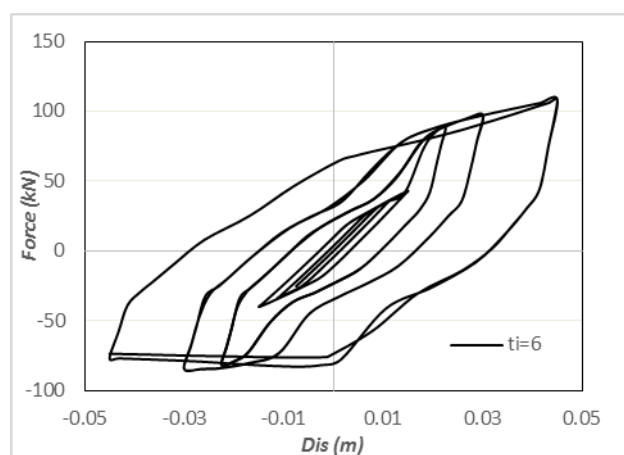
در این رابطه، L ، t و R به ترتیب نشان دهنده‌ی طول، ضخامت و قطر لوله می‌باشد.

در این بخش از مطالعه به بررسی منحنی‌های هیستریزس به دست آمده از ۸ مدل عددی در نرم افزار انسیس پرداخته شده است. منحنی‌های چرخه‌ای حاصل برای تمامی مدلها در شکل ۹ و شکل ۱۰ تحت بارگذاری چرخه‌ای فزاینده نشان داده شده است. نشانه‌ای از کاهش مقاومت، افت سختی و ناپایداری چرخه‌های هیستریزس در این نتایج برای نمونه‌های انتخاب شده تا تغییرمکان ۴۵ میلی‌متر مشاهده نشده است. همچنین نمودارهای نیرو تغییرمکان بیانگر این است که انتقال نیرو از فیوز اول (حلقه‌ی خارجی) به فیوز دوم (حلقه‌های داخلی) پس از رسیدن به تغییر مکان گپ انجام شده است.

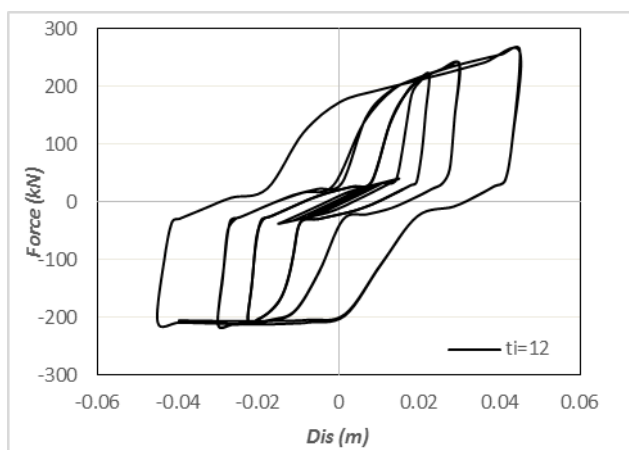
منحنی‌های پوش به دست آمده از منحنی‌های چرخه‌ای فزاینده نشان دهنده‌ی رفتار دوسطحی پیش بینی شده برای این میراگر ترکیبی می‌باشد که قابلیت اتلاف انرژی در دوسطح متفاوت را دارد. مقایسه‌ی منحنی‌های پوش در شکل ۱۱ نشان داده شده است. این نمودارها بیانگر این نتیجه است که انتقال نیرو پس از تغییر مکان گپ در نظر گرفته شده به لوله‌های داخلی انجام شده است و پس از تغییر مکان گپ علاوه بر لوله‌ی خارجی، لوله‌ی داخلی با سختی بیشتر وارد سازوکار جذب انرژی شده است. با توجه به ثابت بودن قطر و ضخامت فیوز اول (حلقه‌ی خارجی) ظرفیت اولیه‌ی تمام این مدلها تا قبل از تغییرمکان گپ ثابت و برابر ۴۳ کیلو نیوتن می‌باشد. پس از برخورد المان انتقال نیرو به حلقه‌های داخلی (فیوز دوم) نیروها از مقدار ۱۴۶ تا ۲۶۳ کیلو نیوتن برای افزایش ضخامت از ۶ تا ۱۲ میلی‌متر و از مقدار ۱۴۸ تا ۲۴۳ کیلو نیوتن برای کاهش قطر از ۱۴۰ به ۸۰ میلی‌متر افزایش می‌یابد. منطبق بر روابط تئوریک اثرات ضخامت در مقایسه با تغییرات قطر تاثیر بیشتری بر ظرفیت نهایی میراگر نشان می‌دهد.



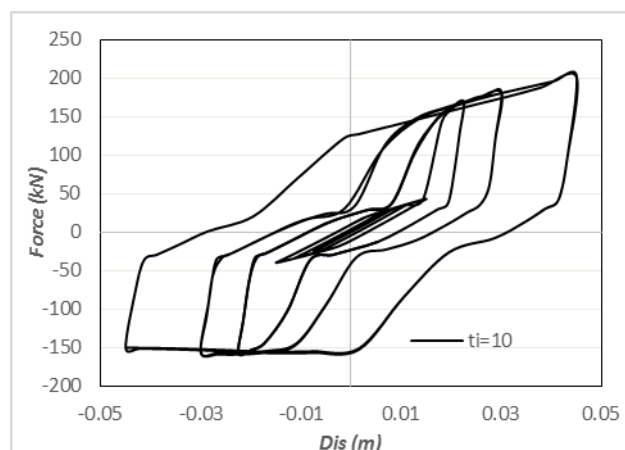
(ب)



(الف)

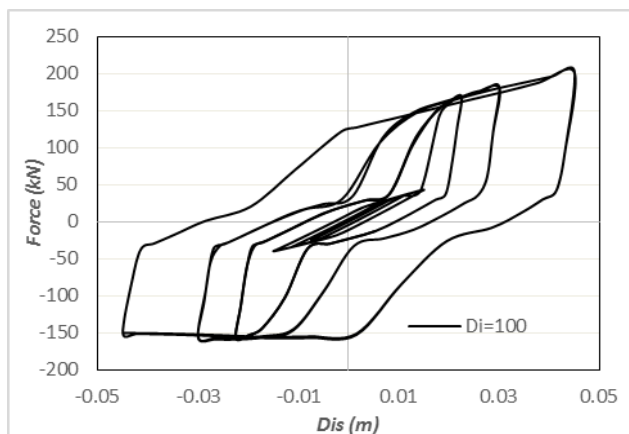


(د)

