



سیزدهمین کنفرانس ملی و پنجمین کنفرانس بین المللی سازه و فولاد
۳ تا ۶ دی ماه سال ۱۴۰۳
هتل المپیک - تهران



بررسی اثر تغییرات پارامترهای هندسی بر رفتار میراگر غلطکی بیضوی

حدیث وکیلی صادقی^۱، * نادر فنائی^۲

چکیده

این مقاله به بررسی عددی میراگر ابداعی به نام میراگر غلطکی بیضوی می‌پردازد. با اضافه شدن غلطک به میراگر بیضوی متداول که از نوع تسلیمی است، قابلیت تحمل مقدار قابل توجهی بار ثقلی و بار قائم زلزله به این میراگر افزوده می‌شود و باعث کاهش بار مرده بر دیگر اجزای سیستم باربر ثقلی می‌شود. ابتدا مدل عددی در نرم‌افزار آباکوس ساخته شد که مطابقت خوبی با نتایج آزمایشگاهی نشان داد. سپس با تغییر پارامترهای هندسی از جمله طول، عرض، ضخامت و ارتفاع، اثر آن‌ها بر رفتار میراگر بررسی شده است. نتایج نشان داد که افزایش ضخامت قسمت بیضوی و کاهش ارتفاع، تأثیر قابل توجهی بر افزایش مقاومت جانبی میراگر دارد. درصد تغییرات مقاومت میراگر برابر با مجذور درصد تغییرات ضخامت و درصد تغییرات مقاومت میراگر عکس درصد تغییرات ارتفاع می‌باشد. در حالی که تغییرات طول قسمت صاف بی تأثیر و تغییر عرض، تأثیر کمی بر عملکرد میراگر نشان داد. درصد تغییر مقاومت میراگر برابر درصد تغییر عرض میراگر می‌باشد و با آن رابطه مستقیم دارد.

واژگان کلیدی:

میراگر تسلیمی، میراگر غلطکی بیضوی، بار ثقلی، تحلیل عددی، تحلیل پارامتری

^۱ دانشجوی دکتری گرایش سازه، دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، h.vakilisadeghi@kntu.ac.ir

^۲ عضو هیئت علمی گروه سازه، دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، fanaie@kntu.ac.ir (نویسنده مسئول)



سیزدهمین کنفرانس ملی و پنجمین کنفرانس بین المللی سازه و فولاد
۳ تا ۶ دی ماه سال ۱۴۰۳
هتل المپیک - تهران



مقدمه

ایده میراگرهای تسلیمی اولین بار توسط کلی و همکارانش در سال ۱۹۷۲ (Kelly et al., 1972) مطرح شد و در تحقیق دیگری در سال ۱۹۷۴ (Skinner et al., 1974) تکمیل گردید. میراگرهای تسلیم شونده از میان انواع مختلف سیستم‌های کنترل غیرفعال وابسته به تغییر مکان، با ورود به ناحیه 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 می‌باشد که باعث توجه محققین به این نوع میراگرها شده است.

میراگر U شکل جزو اولین اشکال میراگر تسلیمی بود 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 روبروی هم و اتصال آن‌ها به یکدیگر مانند شکل ۱ میراگر بیضوی حاصل می‌شود.



شکل ۱- ترکیب دو میراگر U شکل و ساخت میراگر بیضوی

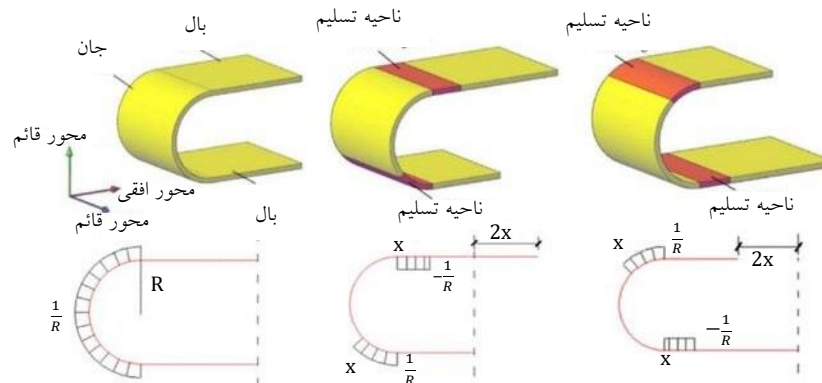
با اعمال نیرو به سیستم میراگر بیضوی، حرکات رفت و برگشتی تنها در بخش‌های منحنی رخ می‌دهد و قسمت‌های صاف بدون تغییر شکل باقی می‌مانند، در حالی که دو بخش منحنی به طور مداوم در حال حرکت و تغییر شکل هستند. این بخش‌های منحنی به عنوان اجزای اصلی میراگر برای اتلاف انرژی از طریق تغییر شکل‌های پلاستیک طراحی شده‌اند. صفحه‌های صاف بالایی و پایینی در هنگام تغییر شکل میراگر، به صورت 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، همان طور که در شکل ۲ دیده می‌شود، بخش تسلیم‌شونده المان‌های منحنی در امتداد صفحات صاف حرکت می‌کند و از تمرکز پلاستیسیته جلوگیری می‌کند، این امر منجر



