

مطالعه عددی پارامترهای مؤثر بر رفتار میراگر غلطکی بیضوی به منظور استفاده در جداساز لرزه‌ای

حدیث وکیلی صادقی^۱، نادر فنائی^{۲*}، مجید لطیفی^۳

۱- دانشجوی دکتری سازه، مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

۲- دانشیار گروه سازه، مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

۳- مدیرعامل، شرکت فولاد ماشین، نکاء

* تهران، صندوق پستی ۴۴۱۶-۵۸۷۵، fanaie@kntu.ac.ir

چکیده

میراگرهای تسلیمی به دلیل قابلیت بالای جذب انرژی و بهبود پایداری سازه، به عنوان یکی از روش‌های مؤثر در کاهش اثرات مخرب زلزله مورد توجه قرار گرفته‌اند. در این پژوهش، رفتار میراگر غلطکی بیضوی به عنوان نمونه‌ای بهینه از این نوع میراگرها بررسی شده است. میراگر غلطکی بیضوی، با اضافه شدن غلطک به میراگر بیضوی متداول که از نوع تسلیمی است، قابلیت تحمل مقدار قابل توجهی بار ثقلی و بار قائم زلزله را به این میراگر می‌افزاید و باعث کاهش بار مرده بر دیگر اجزای سیستم باربر ثقلی می‌شود. با استفاده از مدل‌سازی عددی در نرم‌افزار آباکوس، تأثیر پارامترهای هندسی مانند طول، عرض، ضخامت، ارتفاع و تعداد غلطک‌ها بر عملکرد میراگر مورد تحلیل قرار گرفت. نتایج نشان داد که افزایش عرض و ضخامت و کاهش ارتفاع موجب بهبود عملکرد میراگر در جذب انرژی و افزایش مقاومت جانبی می‌شود؛ در حالی که افزایش طول و تعداد غلطک‌ها اثری بر منحنی هیستریزس ندارد اما می‌تواند در پایداری عملکرد و سازگاری با بارهای ثقلی مؤثر باشد. علاوه بر این، میراگر غلطکی بیضوی توانایی ارائه چرخه‌های هیستریزس پایدار در زوایای مختلف بارگذاری را دارا می‌باشد. در پایان، طراحی بهینه‌ای برای استفاده از این میراگر در جداسازهای لرزه‌ای ارائه شد که انتظار می‌رود به طور مؤثر در کاهش انتقال انرژی زلزله به سازه و بهبود پایداری آن مؤثر باشد.

واژگان کلیدی

تحلیل اجزای محدود، منحنی هیستریزس، مطالعه پارامتریک، میراگر غلطکی بیضوی، جداساز لرزه‌ای

Numerical Study of Key Parameters Affecting the Behavior of Elliptical Roller Dampers for Using in Seismic Isolators

H. Vakili Sadeghi, N. Fanaie

Abstract

Yielding dampers are widely regarded as an effective method for reducing the destructive effects of earthquakes due to their high energy absorption capability and enhancement of structural stability. Elliptical roller damper integrates rollers into the conventional elliptical damper that is a yielding type, enabling it to sustain substantial gravity and vertical earthquake loads, and alleviates the dead load imposed on other components within the gravity load-bearing system. In this study, the performance of the elliptical roller damper, as an optimized example of such dampers, was investigated. Using numerical modeling in Abaqus software, the effects of geometric parameters such as length, width, thickness, height, and the number of rollers on the damper's performance were analyzed. The results showed that increasing the width and thickness and reducing the height significantly improved the energy absorption capacity and lateral strength of the damper, while increasing the length and number of rollers had no effect on the hysteresis curve but contributed to the stability of the damper under gravity loads. Furthermore, the elliptical roller damper demonstrated stable hysteresis loops in various loading angles, indicating its capacity to withstand different directions of loading. Finally, an optimized design for using this damper in seismic isolators was proposed, which is expected to effectively reduce the transfer of seismic energy to the structure and enhance its overall stability.

Keywords

Finite Element Analysis, Hysteresis Curve, Parametric Study, Elliptical Roller Damper, Seismic Base Isolator

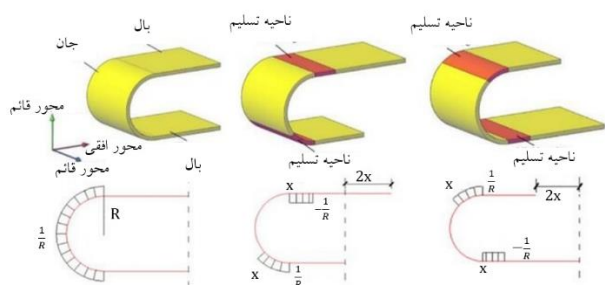
۱- مقدمه

ایدهٔ میراگرهای تسلیمی اولین بار توسط کیلی^۱ و همکاران در سال (۱۹۷۲) مطرح شد [۱] و در تحقیق دیگری در سال (۱۹۷۴) تکمیل گردید [۲]. میراگرهای تسلیم‌شونده از میان انواع مختلف سیستم‌های کنترل غیرفعال وابسته به تغییر مکان، با ورود به ناحیهٔ پلاستیک باعث اتلاف انرژی خواهند شد. عدم نیاز به منبع انرژی خارجی، چرخه‌های هیستریزس پایدار، سهولت نصب، تعویض پس از زلزله، عدم حساسیت به تغییرات دمایی و قیمت ارزان آن از جمله مزایایی است که باعث توجه محققین به این نوع میراگرها شده است.

میراگر U شکل جزء اولین اشکال میراگر تسلیمی است که با خم کردن یک ورق فلزی به شکل U قابل ساخت است. شکل منحنی آن برای جلوگیری از تمرکز تنش پیشنهاد شده است. میراگرهای U شکل دارای طراحی راحت، ساخت ارزان، منعطف در استفاده، محکم و قابل تعویض هستند. با قرارگیری دو میراگر U شکل روبه‌روی هم و اتصال آن‌ها به یکدیگر، میراگر بیضوی حاصل می‌شود. برای ساخت بخش بیضوی، دو روش وجود دارد. روش اول شامل خم کردن یک صفحهٔ واحد و اتصال دو انتهای آن به یکدیگر با جوش شیاری نفوذ کامل است. روش دوم شامل اتصال دو بخش U شکل است که روبه‌روی هم قرار می‌گیرند و در انتهای خود با جوش شیاری نفوذ کامل به هم متصل می‌شوند. در هر دو روش، محل جوش در صفحات صاف (بالا یا پایین یا هر دو) می‌باشد.

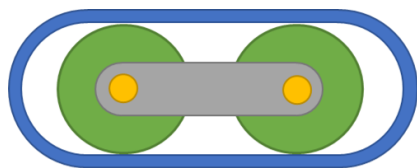
با اعمال نیرو به سیستم میراگر بیضوی، حرکات رفت و برگشتی تنها در بخش‌های منحنی رخ می‌دهد و قسمت‌های صاف بدون تغییر شکل باقی می‌مانند؛ درحالی‌که دو بخش منحنی به‌طور مداوم در حال حرکت و تغییر شکل هستند. این بخش‌های منحنی به‌عنوان اجزای اصلی میراگر برای اتلاف انرژی از طریق تغییر شکل‌های پلاستیک طراحی شده‌اند. صفحه‌های صاف بالایی و پایینی در هنگام تغییر شکل میراگر، به‌صورت متناوب و در دو جهت مخالف کشیده و فشرده می‌شوند. بخش‌های منحنی با حرکات غلطشی و خمشی، انرژی ورودی را مستهلک می‌کنند. با توجه به حرکت محوری در دو انتها، همان‌طور که در شکل (۱) دیده می‌شود، بخش تسلیم‌شوندهٔ المان‌های منحنی در امتداد صفحات صاف حرکت می‌کند و از تمرکز پلاستیسیته جلوگیری می‌نماید؛ این امر منجر به افزایش ظرفیت اتلاف انرژی می‌شود. به دلیل این حرکات، تمرکز تنش تنها در یک نقطه باقی نمی‌ماند،

بلکه در طول بخش منحنی جابه‌جا می‌شود؛ بنابراین نقطهٔ تسلیم نیز به‌طور مداوم تغییر می‌کند [۳].



شکل ۱- نحوهٔ عملکرد میراگر U شکل در اثر بارگذاری

میراگر تسلیمی بیضوی غلطکی که توسط وکیلی صادقی و همکاران [۴] معرفی گردیده و در شکل (۲) نشان داده شده است، شامل افزودن چندین غلطک به عنوان تحمل‌کننده‌های بار ثقلی و بار قائم می‌باشد. این غلطک‌ها به‌عنوان تحمل‌کننده‌های بار ثقلی و بار قائم زلزله عمل می‌کنند؛ به این معنا که آن‌ها با چرخش خود، نه تنها در استهلاک بارهای دینامیکی ناشی از زلزله مشارکت کرده، بلکه به تحمل وزن ثابت سازه نیز کمک می‌نمایند. این ویژگی، اجازه می‌دهد که میراگر بیضوی غلطکی، علاوه بر کاهش انتقال انرژی زلزله به سازه، در بهبود پایداری کلی سازه نیز مؤثر باشد.



شکل ۲- میراگر غلطکی بیضوی

این میراگر در سیستم‌های سازه‌های مختلفی از جمله قاب‌های خمشی، قابل استفاده است. به دلیل داشتن دامنهٔ حرکتی علاوه بر مشارکت هم‌زمان در سیستم باربر ثقلی و جانبی، یکی از کاربردهای آن را می‌توان در جداسازهای لرزه‌ای نام برد [۵]. پیش از این، پژوهش‌های متعددی بر کاربرد میراگرهای U شکل استاندارد در جداسازها یا افزودن غلطک به جداسازها انجام شده است که در ادامه به آن‌ها پرداخته می‌شود.