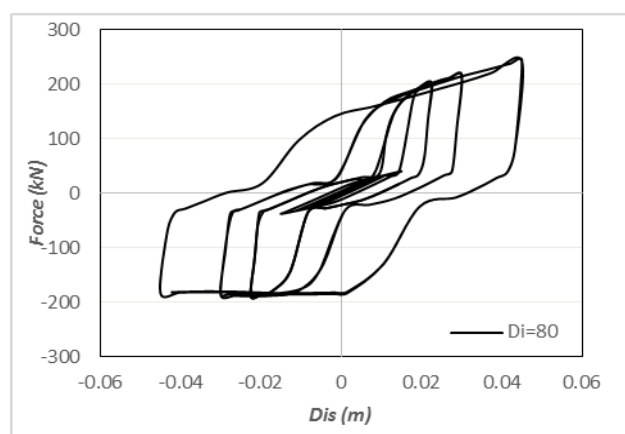


(ج)

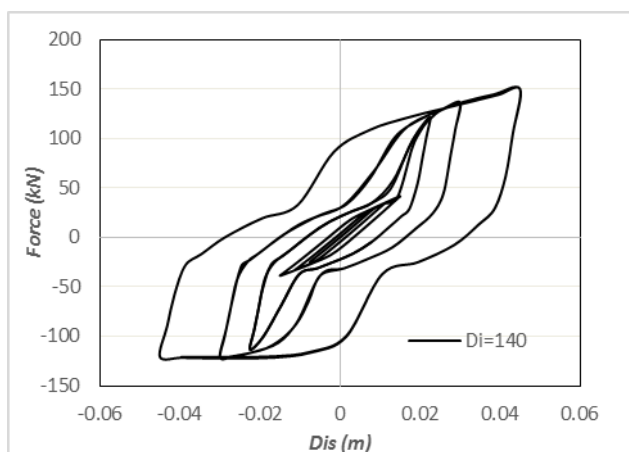
شکل ۹: نمودار نیرو تغییر مکان تحت بار گذاری چرخه ای فزاینده برای مدلهای با قطر ثابت ۱۰۰ میلی متر و ضخامت فیوز داخلی الف) ۶ میلی متر، ب) ۸ میلی متر، ج) ۱۰ میلی متر د) ۱۲ میلی متر



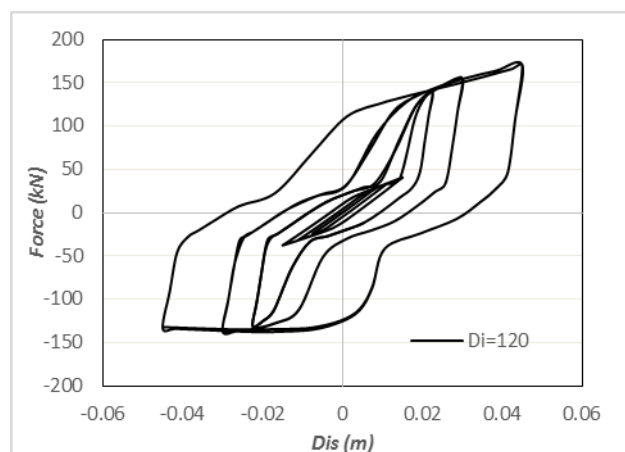
(ب)



(الف)

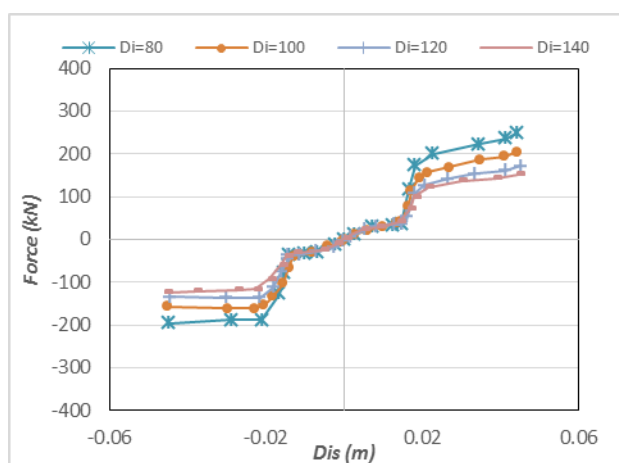


(د)

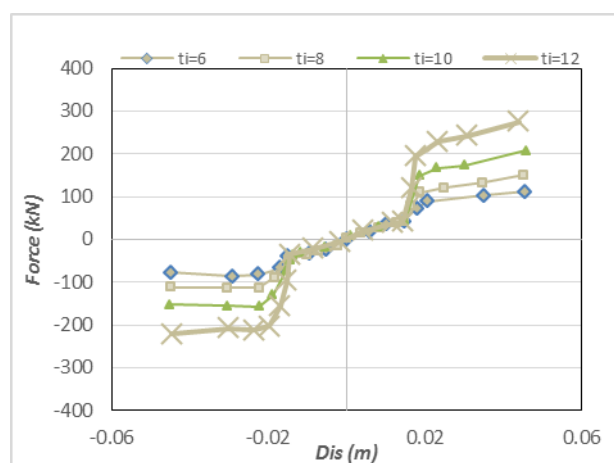


(ج)

شکل ۱۰: نیرو تغییر مکان تحت بار گذاری چرخه ای فزاینده برای مدل های با ضخامت ثابت ۱۰ میلی متر و با قطر فیوز داخلی الف) ۸۰ میلی متر، ب) ۱۰۰ میلی متر، ج) ۱۲۰ میلی متر د) ۱۴۰ میلی متر

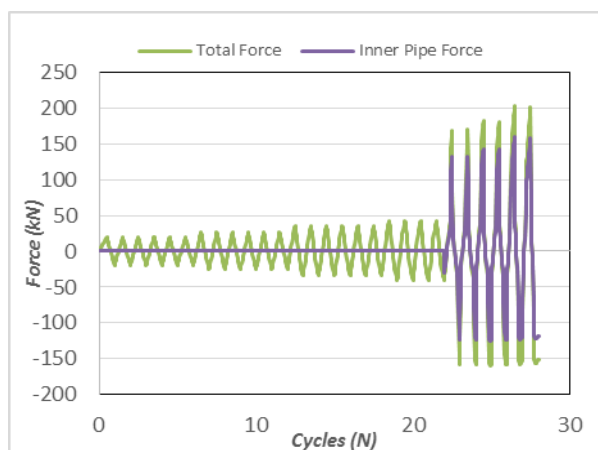


(ب)

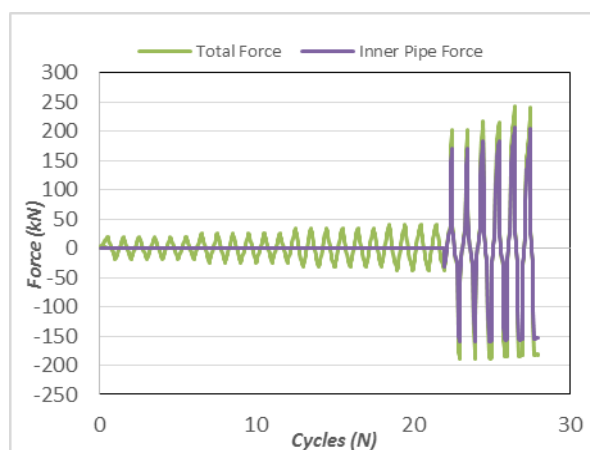


(الف)