سیزدهمین کنفرانس ملی و پنجمین کنفرانس بین المللی سازه و فولاد
۳ تا ۶ دی ماه سال ۱۴۰۳
هتل المپیک - تهران



به افزایش ظرفیت اتلاف انرژی می شود. به دلیل این حرکات، تمرکز تنش تنها در یک نقطه باقی نمی ماند بلکه در طول بخش منحنی جابه جا می شود و بنابراین نقطه تسلیم نیز به طور مداوم تغییر می کند. (Qu et al., 2018)

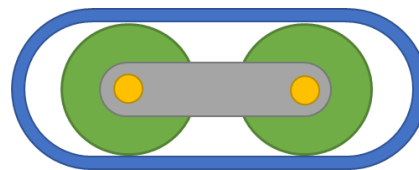


شکل ۲- نحوه عملکرد میراگر U شکل در اثر بارگذاری

در طی سال های اخیر، پژوهش های متعددی بر روی میراگرهای U شکل انجام گرفته است. به طور مثال، بایرد و همکاران معادلاتی برای پیش بینی رفتار نیرو - تغییر مکان میراگرها ارائه دادند. (Baird et al., 2014) همچنین دنگ و همکاران فرمولی برای نسبت میرایی انرژی ارائه دادند. (Deng et al., 2015)

در تحقیق ساتریا و همکاران در سال ۲۰۲۱، سختی الاستیک، مقاومت حداکثر، و اتلاف انرژی چندین چینش میراگرهای فولادی U شکل در نرم افزار اجزای محدود مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج نشان داد میراگرهای متقارن بیشتر انرژی تلف می کنند. افزایش تعداد قسمت های U شکل به صورت افقی به بهبود سختی و مقاومت کمک کرد، در حالی که افزایش آنها به صورت عمودی تغییر شکل الاستیک را افزایش داد ولی سختی الاستیک و مقاومت را کاهش داد. (Satria et al., 2021)

میراگر تسلیمی بیضوی غلطکی که در شکل ۳ نشان داده شده، به عنوان یک نوآوری در این مقاله معرفی شده است که شامل افزودن چندین غلطک به میراگر تسلیمی بیضوی استاندارد است. این غلطک ها به عنوان تحمل کننده های بار ثقلی و بار قائم زلزله عمل می کنند، به این معناست که آنها نه تنها بارهای دینامیکی ناشی از زلزله را مستهلک می کنند، بلکه به تحمل وزن ثابت سازه نیز کمک می کنند. این ویژگی جدید اجازه می دهد که میراگر بیضوی غلطکی، علاوه بر کاهش انتقال انرژی زلزله به سازه، در بهبود پایداری کلی سازه نیز مؤثر باشد.



شکل ۳- میراگر غلطکی بیضوی



سیزدهمین کنفرانس ملی و پنجمین کنفرانس بین المللی سازه و فولاد ۳ تا ۶ دی ماه سال ۱۴۰۳ هتل المپیک - تهران

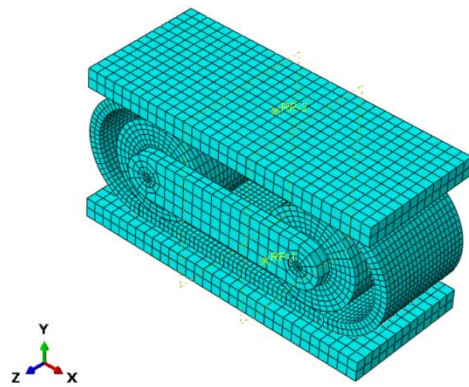


غلطک های داخل میراگر بیضوی علاوه بر اینکه بار ثقلی را تحمل می کنند یا انتقال می دهند، تغییر شکل ها را نیز کنترل می کنند. قطر غلطک بر اساس مقطع داخلی میراگر تعیین می شود و سختی غلطک نیز باید از سختی مصالح قسمت بیضوی، بیشتر باشد. در واقع این غلطک ها موجب بروز رفتار مناسب تر میراگر در زمان جابه جایی افقی می شوند.

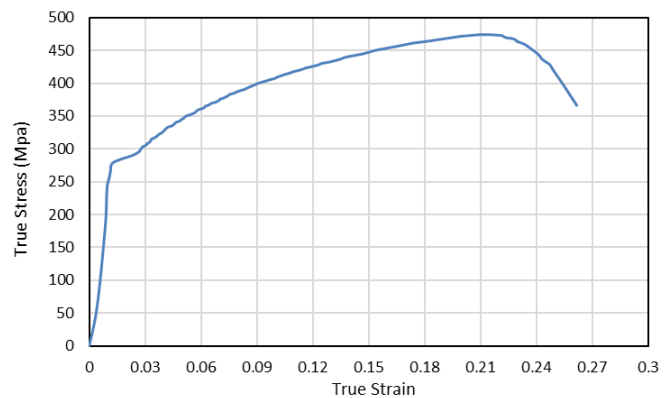
روش تحقیق

هندسه میراگر در نرم افزار آباکوس (SIMULIA, 2014) ساخته و مش بندی شد. آنالیز حساسیت اندازه مش بر اساس اندازه مش قسمت بیضوی و مقاومت جانبی میراگر انجام گرفت و اندازه مش قسمت بیضوی، غلطک ها و پین ها ۵ میلی متر، صفحه رابط و صفحه بارگذاری ۱۰ میلی متر انتخاب شد.