ابتدا سوزوکی^۲ و همکاران [۶] برای اثبات امکان به‌کاربردن این میراگرها در جداسازها به یک میراگر U شکل در زوایای مختلف، نیرو را با سرعت و در دماهای متفاوت اعمال کردند که مشخص شد سختی و مقاومت این میراگر به جهت اعمال نیرو بستگی ندارد و نمونه‌ها رفتار هیستریزس پایداری تحت سرعت‌ها

² Suzuki

¹ Kelly

و دماهای متفاوت از خود نشان دادند. ان^۱ و همکاران نیز رفتار خستگی میراگرهای U شکل را تحت بارگذاری دوطرفه به صورت شبه استاتیکی و دینامیکی مورد مطالعه قرار دادند و منحنی تعاملی^۲ را برای ارزیابی ظرفیت تغییرشکل الاستوپلاستیک نهایی آن‌ها پیشنهاد کردند [۷]. سپس اوه^۳ و همکاران یک نمونه دو طبقه با جداساز مجهز به میراگر را روی میز لرزه آزمایش کردند که این جداساز، کاهش نیاز لرزه‌ای را از طریق افزایش زمان تناوب سازه و متمرکز کردن تغییرشکل‌ها به طبقه همکف نشان داد [۸]. اوه و همکاران در ادامه مطالعات خود، میراگر U شکل را از فولاد با استحکام بالا ساختند و در نمونه دیگری در میراگر با فولاد معمولی سوراخ‌هایی به منظور توزیع یکنواخت تنش ایجاد کردند. سه قاب با پایه ثابت، با جداساز مجهز به میراگر با استحکام بالا و با جداساز مجهز به میراگر سوراخ‌دار بر میز لرزه آزمایش شدند. در آخر، جداساز مجهز به میراگر سوراخ‌دار به علت مقرون به صرفه بودن و عملکرد مناسب پیشنهاد شد [۹].

مانچالوار^۴ و باکر^۵ در سال (۲۰۲۰) به بررسی تحلیلی و مقایسه جداساز هسته سربی و جداساز مجهز به میراگر U شکل پرداختند. با اتصال آن‌ها به ساختمان پنج طبقه و اعمال چهار رکورد زلزله، تحلیل تاریخچه زمانی انجام دادند و نتیجه گرفتند مقادیر پاسخ، به طور قابل توجهی کاهش یافته‌اند [۱۰]. در پژوهش دیگری در سال (۲۰۲۱) وامشیشیلا^۶ و مانچالوار، کاربرد جداساز لرزه‌ای همراه با میراگر U شکل در یک ساختمان پنج طبقه تحت بارهای لرزه‌ای و انفجار تحت تحلیل غیرخطی تاریخچه زمانی را بررسی نمودند [۱۱]. نتایج نشان داد که وجود جداساز و میراگر U شکل باعث کاهش برش پایه، شتاب طبقه آخر و تغییرشکل‌های سازه می‌شود. در همان سال در تحقیق دیگری که توسط نگوین^۷ و گیزانی^۸ انجام شد، این میراگرها به جداسازی با هسته لاستیک طبیعی افزوده شد [۱۲]. میراگر و هسته به طور جداگانه تحت آنالیز عددی و تحلیلی قرار گرفتند. سپس به مجموعه آن‌ها، بارگذاری چرخه‌ای اعمال شد. طبق نتایج، این سیستم‌ها ظرفیت بالایی در استهلاک انرژی دارند و رفتارهای هیستریزس پایداری در هر جهت نشان می‌دهند. علاوه بر این، عملکرد این دستگاه‌ها با تغییر هندسه، تعداد و سطح مقطع U به راحتی قابل تنظیم است که آن‌ها را به یک راه‌حل کارآمد برای نیازهای طراحی جداسازهای لرزه‌ای

در مناطق با خطر لرزه‌ای بالا و متوسط تبدیل می‌کند. در سال (۲۰۲۳) نیز گایکواد^۹ و همکاران در پژوهشی با افزودن میراگر U شکل به جداساز با هسته سربی، این سیستم هیبریدی را در یک ساختمان پنج طبقه به کار بردند و تحلیل‌های غیرخطی با استفاده از نرم‌افزار SAP2000 بر روی آن انجام دادند [۱۳]. نتایج نشان داد که استفاده از این سیستم می‌تواند باعث کاهش پاسخ‌های سازه‌ای به زلزله شود؛ از جمله کاهش میزان برش پایه و انحراف طبقات که در نتیجه آن، خسارت به سازه کاهش می‌یابد. در تحقیق دیگری در همان سال پاراقی^{۱۰} و رستوگی^{۱۱}، میراگر U شکل با مقطع دوزنقه از آلایژ حافظه‌دار شکلی را به جداساز لرزه‌ای افزودند [۱۴]. ویژگی‌هایی مانند استحکام تسلیم، نیروی تسلیم، جابه‌جایی تسلیم، سختی اولیه، سختی پس از تسلیم، نسبت سختی و ظرفیت اتلاف انرژی برای میراگر پیشنهادی و سنتی با استفاده از تحلیل عددی اجزای محدود مقایسه شد. تغییرشکل پیشنهادی منجر به ایجاد یک میراگر U با شکل بهینه شد که قابلیت‌های اتلاف انرژی و تغییرشکل آن به طور قابل توجهی نسبت به میراگرهای U مستطیلی موجود در ادبیات فنی افزایش یافته است.

ایده استفاده از غلطک در جداسازها در سال (۱۹۹۳) توسط لین^{۱۲} و همکاران ارائه شد [۱۵] و در سال (۱۹۹۵) با انجام آزمایش‌هایی تکمیل گردید [۱۶]. آزمایش‌های این سیستم بر روی یک سازه یک طبقه با وزن ۳۲۶ کیلوگرم که بر روی مجموعه‌ای از غلطک‌های آزاد نصب شده است، بر روی یک میز لرزه به ابعاد ۳ × ۳ انجام گرفت. رفتار دینامیکی سازه جداسازی شده مورد مطالعه قرار گرفت و برای صحت‌سنجی نتایج تحلیلی استفاده شد. در سیستم جداساز، ضریب اصطکاک غلطشی دینامیکی که در سرعت‌های زاویه‌ای مختلف اندازه‌گیری شد، دو زلزله، یکی با زمان تناوب کوتاه و دیگری با زمان تناوب بلند از تایوان، به عنوان سیگنال‌های ورودی مورد استفاده قرار گرفتند. شتاب‌های تجربه‌شده توسط روسازه در مقایسه با شرایط پایه ثابت، کاهش یافت. در آخر با افزودن فنر، تغییر مکان دائمی ایجادشده را اصلاح نمودند.

همچنین راهنمای جامعی به منظور کاربرد غلطک در جداساز پل‌ها توسط لی^{۱۳} و همکاران در سال (۲۰۰۷) ارائه گردید [۱۷]. آن‌ها در مقاله‌ای دیگر در سال (۲۰۱۰) یک جداساز لرزه‌ای جدید

9 Gaikwad

10 Paraghi

11 Rastogi

12 Lin

13 Lee

1 Ene

2 Interaction Curve

3 Oh

4 Manchalwar

5 Bakre

6 Vamshisheela

7 Nguyen

8 Guizani



را ارائه دادند که با استفاده از غلطک‌های استوانه‌ای بر روی سطوح شیب‌دار هفتی شکل کار می‌کند [۱۸]. این جداساز دارای ویژگی‌های مطلوب شتاب طیفی ثابت، قابلیت مرکزگرایی و مکانیزم اصطکاک لغزشی داخلی است. آن‌ها در این مقاله رفتار لرزه‌ای تکیه‌گاه را از طریق مطالعات تحلیلی و تجربی بررسی نمودند.

طیاران و حسینی نیز استفاده از غلطک‌های بالشتی در جداسازهای لرزه‌ای ساختمان‌های کوتاه تا میان‌مرتبه را بررسی کردند [۱۹]. نتایج نشان داد که سیستم جداساز پیشنهادی می‌تواند شتاب مطلق ساختمان را به‌طور متوسط ۷۸٪ کاهش دهد و حداکثر جابه‌جایی ساختمان ۱/۷۷ برابر حرکت زمین باشد. **روات^۱** و **همکاران** نیز به بررسی تحلیلی ساختمان چند طبقه بر روی غلطک‌های لوله‌ای که در دو جهت عمود بر هم قرار داشتند، پرداختند [۲۰]. آن‌ها نتیجه‌گیری کردند که سیستم جداساز غلطکی در کاهش اثرات مخرب حرکات زمین‌لرزه نزدیک به گسل، مؤثر است.

نگارندگان این مقاله ابتدا در مطالعه‌ای تجربی به بررسی میراگر ابداعی خود یعنی میراگر غلطکی بیضوی پرداختند. در این پژوهش، دو میراگر از این نوع ساخته، سپس به‌طور هم‌زمان تحت بارگذاری ثقیل و تغییر مکان جانبی چرخه‌ای قرار داده شدند. بار ثقیل در این آزمایش، به‌عنوان نماینده بار ثقیل ساختمان و بار قائم زلزله در نظر گرفته شد. در این مقاله نشان داده شد که تغییر نیروی ثقیل و ضریب اصطکاک، تأثیری بر رفتار میراگرهای غلطکی بیضوی ندارد و چرخش غلطک‌ها در راستای حرکت جانبی میراگر، به‌طور مؤثری اصطکاک را حذف می‌کند [۴]. این ویژگی، میراگرهای غلطکی بیضوی را به گزینه‌ای مناسب برای استفاده در جداسازهای لرزه‌ای تبدیل کرده است. با این حال، تاکنون کاربرد این میراگرها در سیستم‌های سازه‌ای، به‌ویژه در جداسازهای لرزه‌ای، مورد بررسی قرار نگرفته است.