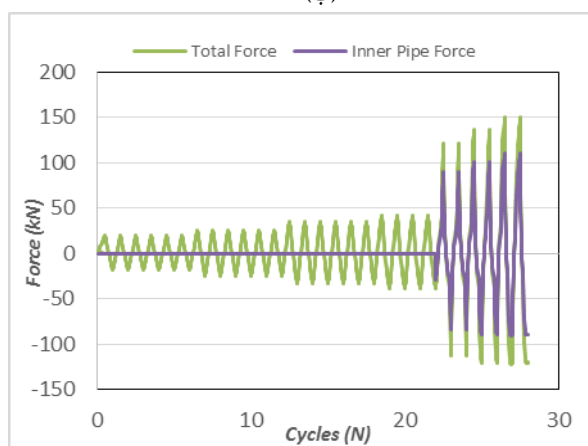
شکل ۱۱: منحنی‌های پوش به دست آمده از نتایج بارگذاری چرخه‌ای فزاینده در مدل‌های عددی



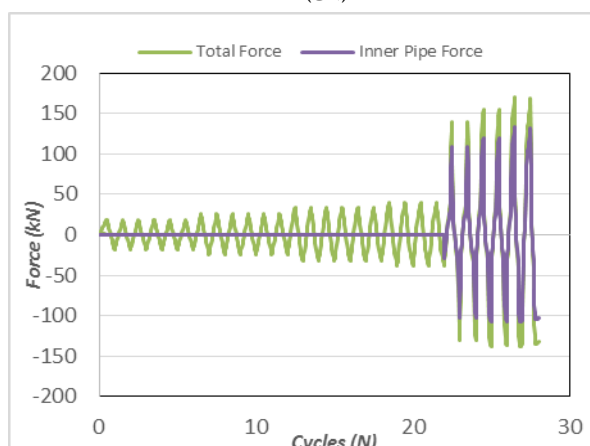
(ب)



(الف)



(ت)

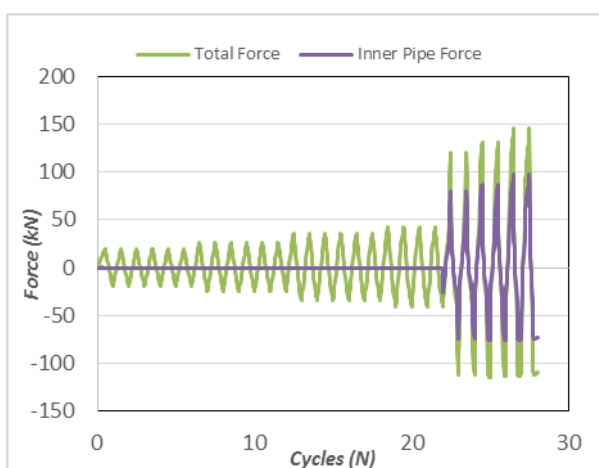


(پ)

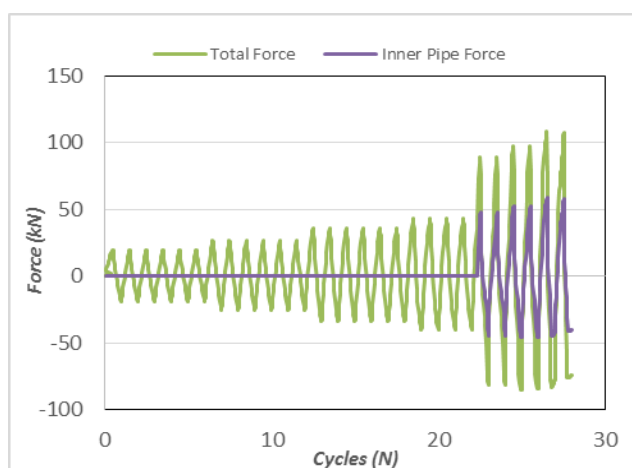
شکل ۱۲: سهم نیروهای اعمال شده بر دو لوله‌ی داخلی و خارجی در میراگر ترکیبی بر اساس تغییرات قطر فیوز دوم با ضخامت ثابت ۱۰ میلی‌متر و قطر فیوز داخلی

(الف) ۸۰ (ب) ۱۰۰ (پ) ۱۲۰ (ت) ۱۴۰ میلی‌متر

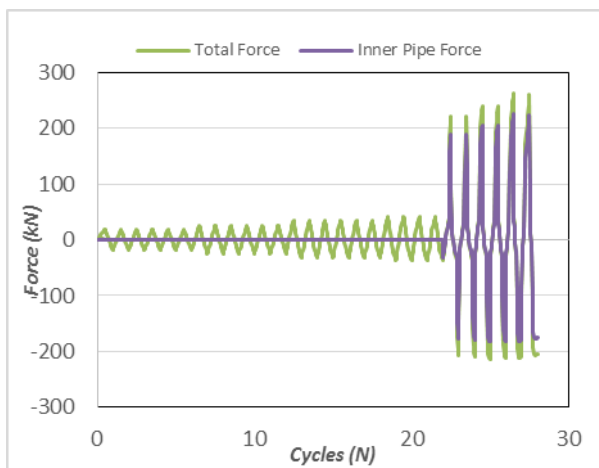
سهم نیروهای اعمال شده بر دو فیوز دوم (حلقه‌ی داخلی) و اول (حلقه‌ی خارجی) در مدل‌ها در نمودارهای شکل ۱۲ و شکل ۱۳ نشان داده شده است. نمودارهای به دست آمده از تغییرات قطر نمونه‌ها مشخص می‌کند با افزایش قطر حلقه‌ی داخلی از ۱۶۰ به ۳۰۰ میلی‌متر درصد سهم نیروی منتقل شده به فیوز دوم (حلقه‌ی داخلی) از مقدار ۷۶ تا ۶۳ درصد کاهش می‌یابد. درصد کاهش سهم نیرو برای تغییرات قطر در نظر گرفته شده چندان قابل توجه نمی‌باشد. همچنین سهم نیروهای نشان داده شده در شکل ۱۳ بیانگر این است با افزایش ضخامت حلقه‌ی داخلی از مقدار ۵ تا ۱۵ میلی‌متر درصد سهم نیرو از نیروی کل از مقدار ۱۶ تا ۷۳ درصد افزایش می‌یابد. همانطور که این نمودارها نشان می‌دهند تمامی مدل‌های مورد تحلیل تا بیش از ۲۰ سیکل و دامنه‌ی جابجایی ۴۵ میلی‌متر بارگذاری را تحمل کرده‌اند.