برای دستیابی به نمایش دقیق تری از رفتار فولاد ST37 در تحلیل اجزای محدود، منحنی تنش- کرنش واقعی محاسبه شده و در شکل ۴ نشان داده شده است. این منحنی از منحنی مهندسی تنش- کرنش به دست آمده از آزمون کشش با اعمال تبدیل های استاندارد برای محاسبه تنش واقعی و کرنش واقعی به دست آمده است. سخت شوندگی با توجه به نتایج به دست آمده از آزمایش از نوع سینماتیک انتخاب شد. مدل ساخته شده در آباکوس در شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل ۵- مدل عددی میراگر در آباکوس



شکل ۴- منحنی تنش-کرنش واقعی فولاد

در مرحله بعد، قسمت های جوش شده در آزمایش در مدل عددی به همدیگر چسبیده^۱ شدند. همچنین میله داخل سیلندر به صفحه رابط بین میله ها که در آزمایش پرچ شده بود، چسبیده شد. سپس بین دوه دو صفحات باقی مانده تماس سطح به سطح برقرار شد و ضریب اصطکاک بین اعضای فولادی ۰/۲ فرض گردید و اعضا در جهت برون صفحه مقید شدند. انتهای صفحه زیرین نیز در ۶ جهت مقید گردید.

برای بارگذاری در قدم اول نیروی ثقلی ۱۸ تنی به صورت یک نیروی متمرکز فشاری بر صفحه بارگذاری فوقانی اعمال گردید. در قدم بعد نیروی جانبی به صورت تغییر مکان- کنترل به تعداد ۱۸ چرخه به صفحه فوقانی اعمال شد. منحنی هیستریزس حاصل از

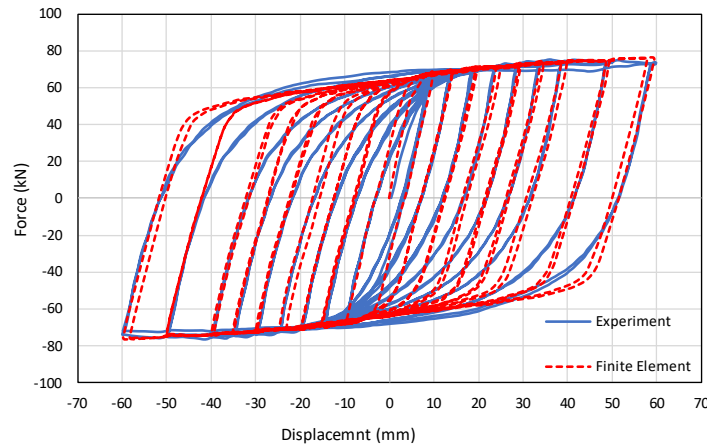
^۱ tie



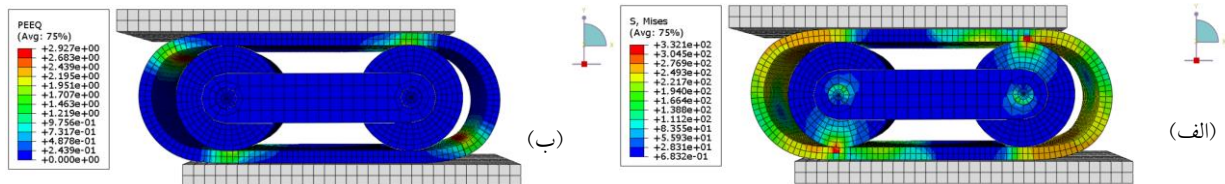
سیزدهمین کنفرانس ملی و پنجمین کنفرانس بین المللی سازه و فولاد ۳ تا ۶ دی ماه سال ۱۴۰۳ هتل المپیک - تهران



تحلیل و مقایسه آن با هیستریزس آزمایش در شکل ۶ قابل مشاهده است. همچنین کانتور تنش و کرنش پلاستیک معادل، حاصل از تحلیل در شکل ۷ قابل مشاهده است.



شکل ۶- مقایسه منحنی هیستریزس آباکوس و آزمایش



شکل ۷- کانتورها پس از تحلیل در تغییر مکان حداکثر: (الف) تنش فون میسز بر حسب MPa (ب) کرنش پلاستیک معادل

مرحله بعد، انجام تحلیل پارامتری است، به این معنا که متغیرهای تأثیرگذار احتمالی بر جذب انرژی میراگر تا $\pm 10\%$, $\pm 20\%$, $\pm 30\%$, $\pm 40\%$, $\pm 50\%$ مقدار اولیه خود در مدل عددی تغییر می‌کنند و نتایج به دست آمده با حالت اولیه مقایسه می‌شوند. در انتهای تحلیل پارامتری، مؤثرترین متغیرها روی جذب انرژی میراگر غلطکی بیضوی به ترتیب مشخص می‌شوند. این متغیرها شامل طول قسمت صاف، عرض، ضخامت و شعاع قسمت منحنی است.

