

Optimum Design and Investigation of the Operational Mechanism of Hybrid Friction and Metallic Yielding Dampers for Multi-level Vibration Contr

Mansour Bagheri¹, Omid Ranaei²

1- Associate professor, dep. of civil engineering, Brijand University of Technology, Birjand, Iran
2- PhD student, dep. of civil and environmental engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

ABSTRACT

Metallic yielding dampers (MYD) often fail to provide adequate energy dissipation under mild vibrations, such as low seismic loads or strong winds, as they remain in an elastic state. This research aims to develop a hybrid damper suitable for various levels of seismic and wind vibrations. The proposed hybrid damper integrates metallic yielding dampers (MYD) and friction dampers (FD) in a series configuration. The design geometry of this combined damper is tailored so that, under mild seismic vibrations and wind conditions where the MYD remains elastic, the friction damper engages. Conversely, under severe seismic loads, both the FD and MYD operate concurrently. The design methodology for the FD and MYD dampers is predicated on the elastic force of the metallic damper and the uniform stress distribution throughout the metallic element, respectively. This study proposes an optimal geometry for the metallic damper characterized by a specific shape factor. Subsequently, the behavioral mechanism of the proposed hybrid damper was assessed using the ASCE loading protocol. The findings indicate that the proposed damper exhibits stable hysteretic behaviour and a high energy dissipation capacity, achieving significant cumulative energy dissipation per unit volume. Additionally, by addressing buckling constraints, the capacity of the hybrid damper has been enhanced, allowing it to endure more cycles and increasing the ductility of the composite damper.

ARTICLE INFO

Receive Date: 27 August 2024
Revise Date: 18 November 2024
Accept Date: 04 December 2024

Keywords:

Energy dissipation
Hybrid damper
Friction damper
Metallic yielding damper
Numerical modeling

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: [10.22065/jsce.2024.474690.3503](https://doi.org/10.22065/jsce.2024.474690.3503)

*Corresponding author: Mansour Bagheri
Email address: mnsrbagheri@birjandut.ac.ir

طراحی بهینه و بررسی مکانیزم عملکردی میراگر ترکیبی اصطکاکی و فولادی جاری شونده برای کنترل سطوح مختلفی از ارتعاشات در سازه‌ها

منصور باقری^{۱*}، امید رعنائی^۲

۱-دانشیار، دانشکده مهندسی معدن، عمران و شیمی، دانشگاه صنعتی بیرجند، بیرجند، ایران

۲-دانشجوی دکتری، دانشکده عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

چکیده

میراگرهای فولادی جاری شونده تحت ارتعاشاتی مانند بارهای لرزه‌ای خفیف یا بادهای شدید به دلیل باقی ماندن در حالت الاستیک، دارای اتلاف انرژی مناسبی نمی‌باشند. هدف از انجام پژوهش حاضر، توسعه نوعی از میراگر ترکیبی است که برای سطوح مختلفی از ارتعاشات لرزه‌ای و باد کاربرد داشته باشد. این نوع میراگر ترکیبی، متشکل از میراگر فولادی جاری شونده و اصطکاکی می‌باشد که به صورت سری به یکدیگر متصل شده‌اند. هندسه میراگر ترکیبی پیشنهادی به گونه‌ای است که برای دامنه‌های لرزه‌ای خفیف و باد (که میراگر فلزی در حالت الاستیک باقی می‌ماند) میراگر اصطکاکی عمل کرده و تحت بارهای لرزه‌ای شدید میراگر اصطکاکی و فلزی به صورت توأم اقدام به اتلاف انرژی می‌کنند. رویکرد طراحی میراگر اصطکاکی و فولادی جاری شونده به ترتیب براساس نیروی الاستیک میراگر فولادی و توزیع تنش یکنواخت در سرتاسر المان‌های فولادی است. در این پژوهش ابتدا یک هندسه بهینه برای میراگر فولادی با ضریب شکل $\lambda = 1.6 \text{ (mm}^{0.5}\text{)}$ پیشنهاد شد. سپس مکانیزم رفتاری میراگر ترکیبی پیشنهادی تحت پروتکل بارگذاری $ASCE7$ مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج حاصل نشان دهنده رفتار هیسترتیک پایدار و ظرفیت بالای میراگر پیشنهادی برای استهلاک انرژی است، به طوری که میراگر فولادی از ظرفیت بالای استهلاک انرژی نسبت به حجم فولاد مصرفی برخوردار است. همچنین با در نظر گرفتن قیدهای مقید کننده کمانش، ظرفیت میراگر ترکیبی پیشنهادی افزایش یافته و می‌تواند چرخه‌های بارگذاری بیشتری را تحمل کند که در نتیجه باعث افزایش شکل پذیری میراگر ترکیبی پیشنهادی شده است.