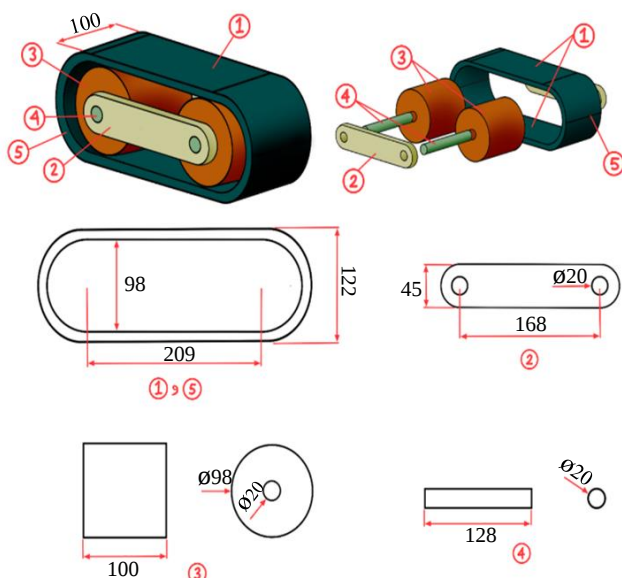
همان‌طور که گفته شد، مطالعات زیادی بر افزودن میراگر U شکل به جداساز یا جداسازهای غلطکی، جداگانه بررسی شده است، اما جای ترکیب این روش‌ها در ادبیات فنی خالی است. جداسازهای لرزه‌ای مجهز به این نوع میراگر فاقد هسته سربی هستند و در عین حال، هم‌زمان از مزایای مکانیزم غلطکی (مانند کاهش اصطکاک) و رفتار تسلیمی میراگرهای بیضوی (مانند جذب انرژی مؤثر) بهره می‌برند. این ترکیب می‌تواند عملکرد جداسازهای لرزه‌ای را بهبود بخشد و آن‌ها را از نظر زیست‌محیطی و اقتصادی نیز به گزینه‌ای بهینه‌تر تبدیل نماید. میراگر غلطکی بیضوی به‌گونه‌ای طراحی شده است که امکان تعویض آن پس از زلزله وجود داشته باشد. این میراگرها با استفاده

از اتصالات پیچ و مهره به سازه متصل شده‌اند، که این امر فرآیند جداسازی و تعویض آن‌ها را نسبتاً ساده می‌کند. با این حال، در هنگام تعویض، استفاده از جک‌های موضعی ضروری است. این جک‌ها برای پشتیبانی موقت بار سازه در طول فرآیند جداسازی و نصب مجدد میراگر به‌کار می‌روند. این روش باعث می‌شود که سازه اصلی در طول عملیات تعویض، پایدار و ایمن باقی بماند. به‌منظور بررسی دقیق‌تر این میراگرها و شناخت پارامترهای مؤثر بر عملکرد آن‌ها در جداسازهای لرزه‌ای، در این پژوهش ابتدا پارامترهای مؤثر بر رفتار میراگر بررسی شده و در نهایت، شکل بهینه میراگر برای استفاده در جداسازها پیشنهاد شده است.

۲- صحت‌سنجی مدل عددی

هندسه میراگر مطابق شکل (۳) با توجه به آزمایش انجام‌شده توسط همین تیم تحقیقاتی، در نرم‌افزار آباکوس ساخته و مش‌بندی شد [۲۱]. طول قسمت صاف ۲۰۹ میلی‌متر، عرض میراگر ۱۰۰ میلی‌متر، ضخامت قسمت بیضوی ۱۲ میلی‌متر و ارتفاع داخلی میراگر ۹۸ میلی‌متر بود.

المان‌ها از نوع ۸ گره‌ای و انتگرال‌گیری کاهش‌یافته انتخاب شدند. آنالیز حساسیت اندازه مش بر اساس اندازه مش قسمت بیضوی و مقاومت جانبی میراگر مطابق شکل (۴) انجام گرفت. نتایج نشان داد که با کاهش اندازه مش قسمت بیضوی به ۲/۵ میلی‌متر، تعداد لایه‌های المان به ۵ افزایش یافت، اما تغییر قابل‌توجهی در نتایج مشاهده نشد. بر این اساس، اندازه مش قسمت بیضوی، غلطک‌ها و پین‌ها ۵ میلی‌متر، صفحه رابط و صفحه بارگذاری ۱۰ میلی‌متر انتخاب شد.

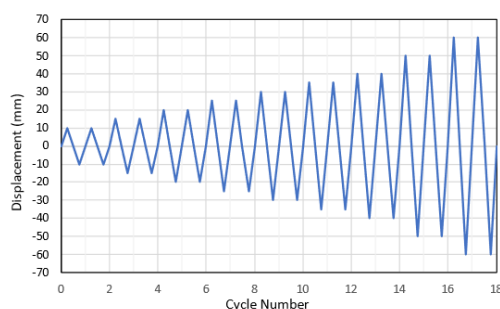


شکل ۳- هندسه میراگر غلطکی بیضوی

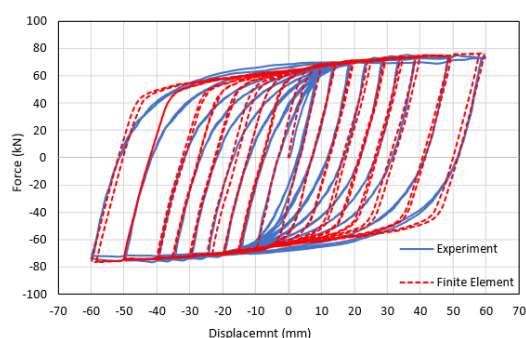
¹ Rawat

صفحه رابط بین میله‌ها که در آزمایش پرچ شده بود، چسبیده شد. سپس بین دوه‌دو صفحات باقی‌مانده تماس سطح به سطح برقرار شد و ضریب اصطکاک بین اعضای فولادی به دلیل کم بودن اصطکاک در اثر چرخش غلطک‌ها ۰/۲ فرض گردید و اعضا در جهت برون صفحه مقید شدند تا شرایط مشاهده‌شده در آزمایش را به درستی شبیه‌سازی نمایند. انتهای صفحه زیرین نیز در شش جهت مقید گردید.

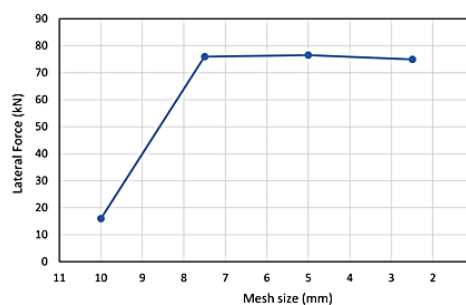
برای بارگذاری در قدم اول نیروی ثقلی ۱۸ تنی به صورت یک نیروی متمرکز فشاری بر صفحه بارگذاری فوقانی اعمال شد. در قدم بعد نیروی جانبی به صورت تغییرمکان-کنترل به تعداد ۱۸ چرخه از تغییرمکان ۱۰ میلی‌متر تا حداکثر ۶۰ میلی‌متر مطابق شکل (۷) به صفحه فوقانی اعمال شد. تغییرمکان بر اساس FEMA 461 در هر چرخه، حداکثر ۴۰ درصد مقدار قبلی افزایش یافت و هر مقدار به تعداد دو چرخه تکرار شد [۲۲]. منحنی هیستریزس حاصل از تحلیل و مقایسه آن با هیستریزس آزمایش در شکل (۸) قابل مشاهده است. همچنین کانتور تنش و کرنش پلاستیک معادل، حاصل از تحلیل در شکل (۹) ارائه شده است.



شکل ۷- پروتکل بارگذاری

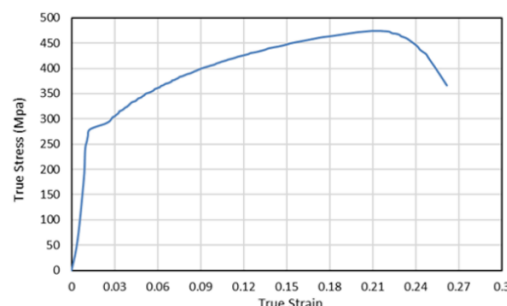


شکل ۸- مقایسه منحنی هیستریزس آباکوس و آزمایش

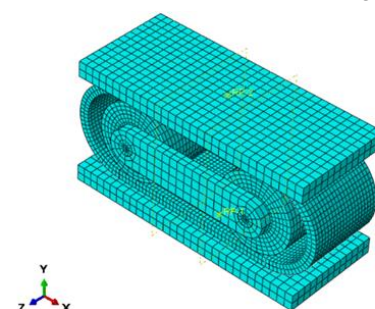


شکل ۹- تحلیل حساسیت اندازه مش

برای دستیابی به نمایش دقیق‌تری از رفتار فولاد ST37 در تحلیل اجزای محدود، منحنی تنش-کرنش واقعی محاسبه شده و در شکل (۵) نشان داده شده است. این منحنی از منحنی مهندسی تنش-کرنش به دست آمده از آزمون کشش با اعمال تبدیل‌های استاندارد برای محاسبه تنش واقعی و کرنش واقعی به دست آمده است. سخت‌شوندگی با توجه به نتایج به دست آمده از آزمایش، از نوع سینماتیک انتخاب شد. در سخت‌شوندگی سینماتیک، اندازه صفحه تسلیم ثابت می‌ماند اما مرکز آن جابه‌جا می‌شود. همچنین صفحات بارگذاری صلب تعریف شدند. مدل ساخته شده در آباکوس در شکل (۶) نشان داده شده است.