یافته‌ها

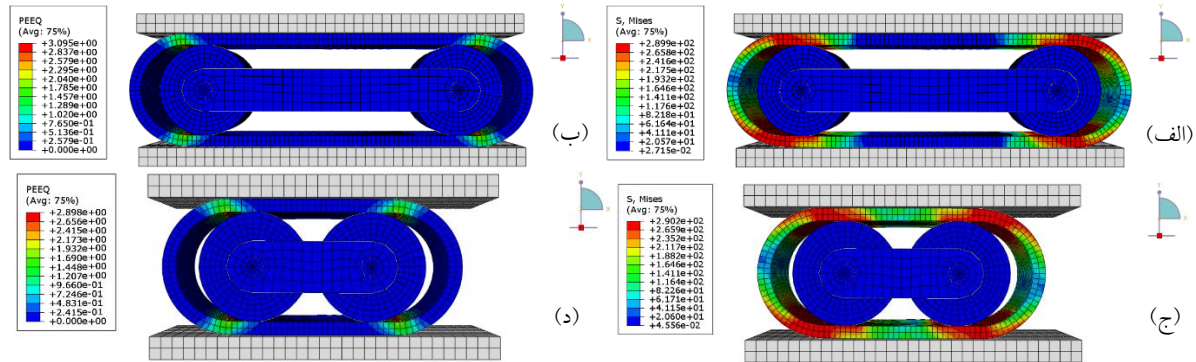
تأثیر تغییر طول قسمت صاف بر مقاومت جانبی میراگر به صورت عددی بررسی گردید. در مدل‌های جداگانه طول قسمت صاف از ۷۰ درصد مقدار اولیه یعنی ۱۴۶ میلی‌متر هر بار ۱۰ درصد تا ۱۵۰ درصد مقدار اولیه یعنی ۳۱۳ میلی‌متر افزایش یافت و اثری بر منحنی هیستریزس نداشت. علت عدم کاهش طول تا ۵۰ و ۶۰ درصد مقدار اولیه، کمبود فضا برای قرارگیری دو غلطک بود. بی اثر



سیزدهمین کنفرانس ملی و پنجمین کنفرانس بین المللی سازه و فولاد ۳ تا ۶ دی ماه سال ۱۴۰۳ هتل المپیک - تهران



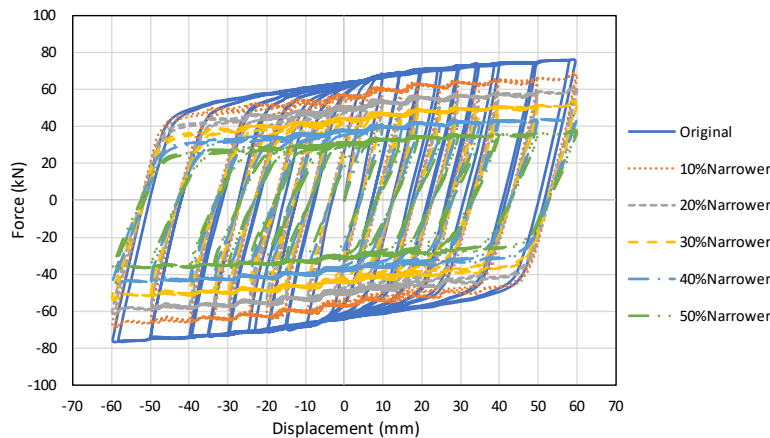
بودن تغییر طول قسمت صاف بر منحنی به دلیل عدم تسلیم این قسمت و عدم مشارکت آن در استهلاک انرژی است. کانتور تنش و کرنش پلاستیک معادل، حاصل از تحلیل در شکل ۸ قابل مشاهده است.



شکل ۸- کانتور تنش فون میسز و کرنش پلاستیک معادل در لحظه آخر تحلیل بر اثر تغییر طول، (الف) تنش در طول ۱۵۰ درصد مقدار اولیه، (ب) کرنش در طول ۱۵۰ درصد مقدار اولیه، (ج) تنش در طول ۷۰ درصد مقدار اولیه، (د) کرنش در طول ۷۰ درصد مقدار اولیه

عرض میراگر به مقدار ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ درصد مقدار اولیه مطابق شکل ۹ کاهش یافت و مقدار مقاومت جانبی به همان مقدار به ازای هر درصد مطابق شکل کاهش یافت. سپس عرض میراگر به مقدار ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ درصد مقدار اولیه افزایش یافت و مقدار مقاومت جانبی به اندازه ۱۰ الی ۵۰ درصد مقدار اولیه به ازای هر مقدار مطابق شکل ۱۰ افزایش یافت. تغییرات مقاومت جانبی با تغییر عرض، به دلیل تغییرات ایجاد شده در اساس مقطع پلاستیک رخ داده‌اند، زیرا مقاومت جانبی با اساس مقطع پلاستیک مطابق فرمول ۱ نسبت مستقیم دارد. کانتور تنش و کرنش پلاستیک معادل، حاصل از تحلیل در شکل ۱۱ قابل مشاهده است.