کلمات کلیدی: استهلاک انرژی، میراگر ترکیبی، میراگر اصطکاکی، میراگر فولادی، مدل سازی عددی.

شناسه دیجیتال:	سابقه مقاله:				
	دریافت	بازنگری	پذیرش	انتشار آنلاین	چاپ
doi: 10.22065/jsce.2024.474690.3503	۱۴۰۳/۰۶/۰۶	۱۴۰۳/۰۸/۲۸	۱۴۰۳/۰۹/۱۴	۱۴۰۳/۰۹/۱۴	۱۴۰۴/۰۳/۳۱
https://doi.org/10.22065/jsce.2024.474690.3503					
منصور باقری					*نویسنده مسئول:
mnsrbagheri@birjandut.ac.ir					پست الکترونیکی:

۱- مقدمه

به منظور افزایش بهره‌وری و بهینه‌سازی سازه‌ها، اخیراً تحقیقات زیادی بر روی میراگرهای ترکیبی انجام شده است [5-1] به طوری که با یک میراگر، سطوح مختلفی از ارتعاشات خارجی را کنترل کرد. به منظور ایجاد سیستم‌هایی با میرایی بالا و کاربردهای مختلف، می‌توان میراگرهای وابسته به جابجایی و سرعت را به صورت موازی یا سری با یکدیگر ترکیب نمود [6]. این نوع سیستم‌ها می‌توانند محدوده گسترده‌ای از دامنه‌های تغییر مکانی را پوشش داده و ترکیب این دو نوع میراگر می‌تواند ویژگی‌های مناسبی برای سیستم‌های اتلاف انرژی ایجاد کند.

در یک سیستم موازی، جابجایی نسبی مشابهی در هر دو میراگر ایجاد می‌شود، لذا برای میراگرهای وابسته به سرعت قابلیت تغییر شکل‌های مجاز قابل توجهی مورد نیاز است. این موضوع باعث می‌شود که میراگر وابسته به سرعت برای ارتعاشات کوچک موثر نباشد. همچنین از نقطه نظر عملکردی، مقوله‌ی سختی باعث کاهش جابجایی و عملکرد میراگر وابسته به سرعت می‌شود. اما ترکیب هر دو میراگر می‌تواند برای ارتعاشات بزرگ موثر باشد. از سوی دیگر در یک سیستم سری، نیروی مقاوم یکسانی در هر دو میراگر به وجود آمده و نیروی مجاز بزرگی برای میراگر وابسته به سرعت مورد نیاز است. در این حالت جابجایی و عملکرد میراگر وابسته به جابجایی کاهش یافته و این نوع میراگرها برای ارتعاشات خفیف مناسب می‌باشند.