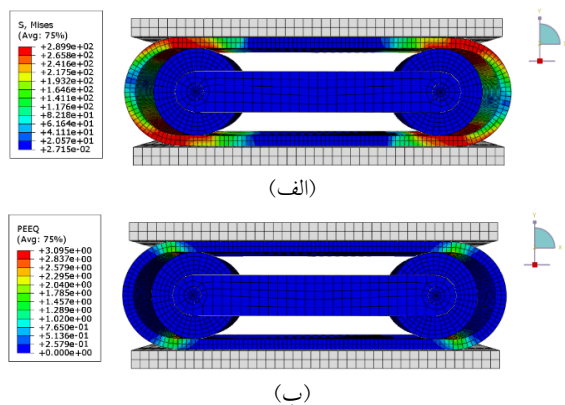
شکل ۵- منحنی تنش-کرنش واقعی فولاد



شکل ۶- مدل اجزای محدود میراگر در نرم‌افزار آباکوس

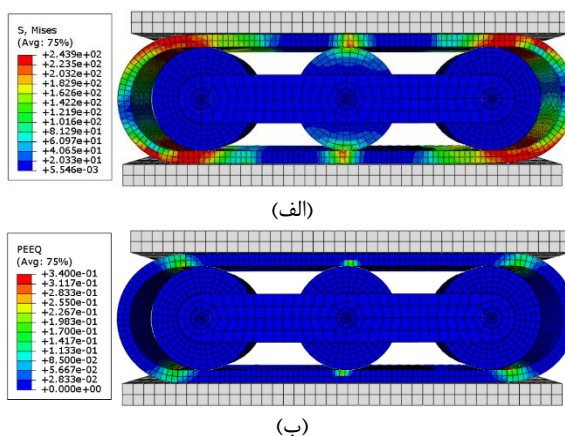
در مرحله بعد، قسمت‌های جوش شده در آزمایش در مدل عددی به همدیگر چسبیده^۱ شدند. همچنین میله داخل سیلندر به

^۱ Tie



شکل ۱۰- کانتورهای میراگر با طول ۱۵۰٪ مقدار اولیه در انتهای تحلیل: (الف) تنش فونمیسز بر حسب MPa (ب) کرنش پلاستیک معادل

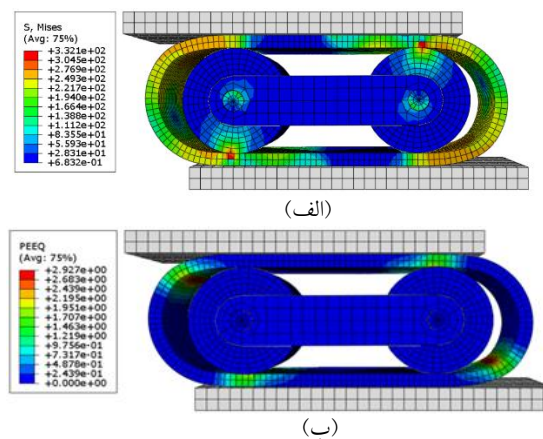
سپس در حالتی که طول قسمت صاف ۳۱۳ میلی‌متر است، یک غلطک دیگر به میراگر افزوده شد تا تأثیر تعداد غلطک‌ها بر رفتار میراگر به‌منظور کاربرد در جداساز سنجیده شود. این عمل، تأثیری بر منحنی هیستریزس نداشت. کانتور تنش و کرنش پلاستیک معادل میراگر سه‌غلطکه در شکل (۱۱) قابل مشاهده است.



شکل ۱۱- کانتورهای میراگر با سه غلطک در انتهای تحلیل: (الف) تنش فونمیسز بر حسب MPa (ب) کرنش پلاستیک معادل

۳-۲- تغییر عرض

عرض میراگر به مقدار ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ درصد مقدار اولیه (۹۰ تا ۵۰ میلی‌متر) کاهش یافت و مقدار مقاومت جانبی به‌ترتیب به اندازه ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ درصد مقدار اولیه به‌ازای هر مقدار کاهش یافت. سپس عرض میراگر به مقدار ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ درصد مقدار اولیه (۱۱۰ تا ۱۵۰ میلی‌متر) افزایش یافت و مقدار مقاومت جانبی به‌ترتیب به اندازه ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ درصد مقدار اولیه به‌ازای هر مقدار افزایش یافت. شکل‌های (۱۲) و (۱۳) منحنی هیستریزس میراگر را در عرض‌های متفاوت نشان می‌دهند که تعدادی از منحنی‌های میانی به‌دلیل وضوح بهتر شکل حذف گردیده‌اند. تغییرات مقاومت جانبی با تغییر عرض، به‌دلیل



شکل ۹- کانتورها پس از تحلیل در تغییر مکان حداکثر: (الف) تنش فونمیسز بر حسب MPa (ب) کرنش پلاستیک معادل

۳- مطالعه پارامتریک

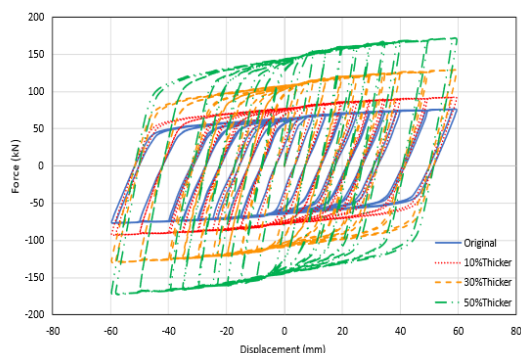
از مهم‌ترین پارامترهای مؤثر بر رفتار میراگر در جداساز لرزه‌ای، پارامترهای هندسی است [۲۳]. بنابراین مرحله اول، انجام تحلیل پارامتری است، به این معنا که متغیرهای هندسی تأثیرگذار احتمالی بر جذب انرژی میراگر در مدل عددی تغییر می‌کنند و نتایج به‌دست‌آمده با حالت اولیه مقایسه می‌شوند. در انتهای تحلیل پارامتری، مؤثرترین متغیرها بر روی جذب انرژی میراگر غلطکی بیضوی به‌ترتیب مشخص می‌شوند. این متغیرها شامل طول قسمت صاف، عرض، ضخامت و ارتفاع است.

۳-۱- تغییر طول

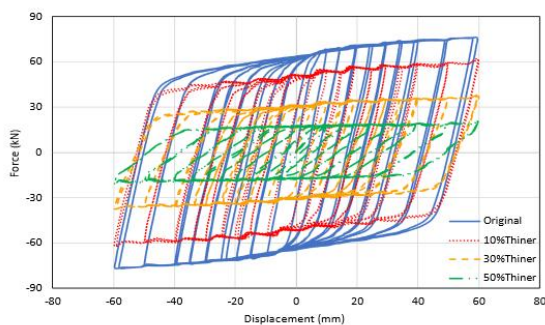
تأثیر تغییر طول قسمت صاف بر مقاومت جانبی میراگر به‌صورت عددی بررسی گردید. در مدل‌های جداگانه طول قسمت صاف از ۷۰ درصد مقدار اولیه یعنی ۱۴۶ میلی‌متر، هر بار ۱۰ درصد تا ۱۵۰ درصد مقدار اولیه یعنی ۳۱۳ میلی‌متر افزایش یافت و اثری بر منحنی هیستریزس نداشت. بی‌اثر بودن تغییر طول قسمت صاف بر منحنی به‌دلیل عدم تسلیم این قسمت و عدم مشارکت آن در استهلاک انرژی است. کانتور تنش و کرنش پلاستیک معادل میراگر با افزایش طول ۵۰ درصدی در شکل (۱۰) قابل مشاهده است.

۳-۳- تغییر ضخامت

ضخامت قسمت بیضوی از ۵۰ درصد مقدار اولیه یعنی ۶ میلی متر تا ۱۵۰ درصد مقدار اولیه یعنی ۱۸ میلی متر تغییر یافت و مقدار تغییر ضخامت متناسب با مجذور درصد تغییر مقاومت میراگر بود. یعنی با تغییر ۵۰، ۶۰، ۷۰، ۸۰، ۹۰، ۱۱۰، ۱۲۰، ۱۳۰، ۱۴۰ و ۱۵۰ درصدی ضخامت، مقاومت به ترتیب به مقادیر ۲۵، ۳۶، ۴۹، ۶۴، ۸۱، ۱۲۱، ۱۴۴، ۱۶۹، ۱۹۶ و ۲۲۵ درصد مقدار اولیه رسید. شکل های (۱۵) و (۱۶) منحنی هیستریزیس میراگر در ضخامت های متفاوت را نشان می دهند که تعدادی از منحنی های میانی به دلیل وضوح بهتر شکل حذف گردیده اند. تغییرات مقاومت جانبی با تغییر ضخامت، به دلیل تغییرات ایجاد شده در اساس مقطع پلاستیک رخ داده اند، زیرا مقاومت جانبی با مجذور اساس مقطع پلاستیک نسبت مستقیم دارد. همچنین کانتور تنش و کرنش پلاستیک معادل میراگر با افزایش ضخامت ۵۰ درصدی در شکل (۱۷) قابل مشاهده است.