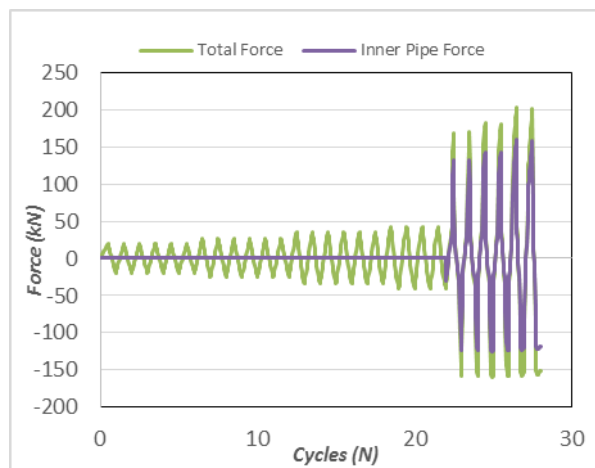
(ب)



(ف)



(ت)



(پ)

شکل ۱۳: سهم نیروهای اعمال شده بر دو لوله‌ی داخلی و خارجی در میراگر ترکیبی بر اساس تغییرات ضخامت فیوز دوم با قطر ثابت ۲۷۰ میلی‌متر و ضخامت (الف) ۶ (ب) ۸ (پ) ۱۰ (ت) ۱۲ میلی‌متر

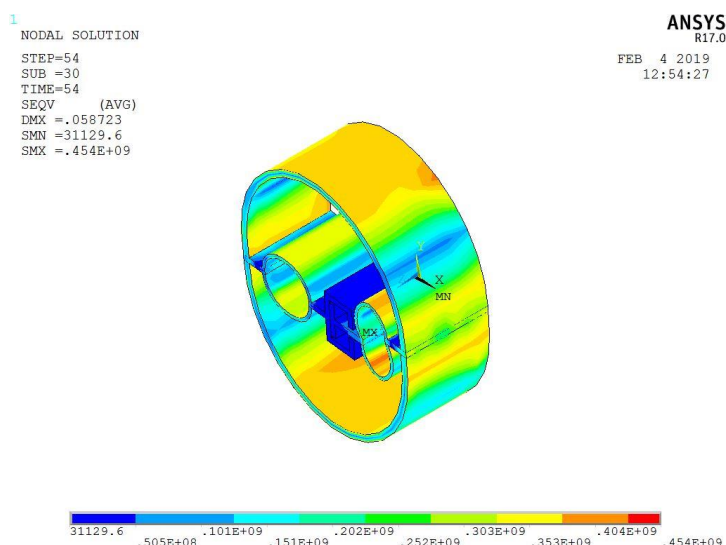
تنش‌های فون میزس برای نمونه‌ی ti-6 در دو حالت قبل و بعد از رسیدن به تغییرمکان گپ در شکل ۱۴ نشان داده شده است. تمرکز تنشها در تغییر مکانهای بالا در محل اعمال نیرو و همینطور در نقاط مقابل آنها اتفاق می‌افتد. در انتهای بارگذاری بیشترین تغییر شکل المان‌ها نیز در این ناحیه مشاهده شده است که از مقادیر آن با استفاده از پارامتر کرنش پلاستیک معادل در شکل ۱۵ نشان داده شده

است. کرنش پلاستیک معادل قسمتی از کرنش پلاستیک ماکزیمم است که می‌تواند شکست در مصالح نرم را تخمین بزند. این پارامتر قابلیت بیان کرنشهای سه بعدی را توسط یک مقدار مثبت معادل با استفاده از رابطه‌ی (۶) را فراهم می‌کند.

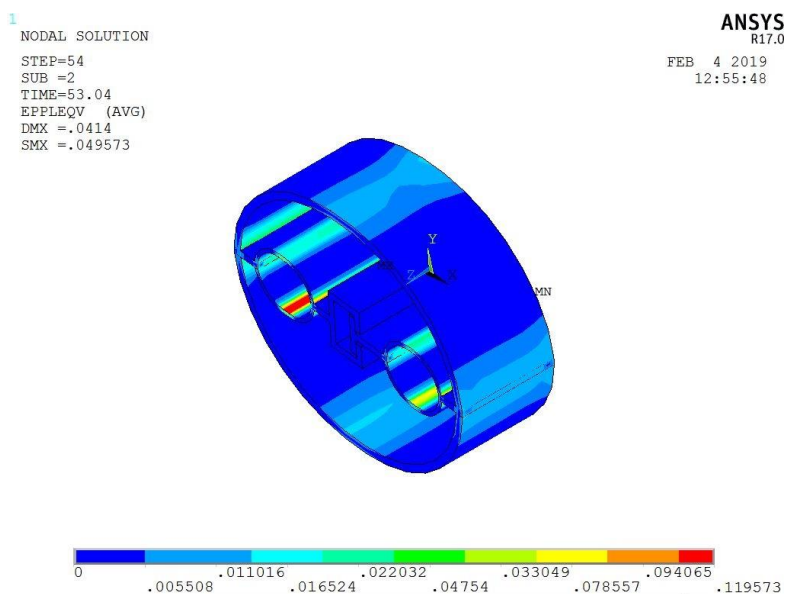
$$\varepsilon_e = \frac{1}{1+\nu'} \left(\frac{1}{2} [(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_1 - \varepsilon_3)^2] \right)^{1/2} \quad (6)$$

• انرژی جذب شده، میرایی ویسکوز معادل میراگر ترکیبی

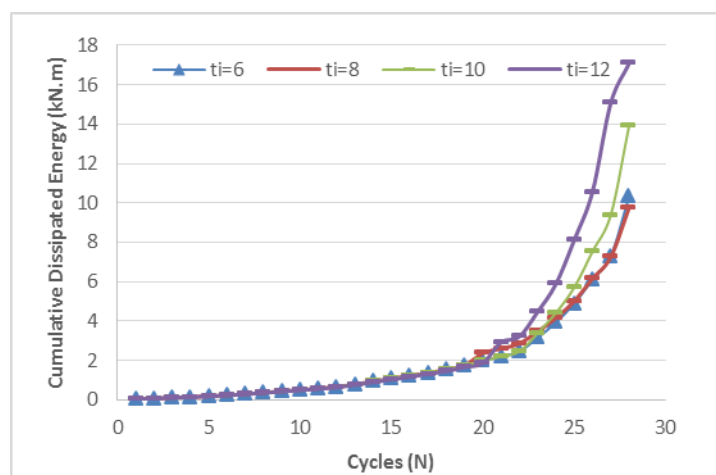
شکل ۱۶ و شکل ۱۷ تاثیرات قطر و ضخامت را بر روی مقدار اتلاف انرژی تجمعی نشان می‌دهد. با مقایسه‌ی اثرات تغییرات قطر و ضخامت در مقادیر جذب انرژی نیز اثرات تغییرات ضخامت مشهود تر است. تغییرات نمودار بیانگر روند روشنی فقط برای این دو پارامتر به تنهایی نیست و نسبت D/t بیانگر رابطه‌ی مناسبی بر مقدار جذب انرژی می‌باشد (شکل ۱۸). به طور کلی با افزایش مقدار D/t مقدار جذب انرژی در تمام سیکل‌ها کاهش می‌یابد.