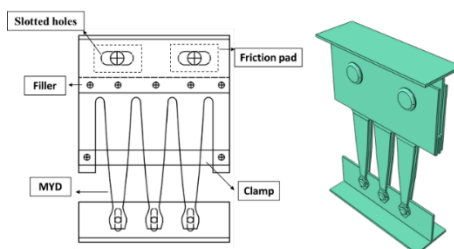
کیم و همکاران [7] برای کنترل ارتعاشات ناشی از باد و زلزله در سازه‌های بلند اقدام به ارائه سیستم ترکیبی H-BRB نمودند. با توجه به این که مهاربندهای کمانش تاب در برابر زلزله‌های شدید عملکرد مناسبی داشته ولی در برابر نیروی باد نمی‌توانند اقدام به اتلاف انرژی کنند، آن‌ها با ترکیب مهاربندهای کمانش تاب و میراگرهای ویسکوالاستیک اقدام به ساخت سیستم جدیدی نمودند که بتواند سطح گسترده‌ای از ارتعاشات را کنترل کرده و عملکرد مهاربندهای کمانش تاب را در برابر باد و زلزله افزایش دهد. نتایج حاصل از تحقیق آن‌ها نشان داد که سیستم ترکیبی H-BRB هم باعث بهبود سختی جانبی و هم باعث کاهش شتاب طبقات شده است. مونتگومری [8] برای اتصال میراگر ویسکوالاستیک به دیوار برشی کویله، از مقاطع کاهش یافته استفاده نمود. در واقع هدف از انجام این کار استفاده از میراگر ترکیبی ویسکوالاستیک و فولادی بود. به طوری که برای بار باد، میراگر ویسکوالاستیک اقدام به اتلاف انرژی نموده و تحت زلزله‌های شدید از طریق ایجاد تغییر شکل غیرارتجاعی در اتصال RBS انرژی وارد شده بر سازه اتلاف شود. مارشال و چرنی [9] به بررسی عملکرد سیستم‌های ترکیبی غیرفعال در سازه‌های فولادی تحت بارهای لرزه‌ای پرداختند این سیستم شامل ترکیبی از میراگر ویسکوالاستیک و بادبندهای کمانش تاب بود. نتایج نشان مطالعه داد که سیستم فوق قابلیت ایجاد میرایی برای سطوح مختلفی از ارتعاشات را دارد. یاماموتو و همکاران [10] به بررسی عددی و آزمایشگاهی سه نوع سیستم ترکیبی میراگر پرداختند. این سه نوع سیستم شامل ترکیبی از میراگر ویسکوالاستیک با بادبند هشتی، بادبند قطری و دیوار برشی فولادی است که محدوده گسترده‌ای از جابجایی را در مدت ارتعاشات جذب می‌نماید. نتایج حاصل از تحقیقات آن‌ها نشان داد که در ارتعاشات خفیف، این نوع سیستم دارای بیش از ۸٪ میرایی بوده و تحت ارتعاشات شدید میراگرهای ویسکوالاستیک و فولادی توأم اقدام به اتلاف انرژی می‌کنند. همچنین نتایج عددی این مطالعه نشان داد که این نوع سیستم‌ها شتاب و دررفت طبقات را به ترتیب ۶۰ تا ۷۰٪ و ۸۰٪ کاهش می‌دهند. رعنائی و آقاچوچک [11, 12] میراگر ترکیبی متشکل از میراگر ویسکوالاستیک و فولادی جاری شونده را ارائه دادند که برای کنترل سطوح مختلفی از ارتعاشات کاربرد دارد. مکانیزم رفتاری این نوع میراگر به صورت سری ارائه شد تا بتواند علاوه بر رفع محدودیت میراگر ویسکوالاستیک در تحمل حداکثر دامنه جابجایی برشی از عملکرد مناسبی برخوردار باشد. نتایج حاصل از پژوهش این نشان داد که میراگر ویسکوالاستیک بر پایه لاستیک بوتیل دارای ظرفیت میرایی بالاتری نسبت به میراگر ویسکوالاستیک بر پایه لاستیک طبیعی بوده و میراگر ویسکوالاستیک بر پایه لاستیک طبیعی دارای سختی بیشتری نسبت به میراگر ویسکوالاستیک بر پایه لاستیک بوتیل می‌باشد. همچنین نتایج حاصل از میراگر ترکیبی نشان داد که این نوع میراگر می‌تواند چرخه‌های بارگذاری بیشتری را تحمل کرده که در نتیجه باعث افزایش شکل‌پذیری میراگر ترکیبی فوق شده است. نتایج آزمایشگاهی این مطالعه نشان دهنده رفتار هیسترتیک پایدار و ظرفیت بالای میراگر پیشنهادی برای استهلاک انرژی می‌باشد. لی و همکاران [13] در یک مطالعه آزمایشگاهی نوع جدیدی از میراگر ترکیبی اصطکاکی و فولادی را ارائه نمودند. نتایج حاصل از تحقیق آن‌ها بیانگر رفتار هیسترتیک پایدار میراگر پیشنهادی می‌باشد. اما بسته به نوع هندسه میراگرهای فولادی شیاردار، این رفتار متفاوت می‌باشد

به طوری که میراگرهای فولادی شیارداری که دارای سختی خارج صفحه بیشتری می باشند، شکل پذیری و در نتیجه قابلیت ظرفیت زیادی برای اتلاف انرژی دارند. کیم و همکاران [14] با استفاده از ترکیب میراگر اصطکاکی و فولادی شیاردار اقدام به بهسازی یک سازه بتنی ۱۵ طبقه نمودند. بررسی نتایج مطالعه آن ها نشان می دهد که برای اهداف بهسازی، میراگر ترکیبی فوق نسبت به میراگر فولادی شیاردار با همان نسبت مقاومت جاری شدگی، دارای عملکرد مناسب تری می باشد. همچنین نتایج حاصل از آنالیز شکست نشان داد که احتمال رسیدن سازه بهسازی شده توسط این نوع میراگر به مقادیر مجاز جابجایی کاهش یافته که در نتیجه به طور همزمان باعث افزایش ابعاد مقاطع می شود. همچنین متوسط هزینه تعمیر سازه مذکور با استفاده از این نوع میراگر برای سطح خطرهای مختلف بسیار کم تر از سایر روش ها و یا تخریب سازه می باشد. همچنین اوستایی فر و همکاران [15] میراگر ترکیبی پیستونی را ارائه دادند و مکانیزم عملکردی آن را به صورت آزمایشگاهی و عددی مورد مطالعه قرار دادند. گو و همکاران [16] میراگر ترکیبی متشکل از میراگر ویسکوالاستیک با میراگر اصطکاکی پیشنهاد دادند که به صورت سری به یکدیگر متصل شده است. در واقع قبل از فعال شدن فیوز اصطکاکی، میراگر ویسکوالاستیک اقدام به اتلاف انرژی می کند و هنگامی که تغییر شکل میراگر ویسکوالاستیک بیش از حد افزایش یابد، رفتار ویسکوالاستیک-پلاستیک در این نوع میراگر مشاهده می شود.