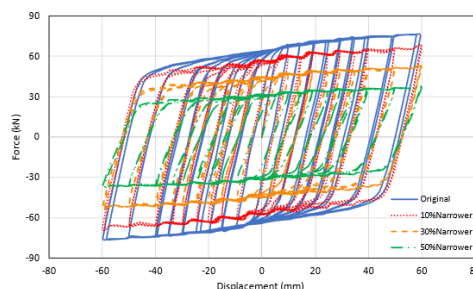


شکل ۱۵- اثر افزایش ضخامت قسمت بیضوی بر منحنی هیستریزیس

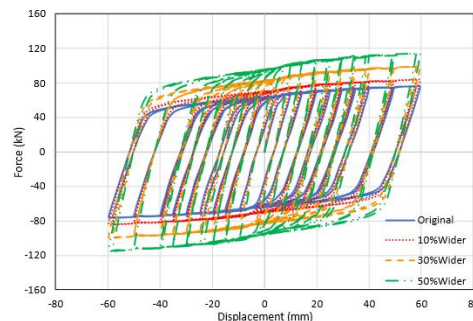


شکل ۱۶- اثر کاهش ضخامت قسمت بیضوی بر منحنی هیستریزیس

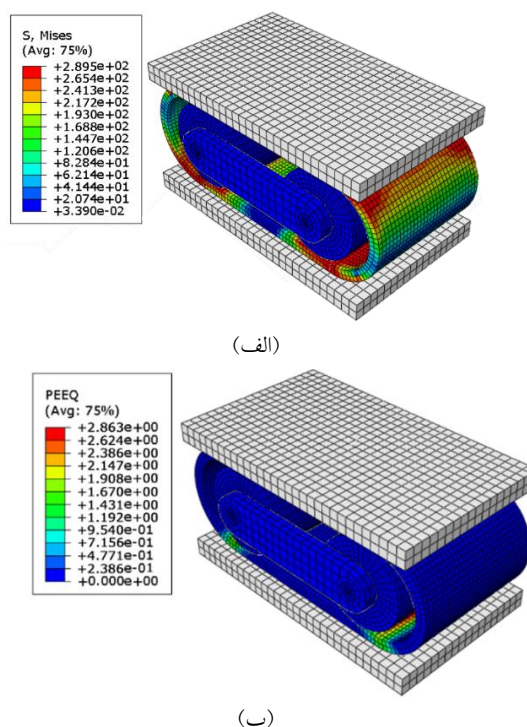
تغییرات ایجاد شده در اساس مقطع پلاستیک رخ داده اند، زیرا مقاومت جانبی با اساس مقطع پلاستیک نسبت مستقیم دارد. کانتور تنش و کرنش پلاستیک معادل میراگر با افزایش عرض ۵۰ درصدی در شکل (۱۴) قابل مشاهده است.



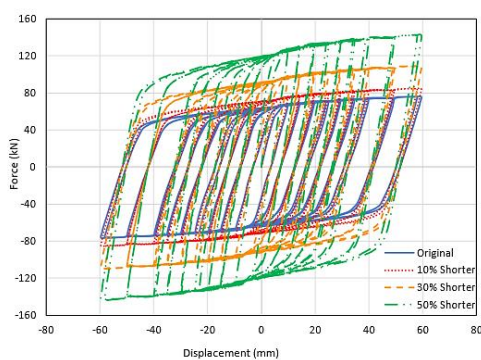
شکل ۱۲- اثر کاهش عرض میراگر بر منحنی هیستریزیس



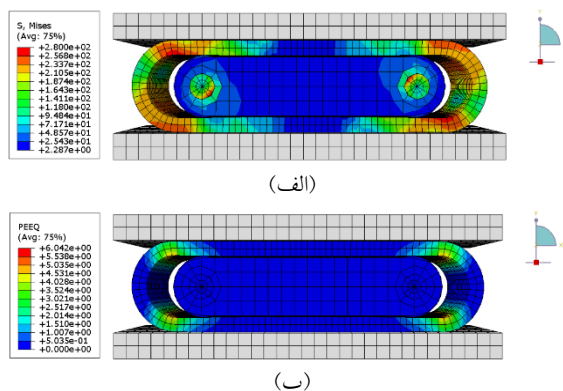
شکل ۱۳- اثر افزایش عرض میراگر بر منحنی هیستریزیس



شکل ۱۴- کانتورهای میراگر با عرض ۱۵۰٪ مقدار اولیه در انتهای تحلیل: (الف) تنش فون میسز بر حسب MPa (ب) کرنش پلاستیک معادل



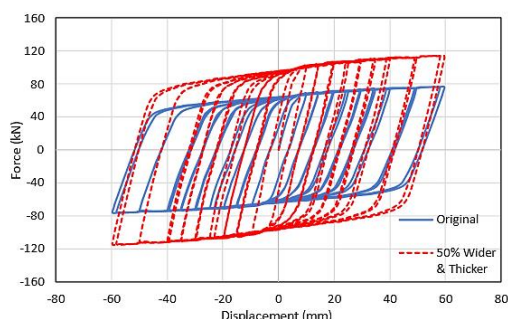
شکل ۱۹- اثر کاهش ارتفاع میراگر بر منحنی هیستریزیس



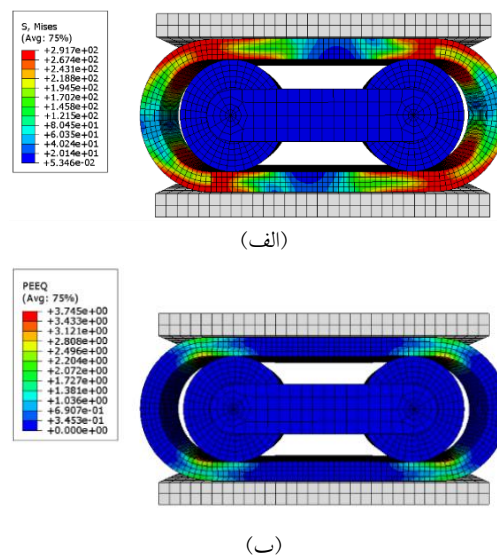
شکل ۲۰- کانتورهای میراگر با کاهش ۵۰٪ مقدار اولیه در انتهای تحلیل: (الف) تنش فون میسز بر حسب MPa (ب) کرنش پلاستیک معادل

۳-۵- تغییر عرض و ضخامت

برای بهبود هر چه بهتر رفتار میراگر، پارامترهای بهبوددهنده، هم‌زمان اعمال می‌شوند. ابتدا، مدلی با عرض ۱۵۰ میلی‌متر و ضخامت ۱۸ میلی‌متر ساخته شد که هر یک افزایش ۵۰ درصدی نسبت به مدل اولیه دارند. مشاهده شد که مقاومت میراگر مطابق شکل (۲۱) فقط به اندازه ۵۰ درصد افزایش یافت. این مقدار کم‌تر از مقدار پیش‌بینی شده بر اساس تغییرات عرض و ضخامت به‌طور مستقل است. همچنین کانتور تنش و کرنش پلاستیک معادل، حاصل از تحلیل در شکل (۲۲) قابل مشاهده است.



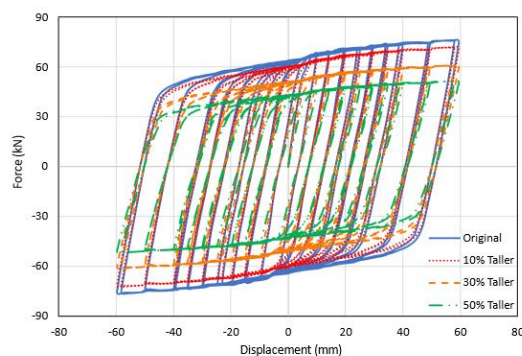
شکل ۲۱- اثر افزایش ۵۰ درصدی عرض و ضخامت بر منحنی هیستریزیس



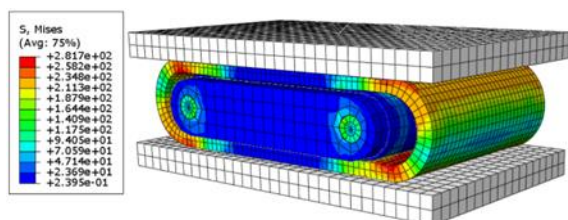
شکل ۱۷- کانتورهای میراگر با ضخامت ۱۵۰٪ مقدار اولیه در انتهای تحلیل: (الف) تنش فون میسز بر حسب MPa (ب) کرنش پلاستیک معادل

۳-۴- تغییر ارتفاع

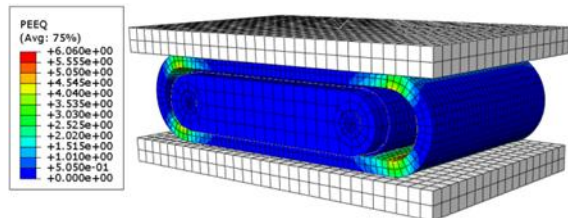
ارتفاع میراگر از ۵۰ درصد مقدار اولیه تا ۱۵۰ درصد مقدار اولیه تغییر یافت. با افزایش ارتفاع، نیروی جانبی کاهش و با کاهش آن نیروی جانبی افزایش پیدا کرد. درصد افزایش یا کاهش نیرو نیز همان‌طور که در شکل‌های (۱۸) و (۱۹) مشاهده می‌شود با عکس تغییرات ارتفاع رابطه مستقیم دارد. یعنی هر چه ارتفاع کاهش می‌یابد، نیروی جانبی بیش‌تر می‌شود. با تغییر ارتفاع به میزان ۵۰، ۶۰، ۷۰، ۸۰، ۹۰، ۱۱۰، ۱۲۰، ۱۳۰، ۱۴۰ و ۱۵۰ درصد، تغییرات مقاومت جانبی به ترتیب ۶۷، ۷۳، ۷۸، ۸۴، ۹۲، ۱۱۲، ۱۲۶، ۱۴۳، ۱۶۶ و ۲۰۰ درصد مقدار اولیه تغییر یافت. همچنین کانتور تنش و کرنش پلاستیک معادل میراگر با کاهش ارتفاع ۵۰ درصدی در شکل (۲۰) قابل مشاهده است.