$$Z = \frac{bt^2}{4} \quad (1)$$

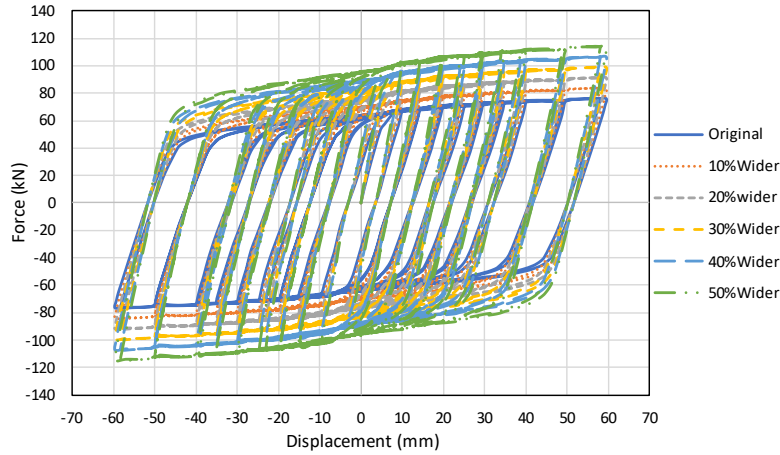




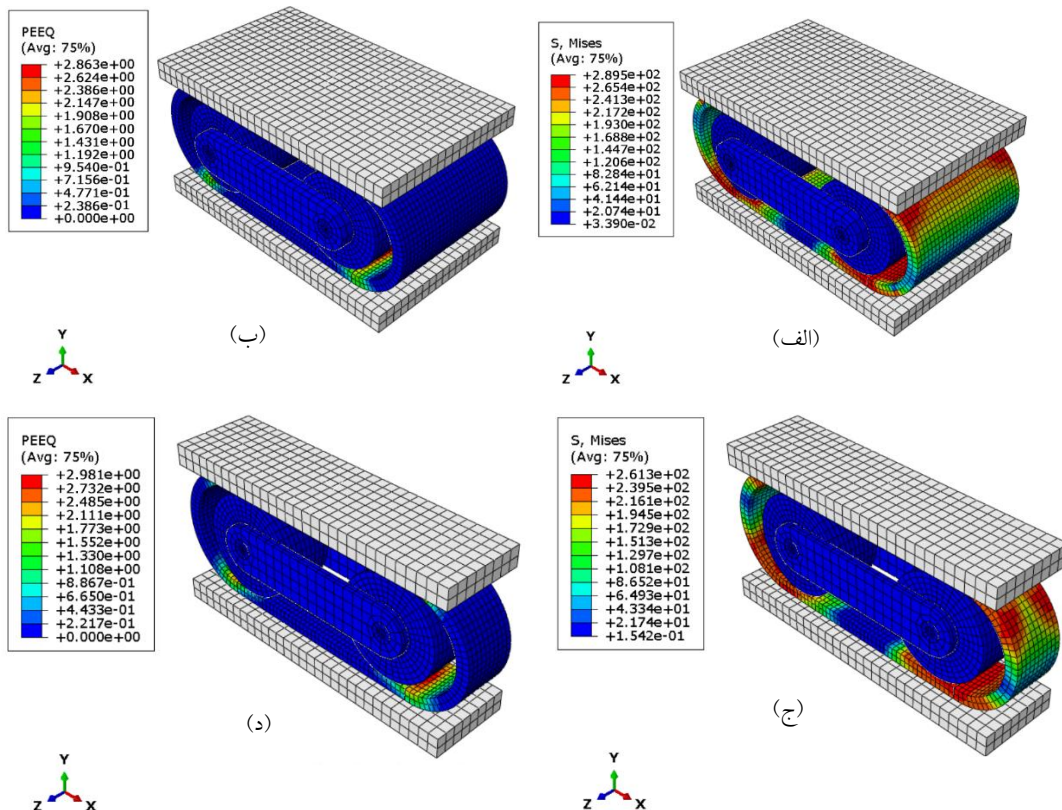
سیزدهمین کنفرانس ملی و پنجمین کنفرانس بین المللی سازه و فولاد ۳ تا ۶ دی ماه سال ۱۴۰۳ هتل المپیک - تهران



شکل ۹- اثر کاهش عرض میراگر بر منحنی هیستریزیس



شکل ۱۰- اثر افزایش عرض میراگر بر منحنی هیستریزیس



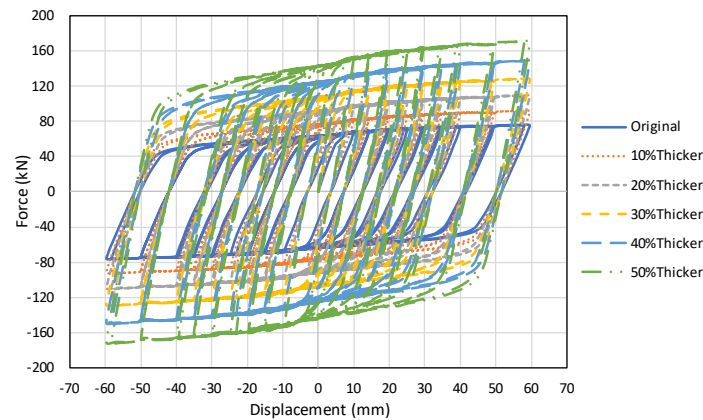
شکل ۱۱- کانتور تنش فون میسز و کرنش پلاستیک معادل در لحظه آخر تحلیل بر اثر تغییر عرض، (الف) تنش در عرض ۱۵۰ درصد مقدار اولیه، (ب) کرنش در عرض ۱۵۰ درصد مقدار اولیه، (ج) تنش در عرض ۵۰ درصد مقدار اولیه، (د) کرنش در عرض ۵۰ درصد مقدار اولیه