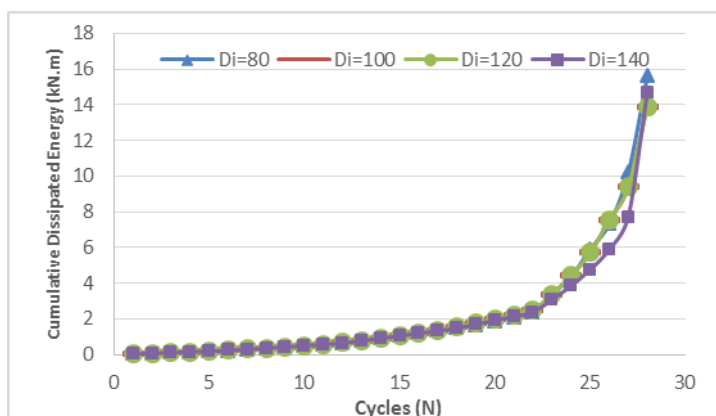
شکل ۱۴: لحظه برخورد دستگیره به فیوز دوم (تغییر مکان ۴۵ میلیمتر) در بارگذاری فشاری



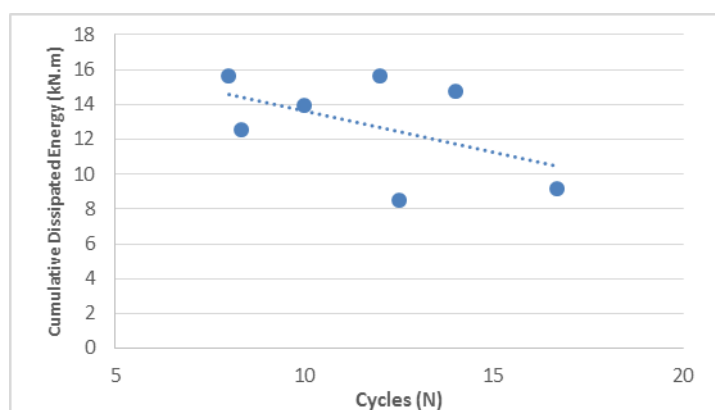
شکل ۱۵: مقادیر کرنش پلاستیک معادل در انتهای بارگذاری (تغییر مکان ۴۵ میلیمتر)



شکل ۱۶: انرژی تلف شده‌ی تجمعی برای تغییرات ضخامت فیوز دوم



شکل ۱۷: انرژی تلف شده‌ی تجمعی برای تغییرات قطر فیوز دوم



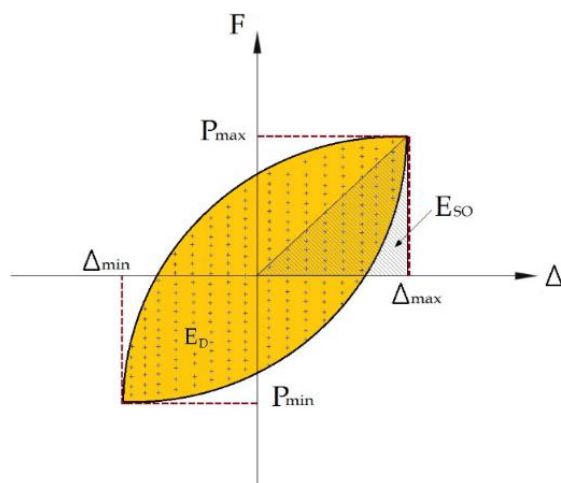
شکل ۱۸: ماکزیمم انرژی تلف شده بر اساس نسبت قطر به ضخامت در فیوز دوم (حلقه‌ی داخلی)

• میرایی معادل

نتایج تحلیل‌های چرخه ای میراگر ترکیبی می‌تواند برای برآورد مقدار میرایی ویسکوز معادل مورد استفاده قرار گیرد. معادله‌ی شناخته شده (۲) مقدار میرایی ویسکوز معادل را به صورت تقریبی پیشنهاد میکند [۲۵].

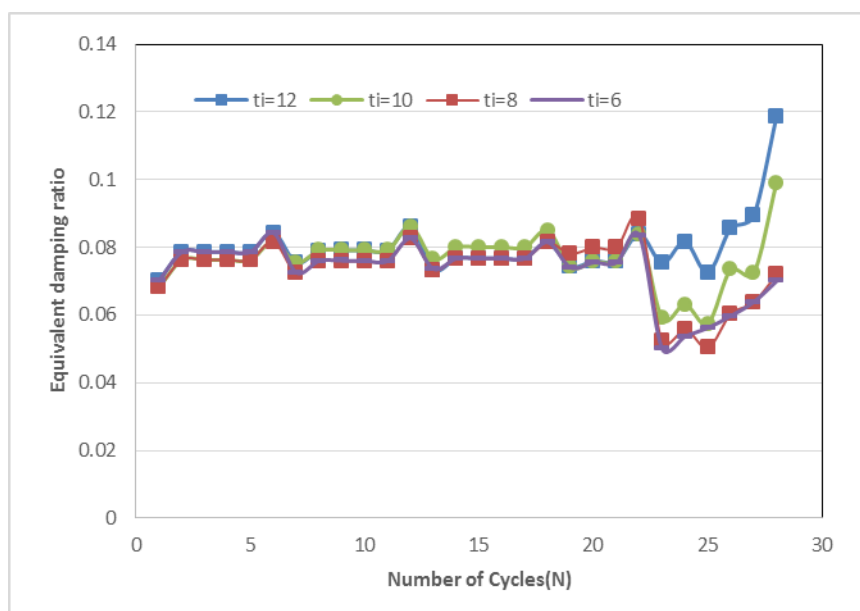
$$\zeta_{eff} = \frac{1}{4\pi} \frac{E_D}{E_{SO}} \quad (6)$$

که در این معادله ED مساحت زیر نمودار چرخه‌ای برای یک چرخه‌ی کامل است که بیانگر مقدار انرژی جذب شده در هر چرخه می‌باشد. ESO مقدار انرژی کرنشی الاستیک است که در شکل ۱۹ نشان داده شده است.