شکل ۱۸- اثر افزایش ارتفاع میراگر بر منحنی هیستریزیس



(الف)

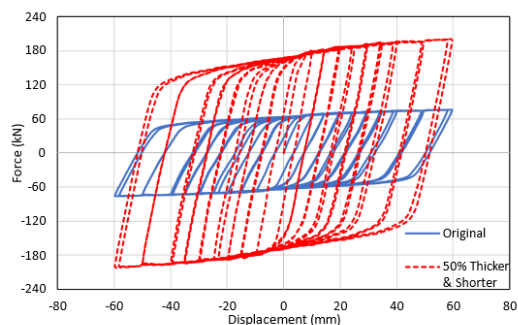


(ب)

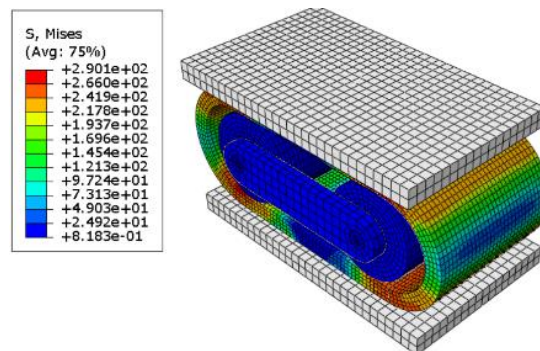
شکل ۲۴- کانتورهای میراگر با افزایش ۵۰ درصدی عرض و کاهش ۵۰ درصدی ارتفاع در انتهای تحلیل: (الف) تنش فون میسز بر حسب MPa (ب) کرنش پلاستیک معادل

۷-۳- تغییر ضخامت و ارتفاع

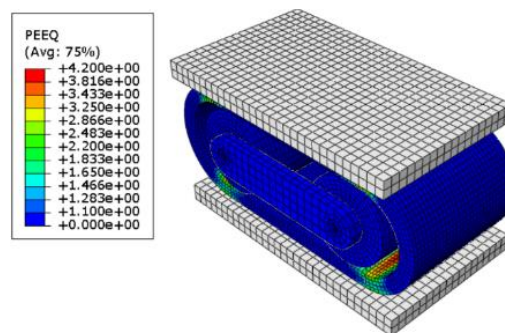
در مرحله بعد، کاهش ۵۰ درصدی ارتفاع و افزایش ۵۰ درصدی ضخامت به طور همزمان اعمال شد که نتیجه آن افزایش ۱۷۵ درصدی مقاومت جانبی میراگر مطابق شکل (۲۵) بود. کانتور تنش و کرنش پلاستیک معادل، حاصل از تحلیل در شکل (۲۶) قابل مشاهده است که نشان می دهد به میراگر، تنش و کرنش بسیار زیادی تحمیل شده است.



شکل ۲۵- اثر افزایش ۵۰ درصدی ضخامت و کاهش ۵۰ درصدی ارتفاع بر منحنی هیستریزس



(الف)

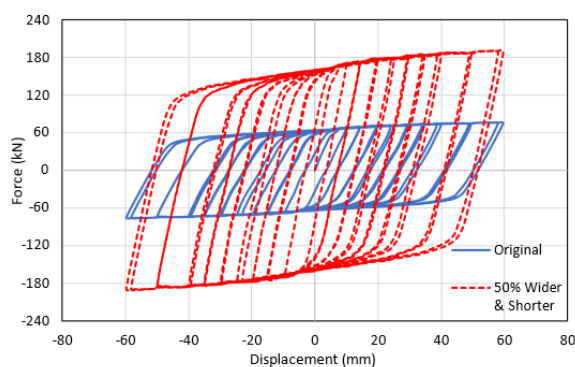


(ب)

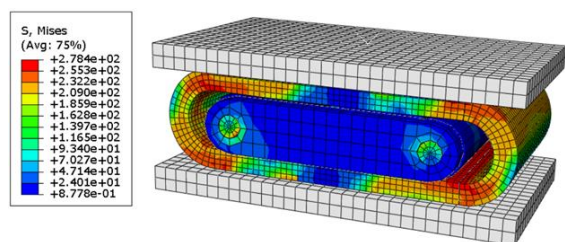
شکل ۲۲- کانتورهای میراگر با افزایش ۵۰ درصدی عرض و ضخامت در انتهای تحلیل: (الف) تنش فون میسز بر حسب MPa (ب) کرنش پلاستیک معادل

۶-۳- تغییر عرض و ارتفاع

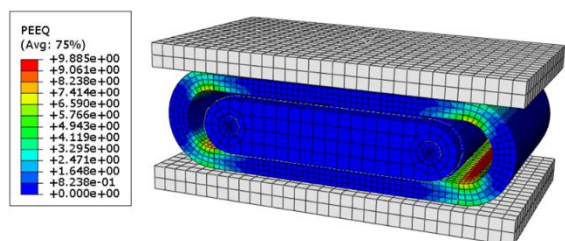
در مدلی دیگر، کاهش ۵۰ درصدی ارتفاع و افزایش ۵۰ درصدی عرض به طور همزمان اعمال شد که نتیجه آن افزایش ۱۵۰ درصدی مقاومت جانبی میراگر مطابق شکل (۲۳) بود. کانتور تنش و کرنش پلاستیک معادل، حاصل از تحلیل در شکل (۲۴) قابل مشاهده است که نشان می دهد کرنش زیادی به میراگر تحمیل شده است.



شکل ۲۳- اثر افزایش ۵۰ درصدی عرض و کاهش ۵۰ درصدی ارتفاع بر منحنی هیستریزس



(الف)

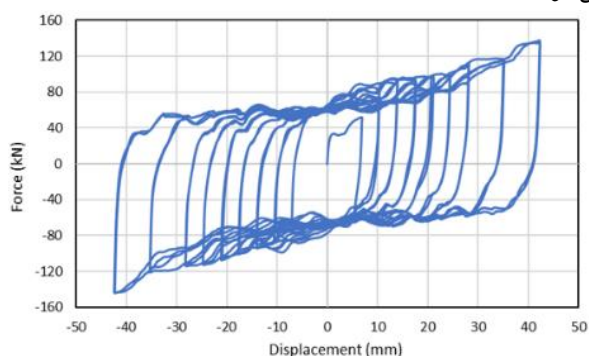


(ب)

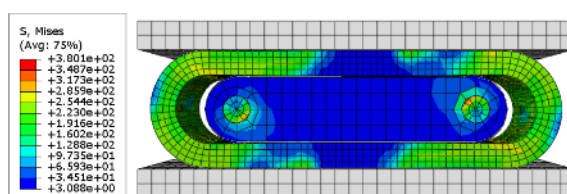
شکل ۲۸- کانتورهای میراگر با افزایش ۵۰ درصدی عرض و ضخامت و کاهش ۵۰ درصدی ارتفاع در انتهای تحلیل: (الف) تنش فون میسز بر حسب MPa (ب) کرنش پلاستیک معادل

۴- اعمال تغییر مکان مورب

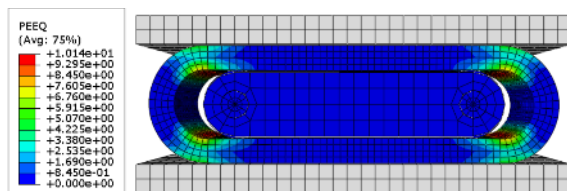
از آنجایی که جداسازهای لرزه‌ای تحت تغییر مکان در همه زوایا قرار می‌گیرند [۲۴]، می‌بایست میراگر غلطکی بیضوی نیز تحت بارگذاری مورب قرار گیرد تا توانایی آن در تحمل بارگذاری مورب سنجیده شود. به این منظور، میراگر اولیه تحت همان بارگذاری آزمایش اما با زاویه ۴۵ درجه قرار گرفت. منحنی هیستریزس میراگر در جهت حرکت غلطک‌ها و جهت عمود بر آن رسم گردید. همان‌طور که در شکل‌های (۲۹) و (۳۰) دیده می‌شود، این نمودارها دارای چرخه‌های پایدار بدون افت نیرو هستند. بر اثر این نوع بارگذاری، مقاومت جانبی میراگر افزایش یافته است اما منحنی هیستریزس در راستای جهت حرکت غلطک‌ها به دلیل ایجاد اصطکاک با آن‌ها، ناهموار شده است. کانتور تنش و کرنش پلاستیک معادل حاصل از تحلیل در شکل (۳۱) قابل مشاهده است که نشان می‌دهد به میراگر، تنش بسیار زیادی تحمیل شده است. قسمت بیضوی در این نوع بارگذاری، دچار تغییر شکل‌های برشی و خمشی به‌طور هم‌زمان می‌شود.