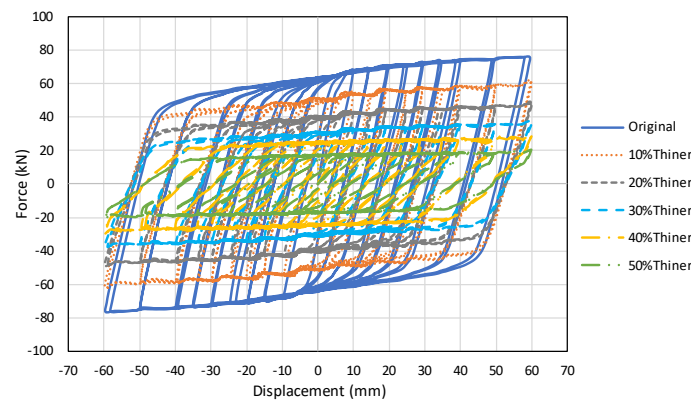
سیزدهمین کنفرانس ملی و پنجمین کنفرانس بین المللی سازه و فولاد
۳ تا ۶ دی ماه سال ۱۴۰۳
هتل المپیک - تهران



ضخامت قسمت بیضوی از ۵۰ درصد مقدار اولیه یعنی ۶ میلی‌متر تا ۱۵۰ درصد مقدار اولیه یعنی ۱۸ میلی‌متر تغییر یافت و مقدار تغییر ضخامت متناسب با مجذور درصد تغییر مقاومت میراگر بود. یعنی به طور مثال با افزایش ۵۰ درصدی ضخامت، افزایش ۲۲۵ درصدی مقاومت جانبی و با کاهش ۵۰ درصدی ضخامت، کاهش ۲۵ درصدی مقاومت مشاهده شد. (شکل‌های ۱۲ و ۱۳) در ضخامت‌های ۷/۲ و ۶ میلی‌متر یعنی ۴۰ و ۵۰ درصد مقدار اولیه، نرم افزار هیستریزیس مناسبی ارائه نداد که برای حل این مشکل، مش قسمت بیضوی میراگر به ۲/۵ میلیمتر کاهش یافت. با توجه به شکل ۱۰ سختی و شیب زوال مقاومت در این دو نمونه بیشتر از بقیه دیده شد. تغییرات مقاومت جانبی با تغییر ضخامت، به دلیل تغییرات ایجاد شده در اساس مقطع پلاستیک رخ داده‌اند و اساس مقطع پلاستیک با مجذور ضخامت با توجه به فرمول ۱ رابطه دارد. کانتور تنش و کرنش پلاستیک معادل، حاصل از تحلیل در شکل ۱۴ قابل مشاهده است.



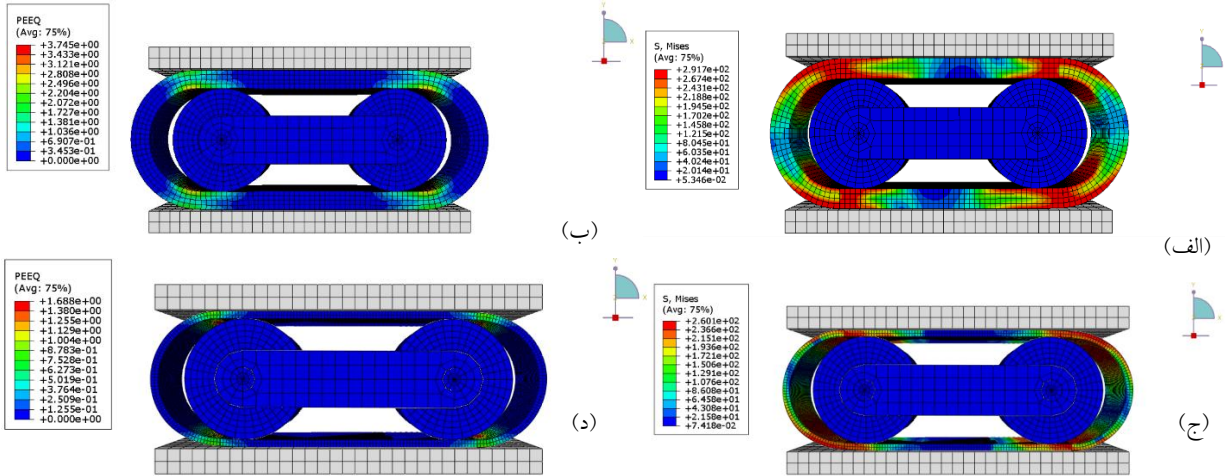
شکل ۱۲- اثر افزایش ضخامت قسمت بیضوی بر منحنی هیستریزیس