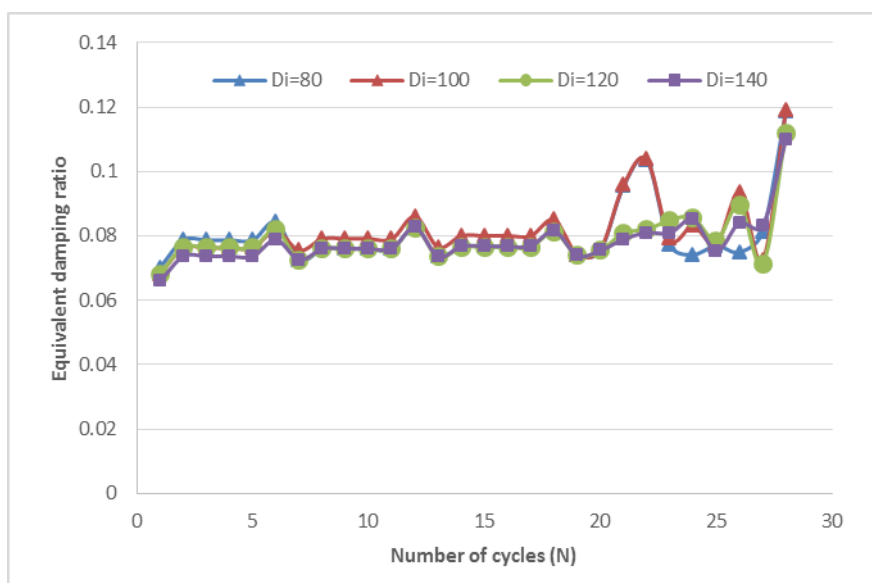


شکل ۱۹: انرژی تلف شده در منحنی نیرو- تغییرمکان

با استفاده از مقادیر محاسبه شده مقدار میرایی معادل ویسکوز برای تمام مدل‌ها در چرخه‌های مختلف ارائه شده است (شکل ۲۰ و شکل ۲۱). مقدار میرایی معادل از مقدار ۰/۰۵ تا ۰/۱۴ با تغییرات قطر و ضخامت در چرخه‌ها تغییر میکند. همانگونه که تغییرات ضخامت در نیروی مقاوم و انرژی تلف شده تاثیر مهمتری نسبت به تغییرات قطر دارد، این تاثیرات در مقادیر میرایی نیز قابل مشاهده است. مقادیر میرایی معادل در چرخه‌ها با به وارد شدن فیوز دوم پس از چرخه‌ی ۲۲ و تغییرمکان بیش تر از ۱۵ میلی‌متر به طور ناگهانی تغییر می‌کند که نشان دهنده‌ی اصلاح میرایی مورد نیاز در زمین‌لرزه‌های با سطح بالاتر با تقاضای تغییر شکل زیاد می‌باشد.



شکل ۲۰: نسبت میرایی ویسکوز معادل برای تغییرات ضخامت فیوز دوم (حلقه‌ی داخلی)



شکل ۲۱: نسبت میرایی ویسکوز معادل برای تغییرات قطر فیوز دوم (حلقه‌ی داخلی)

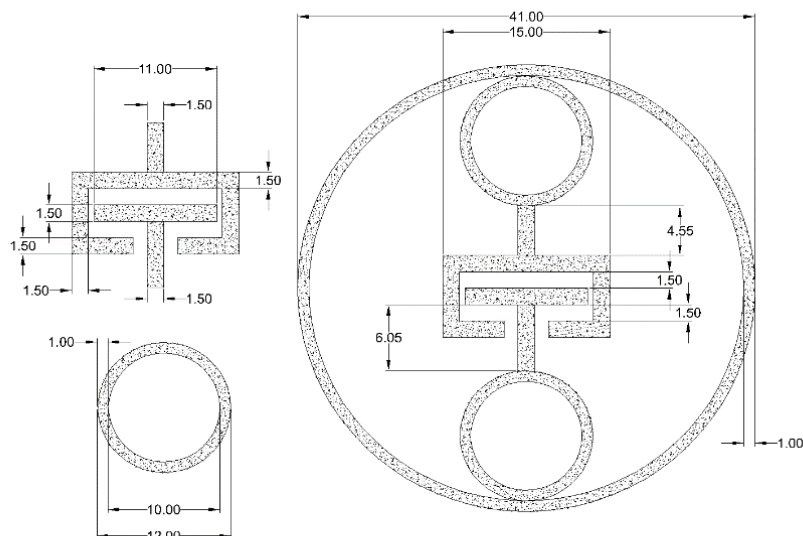
۴- مطالعات آزمایشگاهی

مطالعات عددی انجام شده برای میراگر دوسطحی پیشنهادی در بخش قبل نشان داد جزئیات در نظر گرفته شده می‌تواند عملکرد ترکیبی در نظر گرفته شده برای میراگر لوله‌ای دوسطحی را تامین کند. در این راستا برای صحت سنجی عملکرد مدل‌های پیشنهاد شده دو نمونه‌ی آزمایشگاهی منطبق با پیکربندی مدل شده، تحت آزمایش با بارگذاری چرخه‌ای استاتیکی قرار گرفتند.

لوله‌های مورد آزمایش از نمونه‌های مشابه و موجود در بازار که برای مصارف صنعتی ساخته شده‌اند انتخاب شده است. مطابق پیشنهاد ارائه شده در استاندارد ASTM E8-E9 [۲۵] نمونه‌های کششی تهیه و مورد آزمایش یکسویه‌ی کششی قرار گرفتند. مشخصات به دست آمده از تست کشش یک سویه‌ی مصالح لوله‌ها در شکل ۳ مشخص شده است.

آزمایش استاتیکی چرخه‌ای بر روی نمونه‌های میراگر دوسطحی حلقوی با سرعت ۴۰ میلی‌متر بر دقیقه توسط دستگاه یونیورسال در آزمایشگاه مقاومت مصالح موسسه آموزش عالی سراج با ظرفیت ± 300 کیلو نیوتن به صورت بارگذاری محوری رفت و برگشتی انجام شد. شکل ۲۲ نشان دهنده‌ی جزئیات نمونه‌ی اول مورد آزمایش می‌باشد. در نمونه‌ی اول، قطر لوله‌ی خارجی برابر ۴۱۰ میلی‌متر و ضخامت آن برابر ۱۰ میلی‌متر و قطر لوله‌های داخلی برابر ۱۲۰ میلی‌متر با ضخامت ۱۰ میلی‌متر انتخاب شده است همانطور که مشاهده می‌شود نمونه‌ی مورد آزمایش شامل دو لوله‌ی با قطرهای مختلف می‌باشند که با اتصال جوشی به هم متصل شده‌اند. دستگیره‌ی انتقال نیرو بین دو لوله‌ی فولادی به نحوی در نظر گرفته شده است که بتواند آزادی حرکتی برای لوله‌ی داخلی را در دو جهت کششی و فشاری فراهم کند. این دستگیره با جوش نفوذی به حلقه‌ی بیرونی متصل شده است و وظیفه‌ی انتقال نیرو را به حلقه‌ی داخلی به عهده دارد. نمونه‌ی دوم آزمایشگاهی با مشخصات کاملاً مشابه با نمونه‌ی اول ساخته شد با این تفاوت که ضخامت حلقه‌ی داخلی برابر ۸ میلی‌متر و ضخامت حلقه‌ی خارجی برابر ۱۲ میلی‌متر انتخاب شد. با توجه به محدودیت الگوی بارگذاری ورودی دستگاه یونیورسال دامنه‌ی چرخه‌ها ثابت و برابر ۳۰ میلی در ۲۰ چرخه اعمال شد.