شکل ۲۹- منحنی هیستریزس میراگر در جهت حرکت غلطک‌ها



(الف)

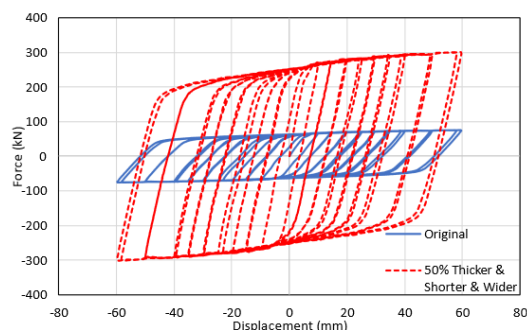


(ب)

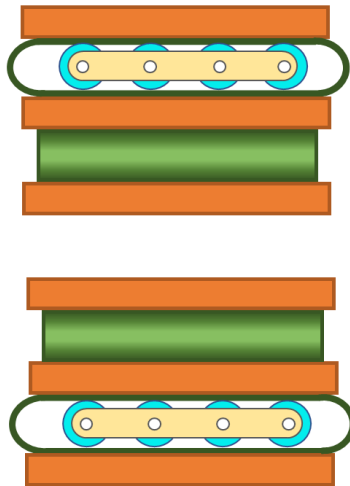
شکل ۲۶- کانتورهای میراگر با افزایش ۵۰ درصدی ضخامت و کاهش ۵۰ درصدی ارتفاع در انتهای تحلیل: (الف) تنش فون میسز بر حسب MPa (ب) کرنش پلاستیک معادل

۳-۸- تغییر عرض، ضخامت و ارتفاع

در آخر، کاهش ۵۰ درصدی ارتفاع و افزایش ۵۰ درصدی عرض و ضخامت به‌طور هم‌زمان اعمال شد که نتیجه آن افزایش ۲۷۵ درصدی مقاومت جانبی میراگر مطابق شکل (۲۷) بود. کانتور تنش و کرنش پلاستیک معادل، حاصل از تحلیل در شکل (۲۸) قابل مشاهده است که نشان می‌دهد به میراگر، تنش و کرنش بسیار زیادی تحمیل شده است.



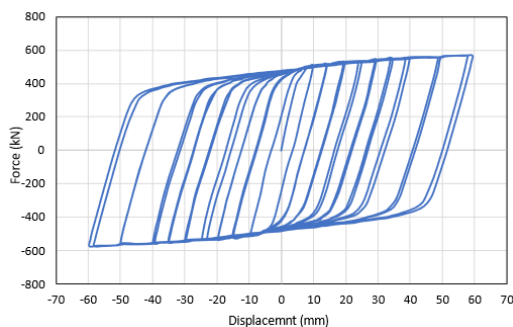
شکل ۲۷- اثر افزایش ۵۰ درصدی عرض و ضخامت و کاهش ۵۰ درصدی ارتفاع بر منحنی هیستریزس



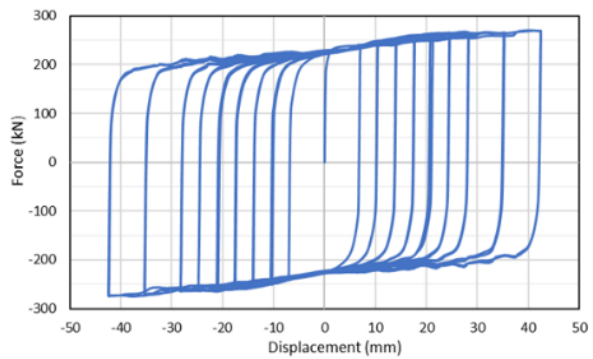
شکل ۳۲- نماهای جانبی جداساز پیشنهادی

۲-۵- مدل سازی عددی

به منظور بررسی عددی جداساز پیشنهادی، ابتدا دو میراگر با ضخامت ۱۸ میلی متر، عرض ۱۵۰ میلی متر، طول داخلی ۱۵۰ میلی متر و ارتفاع ۴۹ میلی متر که عرض و ضخامت، افزایش ۵۰ درصدی و طول و ارتفاع، کاهش ۵۰ درصدی نسبت به آزمایش دارند، بر روی هم و در یک راستا قرار گرفتند. نیروی ثقی ۱۸ تنی و تغییر مکان جانبی مطابق شکل (۷) در جهت حرکت غلطک ها به صفحه بالایی اعمال شد. منحنی هیستریزیس در شکل (۳۳) نشان داده شده است. کانتور تنش و کرنش پلاستیک معادل حاصل از تحلیل در شکل (۳۴) قابل مشاهده است که نشان می دهد به میراگر، کرنش زیادی تحمیل شده است.

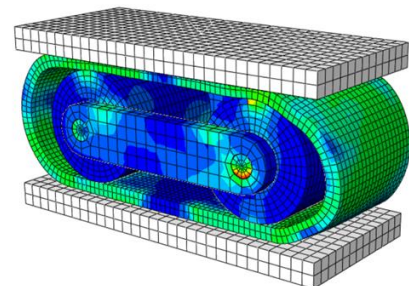
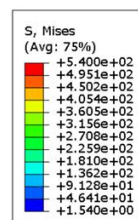


شکل ۳۳- منحنی هیستریزیس دو میراگر بر روی هم

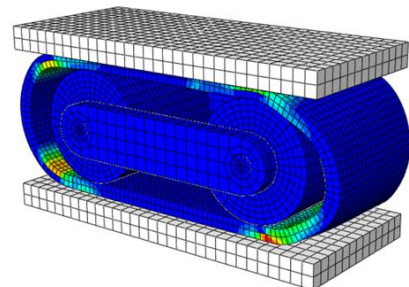
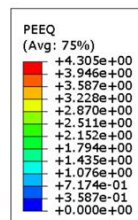


شکل ۳۰- منحنی هیستریزیس میراگر در جهت عمود بر حرکت

غلطک ها



(الف)



(ب)

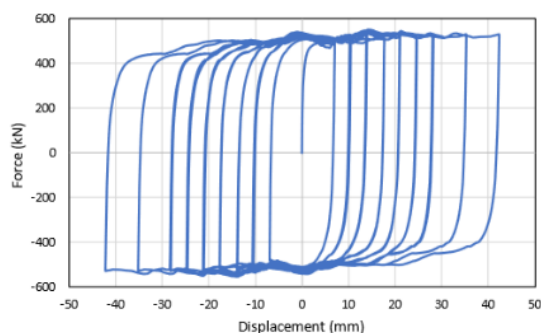
شکل ۳۱- کانتورهای میراگر در انتهای تحلیل با اعمال تغییر مکان ۴۵

درجه: (الف) تنش فون میسز بر حسب MPa (ب) کرنش پلاستیک معادل

۵- جداساز لرزه ای

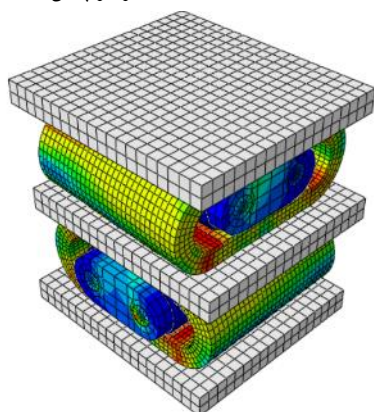
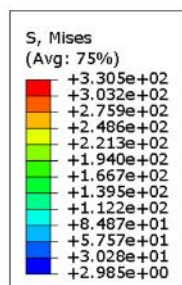
۱-۵- طرح پیشنهادی

برای ساخت جداساز لرزه ای با استفاده از میراگر غلطکی بیضوی، میراگرها در دو ردیف با جهت غلطک های عمود بر هم قرار می گیرند. با توجه به بخش ۳-۱ می توان تعداد غلطک ها و طول میراگر را افزایش داد. پیش بینی می شود، از آنجایی که طبق بخش ۴، میراگر توانایی تحمل تغییر مکان های مورب را نیز دارد، این جداساز ساخته شده با میراگر، در برابر بار زلزله به خوبی عمل کند. شکل (۳۲) آرایش جداساز پیشنهادی را نشان می دهد. برای میرایی بهتر میراگر با توجه به بخش های ۳-۳ تا ۳-۸ می توان ضخامت قسمت منحنی را افزایش و ارتفاع میراگرها را کاهش داد.

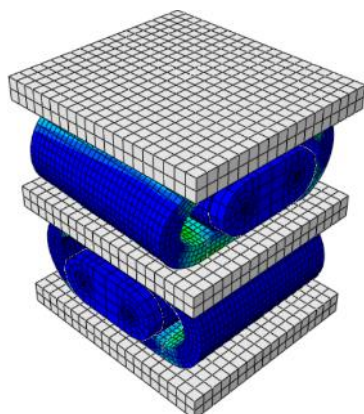
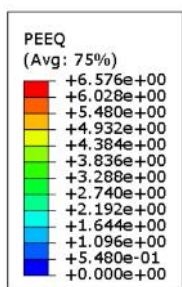


شکل ۳۶- منحنی هیستریزیس جداساز در جهت حرکت غلطک‌های

میراگر پایین



(الف)



(ب)

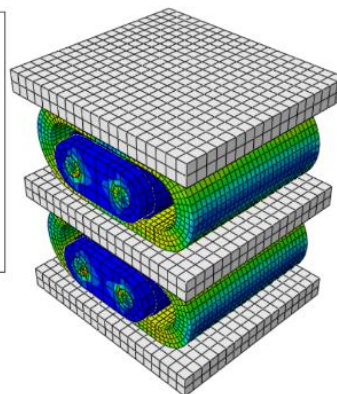
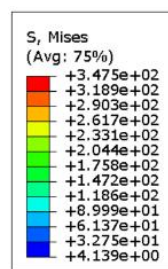
شکل ۳۷- کانتورهای جداساز لرزه‌ای در انتهای تحلیل: (الف) تنش

فون میسر بر حسب MPa (ب) کرنش پلاستیک معادل

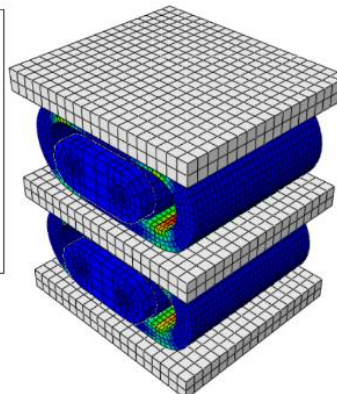
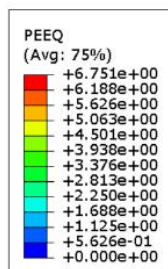
۶- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، پارامترهای مؤثر بر رفتار میراگر غلطکی بیضوی به‌منظور استفاده بهینه در جداسازهای لرزه‌ای به‌صورت عددی بررسی شد. نتایج نشان داد:

- ۱- تغییرات در پارامترهای هندسی میراگر مانند طول، عرض، ضخامت و ارتفاع تأثیر قابل توجهی بر مقاومت جانبی و توانایی جذب انرژی آن دارد. به‌طور خاص، افزایش ضخامت و عرض و



(الف)

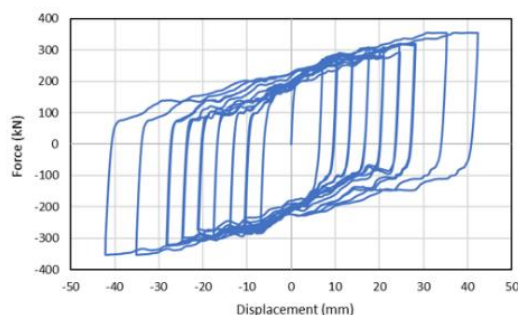


(ب)

شکل ۳۴- کانتورهای دو میراگر بر روی هم در انتهای تحلیل: (الف)

تنش فون میسر بر حسب MPa (ب) کرنش پلاستیک معادل

سپس میراگر بالایی با ۹۰ درجه چرخش در جهت عمود بر حرکت غلطک‌های میراگر پایین قرار گرفت. تغییر مکان جانبی مطابق شکل (۷) در جهت ۴۵ درجه به صفحه بالایی اعمال شد. منحنی‌های هیستریزیس در شکل‌های (۳۵) و (۳۶) نشان می‌دهد مقاومت جانبی میراگر به دلیل دخیل شدن تغییر شکل‌های برشی قسمت بیضوی افزایش یافته است. کرنش پلاستیک معادل حاصل از تحلیل در شکل (۳۷) قابل مشاهده است که نشان‌دهنده تحمیل کرنش زیادی به میراگر است.



شکل ۳۵- منحنی هیستریزیس جداساز در جهت حرکت غلطک‌های

میراگر بالا

کاهش ارتفاع موجب افزایش مقاومت جانبی میراگر شد؛ درحالی که افزایش طول، تأثیر قابل توجهی بر عملکرد هیستریزیس نداشت.

۲- تغییرات مقاومت جانبی با تغییرات عرض نسبت مستقیم، با مجذور تغییرات ضخامت نسبت مستقیم و با تغییرات ارتفاع نسبت عکس دارد اما این روابط در ترکیب تغییرات این پارامترها برقرار نیست.

۳- افزایش تعداد غلطک‌ها، اثری بر منحنی هیستریزیس ندارد اما می‌تواند در بهبود تحمل بارهای ثقلی و افزایش پایداری عملکرد میراگر، نقش مؤثری ایفا نماید.

۴- نتایج مدل‌های عددی نشان داد که میراگر غلطکی بیضوی توانایی تحمل تغییرمکان‌های مورب و تغییرشکل‌های برشی را دارد و در تمامی زوایا چرخه‌های هیستریزیس پایدار و بدون افت نیرو ارائه می‌دهد.

۵- طراحی بهینه میراگر شامل افزایش ضخامت قسمت منحنی، کاهش ارتفاع و افزایش عرض، منجر به عملکرد بهتر در جذب انرژی و کاهش انتقال انرژی زلزله به سازه می‌شود. اما باعث افزایش تنش و کرنش در میراگر می‌شود که شکست احتمالی این نواحی می‌تواند در تحقیقات آتی مورد بررسی قرار گیرد.

۶- نتایج پژوهش نشان داد که میراگر غلطکی بیضوی به دلیل ویژگی‌های پایداری، ظرفیت جذب انرژی بالا و سازگاری با بارهای ثقلی، گزینه‌ای مناسب برای استفاده در جداسازهای لرزه‌ای است.

۷- با توجه به توانایی تحمل بارگذاری مورب و طراحی پیشنهادی، پیش‌بینی می‌شود که جداساز مجهز به این میراگرها عملکرد مناسبی در برابر بارهای لرزه‌ای داشته باشد.

۷- پیشنهادها

ازجمله موضوعاتی که در این مقاله به آن پرداخته نشده و پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آینده مورد توجه قرار گیرد، مدل‌سازی خرابی و بررسی پارامترهای مؤثر بر سختی میراگر است. علاوه بر این، مطالعه کاربرد این میراگر در سایر سیستم‌های سازه‌ای، ازجمله قاب‌های خمشی، می‌تواند به عنوان یکی از محورهای تحقیقات آتی مطرح شود.



- [13] Gaikwad, S., Satarkar, P.R., and Manchalwar, A. (2023), "Seismic Analysis of Five-Storied Building Using U-Shaped Hybrid Isolator and Lead Rubber Bearing Isolator", In International Conference on Interdisciplinary Approaches in Civil Engineering for Sustainable Development, pp.477-485
- [14] Parghi, A., and Rastogi, A. (2023), "U-Shaped Hysteresis SMA Damper for Seismic Isolation: A Numerical Study", In International Conference on Advances in Civil Infrastructure and Construction Materials, pp.253-262.
- [15] Lin, T.W., and Hone, C.C. (1993), "Base isolation by free rolling rods under basement", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 22(3), pp.261-273.
- [16] Lin, T.W., Chern, C.C., and Hone, C.C. (1995), "Experimental study of base isolation by free rolling rods", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 24(12), pp.1645-1650.
- [17] Lee, G.C., Ou, Y.C., Liang, Z., Niu, T., and Song, J. (2007), "Principles and performance of roller seismic isolation bearings for highway bridges", Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research.
- [18] Lee, G.C., Ou, Y.C., Niu, T., Song, J., and Liang, Z. (2010), "Characterization of a roller seismic isolation bearing with supplemental energy dissipation for highway bridges", Journal of Structural Engineering, 136(5), pp.502-510.
- [19] Tayaran, A., and Hosseini, M. (2015), Pillow-Shape Base Isolation System and Its Seismic Behavior", Journal of Structural Engineering and Geo-Techniques, 5(2), pp.25-34.
- [20] Rawat, A., Ummer, N., and Matsagar, V. (2018), "Performance of bi-directional elliptical rolling rods for base isolation of buildings under near-fault earthquakes", Advances in Structural Engineering, 21(5), pp.675-693.
- [21] SIMULIA, (2014), *Abaqus User's Manual*. Rhode Island, USA: Version 6.14, Dassault Systèmes Simulia Corp.
- [22] FEMA 461, No. June (2007), "Interim Testing Protocols for Determining the Seismic Performance Characteristics of Structural and Nonstructural Components
- [23] Deng, K., Pan, P., Su, Y., and Xue, Y. (2015), "Shape optimization of U-shaped damper for improving its bi-directional performance under cyclic loading", Engineering Structures, 93, pp.27-35.
- [24] Yamada, S., Kishiki, S., and Jiao, Y. (2023), "Effect of Bi-directional Ground Motion on the Response of Base-Isolated Structures with U-Shaped Steel Damper", In International Workshop on Energy-Based Seismic Engineering, pp.205-215.
- [1] Kelly, J.M., Skinner, R.I., and Heine, A.J. (1972), "Mechanisms of energy absorption in special devices for use in earthquake resistant structures", Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering, 5(3), pp.63-88.
- [2] Skinner, R.I., Kelly, J.M., and Heine, A.J. (1974), "Hysteretic dampers for earthquake-resistant structures", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 3(3), pp.287-296.
- [3] Qu, B., Dai, C., Qiu, J., Hou, H., and Qiu, C. (2019), "Testing of seismic dampers with replaceable U-shaped steel plates", Engineering Structures, 179, pp.625-639.
- [4] Sadeghi, H.V., Fanaie, N., and Latifi, M. (2025), "Experimental and numerical study of an elliptical roller damper under cyclic loading", In Structures, Vol. 71, p.108074.
- [5] Yu, T., Zhang, C., Huang, Z., Huang, W., Wang, S., Zhong, G., and Ou, D. (2023), "Experimental and numerical studies of a novel three-dimensional isolation device incorporating disc springs with U-shaped dampers", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 174, p.108164.
- [6] Suzuki, K., Watanabe, A., and Saeki, E. (2005), "Development of U-shaped steel damper for seismic isolation system", Nippon Steel Technical Report, 92, pp.56-61.
- [7] Ene, D., Kishiki, S., Yamada, S., Jiao, Y., Konishi, Y., Terashima, M., and Kawamura, N. (2016), "Experimental study on the bidirectional inelastic deformation capacity of U-shaped steel dampers for seismic isolated buildings", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 45(2), pp.173-192.
- [8] Oh, S.H., Song, S.H., Lee, S.H., and Kim, H.J. (2012), "Seismic response of base isolating systems with U-shaped hysteretic dampers", International Journal of Steel Structures, 12, pp.285-298.
- [9] Oh, S.H., Song, S.H., Lee, S.H., and Kim, H.J. (2013), "Experimental study of seismic performance of base-isolated frames with U-shaped hysteretic energy-dissipating devices", Engineering Structures, 56, pp.2014-2027.
- [10] Manchalwar, A., and Bakre, S.V. (2020), "Seismic performance of structure with isolated foundation using u-shape steel damper as an isolator", Soil Mechanics and Foundation Engineering, 57(2), pp.170-177.
- [11] Vamshisheela, S., and Manchalwar, A. (2021), "Isolating system using U Shaped steel damper", In E3S Web of Conferences, Vol. 309, p. 01136.
- [12] Dai Nguyen, X., and Guizani, L. (2021), "Analytical and numerical investigation of natural rubber bearings incorporating U-shaped dampers behaviour for seismic isolation", Engineering Structures, 243, p.112647.