شکل ۱۳- اثر کاهش ضخامت قسمت بیضوی بر منحنی هیستریزیس

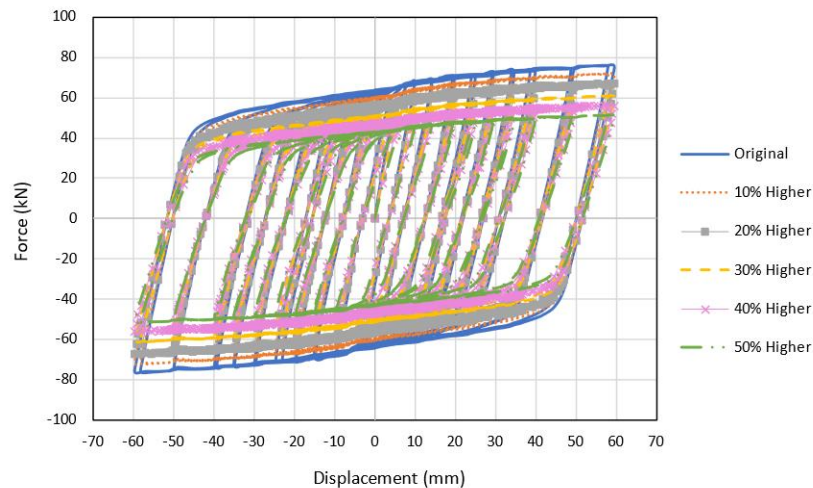


سیزدهمین کنفرانس ملی و پنجمین کنفرانس بین المللی سازه و فولاد ۳ تا ۶ دی ماه سال ۱۴۰۳ هتل المپیک - تهران



شکل ۱۴- کانتور تنش فون میسز و کرنش پلاستیک معادل در لحظه آخر تحلیل بر اثر تغییر ضخامت، (الف) تنش در ضخامت ۱۵۰ درصد مقدار اولیه، (ب) کرنش در ضخامت ۱۵۰ درصد مقدار اولیه، (ج) تنش در ضخامت ۵۰ درصد مقدار اولیه، (د) کرنش در ضخامت ۵۰ درصد مقدار اولیه

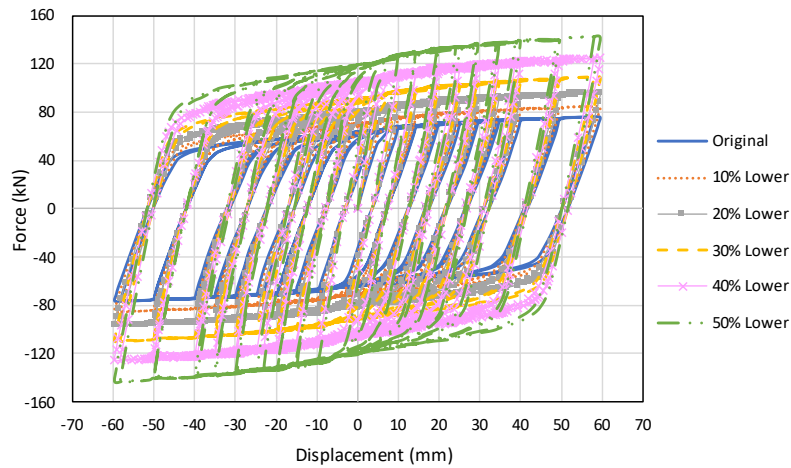
شعاع منحنی (ارتفاع میراگر) از ۵۰ درصد مقدار اولیه تا ۱۵۰ درصد مقدار اولیه تغییر گردید. با افزایش شعاع (ارتفاع)، نیروی جانبی کاهش و با کاهش آن نیروی جانبی افزایش یافت. درصد افزایش یا کاهش نیرو نیز همان طور که در شکل‌های ۱۵ و ۱۶ مشاهده می‌شود بیشتر از درصد تغییرات شعاع بود. همچنین هر چه ارتفاع (شعاع) کاهش می‌یابد، نیروی جانبی بیشتر افزایش می‌یابد. با تغییر ارتفاع به میزان ۵۰، ۶۰، ۷۰، ۸۰، ۹۰، ۱۱۰، ۱۲۰، ۱۳۰، ۱۴۰ و ۱۵۰ درصد، درصد تغییرات مقاومت جانبی به ترتیب ۶۷، ۷۳، ۸۰، ۸۸، ۹۶، ۱۱۲، ۱۲۶، ۱۴۳، ۱۶۴ و ۱۸۷ درصد مقدار اولیه تغییر یافت. کانتور تنش و کرنش پلاستیک معادل، حاصل از تحلیل در شکل ۱۷ قابل مشاهده است.



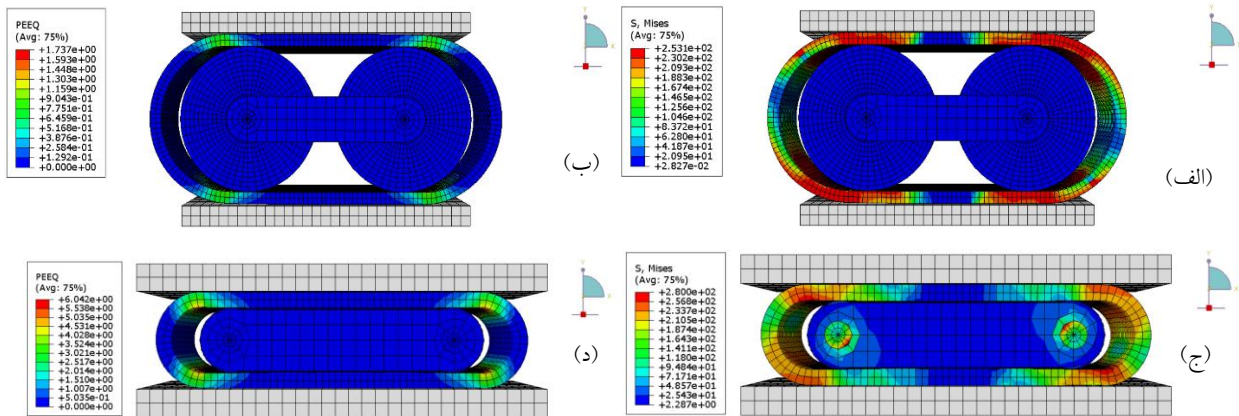
شکل ۱۵- اثر افزایش ارتفاع میراگر بر منحنی هیستریزس