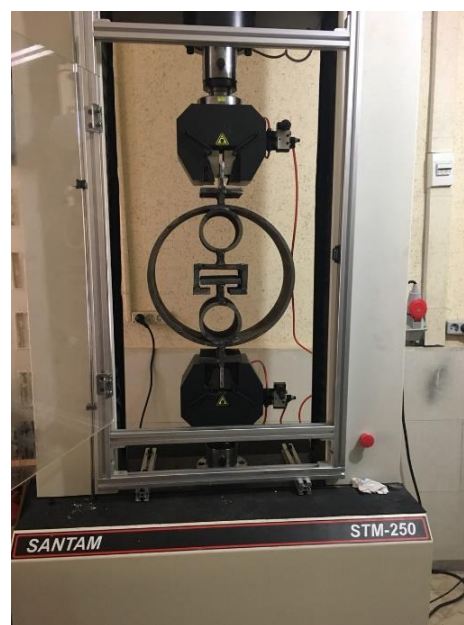
شکل ۲۳ نحوه‌ی برپایی و آرایش نمونه‌ها صورت چرخه‌ای را در دستگاه یونیورسال نشان می‌دهد. برای نصب نمونه بین فک‌های کششی و فشاری از صفحات فولادی با اتصال صلب به میراگر استفاده شده است



شکل ۲۲: جزییات قطعات مورد استفاده در نمونه‌ی آزمایشگاهی



(ب)



(الف)

شکل ۲۳: نمونه‌ی شماره‌ی یک تحت آزمایش (الف) نمونه‌ی تغییر شکل نیافته (ب) نمونه در تغییر مکان ۳۰ میلی متر کششی

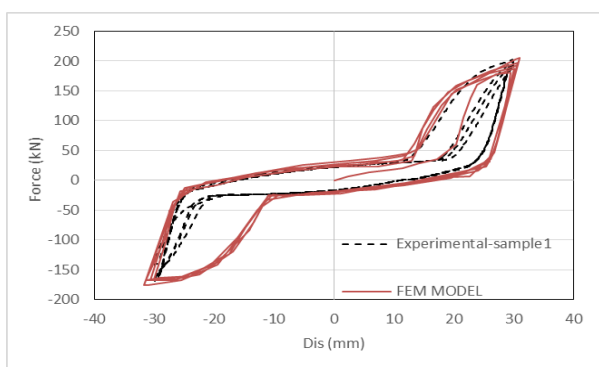
نمونه‌های معرفی شده تحت ۲۰ سیکل بارگذاری رفت و برگشتی قرار گرفتند. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد میراگر تسلیمی پیشنهاد شده بدون افت مقاومت و کاهش سختی سیکل‌های تعیین شده بارگذاری را بصورت رفت و برگشتی تحمل کند. شکست هر دو نمونه در محل اتصال دستگیره‌ی انتقال نیرو در حلقه‌ی داخلی اتفاق افتاد. تغییر شکل زیاد در دستگیره‌ی انتقال نیرو در سیکل ۲۲ در نمونه‌ی اول در شکل ۲۴ نشان داده شده است. افزایش این تغییر شکل سبب شده است انتقال نیرو از حلقه‌ی خارجی به داخلی رفته رفته

در بازه‌های تغییرمکانی زیادتری اتفاق بیفتد. نمونه‌ی دوم نیز با تحمل ۲۴ چرخه با دامنه‌ی ثابت توانسته است تغییرمکان‌های وارده را تحمل کند.

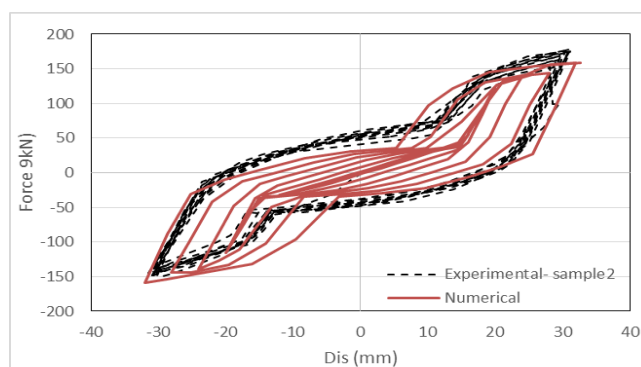


شکل ۲۴: تغییر شکل نهایی دستگیره‌ی انتقال نیرو در نمونه‌ی شماره‌ی یک

شکل ۲۶ و شکل ۲۵ نتایج نیرو تغییرمکان ثبت شده برای نمونه‌های آزمایشگاهی را نشان می‌دهد. همانگونه که قبلاً اشاره شد ابعاد دو نمونه به غیر از ضخامت حلقه‌ی داخلی برای هر دو نمونه یکسان انتخاب شده است. سطح نیروی مساوی در هر دو نمونه قبل از تغییرمکان گپ (۱۵ میلی‌متر) نشان دهنده‌ی مشخصات مشابه هر دو نمونه در فیوز اول (حلقه‌ی خارجی) می‌باشد. با کاهش ضخامت از ۱۰ به ۸ میلی‌متر مقدار نیروی ماکزیمم قابل تحمل در تغییرمکان ۳۰ میلی‌متر از مقدار ۲۰۰ کیلونیوتن به مقدار ۱۷۵ کیلونیوتن در همین تغییرمکان تغییر یافته‌است. همچنین با توجه به فرضیات مدلسازی ارائه شده در بخش عددی، نتایج به دست آمده از نتایج آزمایش و مدل عددی منطبق بر آن مقایسه شد که در شکل ۲۶ و ۲۶ نشان داده شده‌است. مقایسه‌ی نمودارها حاکی از تطابق مناسب نتایج مطالعات تجربی و عددی می‌باشد.



شکل ۲۶: صحت سنجی نتایج نمونه‌ی آزمایشگاهی و عددی برای نمونه‌ی اول



شکل ۲۵: صحت سنجی نتایج نمونه‌ی آزمایشگاهی و عددی برای نمونه‌ی دوم

۵- نتیجه گیری

در این تحقیق هدف ارایه میراگر دوسطحی حلقوی است که علاوه بر دارا بودن هندسه‌ی ساده برای ساخت، قابلیت کنترل سازه در دو سطح زمین لرزه را دارا باشد. نتایج مدل‌های عددی نشان می‌دهد تمام مدل‌ها توانسته‌اند چرخه‌های وارده را بخوبی و بدون کاهش مقاومت و سختی تحمل کنند. افزایش سختی و نیرو پس از فاصله‌ی تغییرمکانی اتفاق افتاده است.

تغییرات قطر و ضخامت در مدل‌های عددی نشان داده است تغییرات ضخامت تاثیر بیشتری در سهم نیروهای منتقل شده به فیوز دوم دارد. به نحوی که افزایش ضخامت سهم نیروی وارد بر فیوز داخلی را افزایش داده و بالعکس افزایش قطر سبب کاهش این سهم میگردد.