سیزدهمین کنفرانس ملی و پنجمین کنفرانس بین المللی سازه و فولاد
۳ تا ۶ دی ماه سال ۱۴۰۳
هتل المپیک - تهران



شکل ۱۶- اثر کاهش ارتفاع میراگر بر منحنی هیستریزس

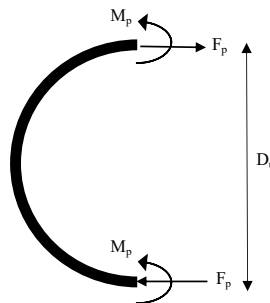


شکل ۱۷- کانتور تنش فون میسز و کرنش پلاستیک معادل در لحظه آخر تحلیل بر اثر تغییر شعاع، (الف) تنش در شعاع ۱۵۰ درصد مقدار اولیه، (ب) کرنش در شعاع ۱۵۰ درصد مقدار اولیه، (ج) تنش در شعاع ۵۰ درصد مقدار اولیه، (د) کرنش در شعاع ۵۰ درصد مقدار اولیه

علت رابطه عکس مقاومت جانبی با شعاع منحنی در شکل ۱۸ نشان داده شده است. همان طور که در شکل مشاهده می شود فرمول ۲ برای قسمت منحنی برقرار است.



$$F_p = \frac{2M_p}{D_u} \quad (2)$$



شکل ۱۸- قسمت منحنی میراگر بیضوی

بحث و نتیجه گیری

ابتدا مدل عددی میراگر در نرم افزار آباکوس ساخته شد و تطابق خوبی با مدل آزمایشگاهی از خود نشان داد. سپس با تغییر طول قسمت صاف، عرض، ضخامت و شعاع قسمت منحنی به ۵۰ تا ۱۵۰ درصد مقدار اولیه، تاثیر این پارامترها بر منحنی هیستریزس بررسی گردید.

تغییر طول قسمت‌های صاف تاثیر چندانی بر رفتار میراگر نداشت. تغییرات در عرض و ضخامت قسمت بیضوی نشان داد که کاهش عرض و ضخامت میراگر باعث کاهش مقاومت جانبی می‌شود و افزایش عرض و ضخامت، بهبود در رفتار جانبی میراگر ایجاد می‌کند. اما افزایش ضخامت، تاثیر بیشتری (مجذور تغییرات) بر عملکرد دارد. تغییرات ارتفاع، رابطه‌ی عکس با مقاومت جانبی میراگر دارد و با کاهش هر چه بیشتر ارتفاع، شاهد بهبود عملکرد بیشتری خواهیم بود. با مقایسه کانتورهای تنش و کرنش در هندسه‌های مختلف، تفاوت معناداری در تنش مشاهده نشد. به بیان دیگر، تغییرات هندسی تاثیر موثری بر تنش‌ها ایجاد شده در میراگر ندارد اما تغییر ارتفاع و ضخامت بر کرنش موثر است. این نتایج تأکید می‌کنند که طراحی دقیق ابعاد میراگر می‌تواند تأثیر مستقیمی بر عملکرد آن در شرایط واقعی داشته باشد و راهنمایی برای بهینه سازی طراحی‌های آتی ارائه می‌دهد.

منابع

- Baird, A., Smith, T., Palermo, A., & Pampanin, S. (2014). Experimental and Numerical Study of U-shape Flexural Plate (UFP) Dissipators. *NZSEE*, 1-9.
- Deng, K., Pan, P., Su, Y., & Xue, Y. (2015). Shape Optimization of U-Shaped Damper for Improving Its Bi-Directional Performance under Cyclic Loading. *Engineering Structures*, 93, 27-35. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2015.03.006>
- Kelly, J. M., Skinner, R. I., & 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), 63-73. <https://doi.org/10.5459/bnzsee.5.3.63-88>
- Qu, B., Dai, C., Qui, J., Hou, H., & Qiu, C. (2018). Testing of seismic dampers with replaceable U-shaped steel plates. *Engineering Structures*, 179, 625-639. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.11.016>



سیزدهمین کنفرانس ملی و پنجمین کنفرانس بین المللی سازه و فولاد
۳ تا ۶ دی ماه سال ۱۴۰۳
هتل المپیک – تهران



- Satria, E., Son, L., Bur, M., & Akbar, M. D. (2021). Finite Element Analysis to Determine Stiffness, Strength, and Energy Dissipation of U-Shaped Steel Damper under Quasi-Static Loading. *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*, 18(3), 9042–9050. <https://doi.org/10.15282/ijame.18.3.2021.16.0693>
- SIMULIA. (2014). *Abaqus User's Manual*. Version 6.14, Dassault Systèmes Simulia Corp.
- Skinner, R. I., Kelly, J. M., & Heine, A. J. (1974). Hysteretic Dampers for Earthquake-Resistant Structures. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 3(3), 287–296. <https://doi.org/10.1002/eqe.4290030307>