مقادیر انرژی تلف شده برای مدل‌های عددی میراگر دوسطحی نشان می‌دهد در سیکل‌های بالا به دلیل عملکرد غیر خطی هر دو فیوز سطح جذب انرژی افزایش ناگهانی داشته است. مقادیر میرایی و اسکوز معادل برای مدل‌های عددی در تغییرشکل نهایی برابر ۱۵ درصد محاسبه شده است.

دو نمونه‌ی آزمایشگاهی بر اساس مدل‌های عددی، ساخته شده و مورد آزمایش قرار گرفتند. نتایج آزمایش به صورت نمودار نیروتغییرمکان برای هر دو نمونه به دست آمده است. منحنی‌های ثبت شده، عملکرد دو سطحی مدل‌های عددی را تایید می‌کند. مدل عددی منطبق بر ابعاد نمونه‌ی آزمایش ساخته شده تحت بارگذاری چرخه‌ای قرار گرفت و نتایج نشان داد تطابق خوبی بین عملکرد نمونه‌ی آزمایشگاهی و مدل عددی به دست آمد.

فهرست علائم

انرژی جذب شده	E_D
انرژی کرنشی	E_{so}
نیروی میراگر دوسطحی	F_s
نیروی تسلیم میراگر اول	f_{y1}
نیروی تسلیم میراگر دوم	f_{y2}
سختی الاستیک فیوز اول	K_{d1}
سختی الاستیک فیوز دوم	K_{d2}
نیروی حلقه	F
طول حلقه	L
شعاع حلقه	R
ضخامت حلقه	t
تغییرمکان	u
تغییرمکان گپ	Δ_{gap}
تغییرمکان تسلیم فیوز اول	Δ_{yd1}
تغییرمکان تسلیم فیوز دوم	Δ_{yd2}
میرایی معادل	ζ_{eq}

منابع

[1] V.V. Bertero, Performance of steel building structure during the Northridge earthquake, Report No. UCB/EERC-94/09, (1994).

- [2] M. Symans, F. Charney, A. Whittaker, M. Constantinou, C. Kircher, M. Johnson, R. McNamara, Energy dissipation systems for seismic applications: current practice and recent developments, *Journal of Structural Engineering*, 134(1) (2008) 3-21.
- [3] Y.E. Ibrahim, J. Marshall, F.A. Charney, A visco-plastic device for seismic protection of structures, *Journal of Constructional Steel Research*, 63(11) (2007) 1515-1528.
- [4] D.H. Kim, Y.K. Ju, M.H. Kim, S.D. Kim, Wind-induced vibration control of tall buildings using hybrid buckling-restrained braces, *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 23(7) (2014) 549-562.
- [5] M. Montgomery, C. Christopoulos, Experimental validation of viscoelastic coupling dampers for enhanced dynamic performance of high-rise buildings, *Journal of Structural Engineering*, 141(5) (2014) 04014145.
- [6] R.J. Smith, M.R. Willford, The damped outrigger concept for tall buildings, *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 16(4) (2007) 501-517.
- [7] J.D. Marshall, F.A. Charney, A hybrid passive control device for steel structures, I: Development and analysis, *Journal of Constructional Steel Research*, 66(10) (2010) 1278-1286.
- [8] S. Cherry, A. Filiatrault, Seismic response control of buildings using friction dampers, *Earthquake Spectra*, 9(3) (1993) 447-466.
- [9] D.K. Nims, P.J. Richter, R.E. Bachman, The use of the energy dissipating restraint for seismic hazard mitigation, *Earthquake Spectra*, 9(3) (1993) 467-489.
- [10] G. Dargush, T. Soong, Behavior of metallic plate dampers in seismic passive energy dissipation systems, *Earthquake Spectra*, 11(4) (1995) 545-568.
- [11] K.-C. Tsai, H.-W. Chen, C.-P. Hong, Y.-F. Su, Design of steel triangular plate energy absorbers for seismic-resistant construction, *Earthquake Spectra*, 9(3) (1993) 505-528.
- [12] A. Wada, Y.H. Huang, M. Iwata, Passive damping technology for buildings in Japan, *Progress in structural engineering and materials*, 2(3) (2000) 335-350.
- [13] C.-H. Lee, J. Kim, D.-H. Kim, J. Ryu, Y.K. Ju, Numerical and experimental analysis of combined behavior of shear-type friction damper and non-uniform strip damper for multi-level seismic protection, *Engineering Structures*, 114 (2016) 75-92.
- [14] D.-H. Kim, C.-H. Lee, Y.K. Ju, Experimental investigation of hybrid buckling-restrained braces, *International Journal of Steel Structures*, 17(1) (2017) 245-255.
- [15] B. Hosseini Hashemi, E. Moaddab, Experimental study of a hybrid structural damper for multi-seismic levels, *Proceedings of the institution of civil engineers-structures and buildings*, 170(10) (2017) 722-734.
- [16] A.A. Nia, J.H. Hamedani, Comparative analysis of energy absorption and deformations of thin walled tubes with various section geometries, *Thin-Walled Structures*, 48(12) (2010) 946-954.
- [17] M. Bazzaz, Z. Andalib, A. Kheyroddin, M.A. Kafi, Numerical comparison of the seismic performance of steel rings in off-centre bracing system and diagonal bracing system, *Journal of Steel and Composite Structures*, 19(4) (2015) 917-937.
- [18] Z. Andalib, M.A. Kafi, M. Bazzaz, S. Momenzadeh, Numerical evaluation of ductility and energy absorption of steel rings constructed from plates, *Engineering Structures*, 169 (2018) 94-106.
- [19] M. Deihim, M.A. Kafi, A parametric study into the new design of a steel energy-absorbing connection, *Engineering Structures*, 145 (2017) 22-33.
- [20] A. Cheraghi, S.M. Zahrai, Innovative multi-level control with concentric pipes along brace to reduce seismic response of steel frames, *Journal of Constructional Steel Research*, 127 (2016) 120-135.
- [21] A. Cheraghi, S.M. Zahrai, Cyclic testing of multilevel pipe in pipe damper, *Journal of Earthquake Engineering*, (2017) 1-24.
- [22] F. Prestandard, commentary for the seismic rehabilitation of buildings (FEMA356), Washington, DC: Federal Emergency Management Agency, 7 (2000).
- [23] C. ANSYS, ANSYS CFX User's Guide Release 12.0, ANSYS Inc, (2009).
- [24] A.A. Nia, S. Chahardoli, Optimizing the layout of nested three-tube structures in quasi-static axial collapse, *Thin-Walled Structures*, 107 (2016) 169-181.
- [25] A. Standard, E8/E8M, 2009. Standard test methods for tension testing of metallic materials. ASTM international, West Conshohocken PA; 2009. doi: 10.1520, E0008-E0008M-09, www. astm. org.
- [26] J.C. Simo, Numerical analysis and simulation of plasticity, *Handbook of numerical analysis*, 6 (1998) 183-499.