به طور کلی میراگرهای فولادی به تنهایی کاربرد چندانی برای کنترل ارتعاشات خفیف ندارند. زیرا نیاز به نیروی نسبتاً بزرگی در حجم خود برای ورود به ناحیه غیرتجاعی دارند تا بتوانند اقدام به اتلاف انرژی کنند. از طرف دیگر میراگرهای فولادی شیاردار^۱ (SSD) [۱۷] و دندانه شانه ای^۲ (CTD) [18]، به واسطه تغییر شکل های غیرتجاعی درون صفحه که ناشی از بارگذاری درون صفحه می باشد، دارای سختی بیشتری نسبت به ورق های به کار رفته در میراگرهای ADAS^۳ [19] و TADAS^۴ [20] می باشند که این امر باعث کاهش وزن فولاد مصرفی برای ساخت میراگرهای فولادی می شود اما محدودیت کنترل ارتعاشات خفیف توسط این نوع میراگرها باقی می ماند. لذا هدف از انجام این پژوهش ارائه میراگر ترکیبی است که بتوان برای کنترل سطوح مختلفی از ارتعاشات کاربرد داشته باشد. همچنین از دیگر اهداف این پژوهش یافتن هندسه بهینه برای میراگر فولادی به طوری که بتوان با کم ترین وزن فولاد بیش ترین سیستم دارای اتلاف انرژی ایجاد کرد. بنابراین با ترکیب سری میراگر فولادی با میراگر اصطکاکی و استفاده از یکسری متوقف کننده ها می توان میراگر ترکیبی پیشنهاد نمود که برای سطوح مختلفی از ارتعاشات کاربرد داشته باشد به طوری که برای ارتعاشات خفیف به دلیل باقی ماندن میراگر فولادی در حالت الاستیک، میراگر اصطکاکی عمل کند و تحت ارتعاشات شدید دو میراگر توأما اقدام به اتلاف انرژی برای سیستم سازه کند. در ادامه این پژوهش به بررسی مکانیزم عملکردی و ساخت این نوع میراگر پرداخته می شود.

۲- میراگر ترکیبی پیشنهادی

هدف از این بخش معرفی پیکربندی میراگر ترکیبی پیشنهادی متشکل نوارهای فولادی و صفحات اصطکاکی است. شکل ۱ نمای کلی میراگر ترکیبی پیشنهادی را نشان می دهد.



شکل ۱: نمای کلی میراگر ترکیبی پیشنهادی.

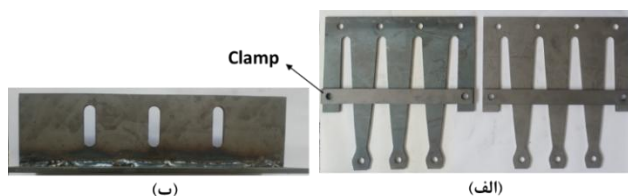
¹ Steel slit damper

² Comb teeth damper

³ Added damping and stiffness

⁴ Triangular-plate added damping and stiffness

میراگر ترکیبی پیشنهادی شامل میراگرهای فولادی است که به صورت موازی به یکدیگر متصل می‌شوند (شکل ۲ (الف)) و از یک طرف توسط یک عضو T شکل به قاب (شکل ۲ (ب)) و از طرف دیگر توسط یک لینک اتصال (CL) (شکل ۳) به میراگر اصطکاکی متصل می‌شوند. لازم به ذکر است که سوراخ‌های لوبیایی ایجاد شده در مقطع T شکل و مهار کننده‌ها^۵، برای به تعویق انداختن کماتش نوارهای میراگر فولادی بر اثر افزایش طول و کاهش آن در حرکت‌های چرخشی است.



شکل ۲: (الف) میراگرهای فولادی جاری شونده (MYD) (ب) لینک اتصال میراگر فولادی به قاب.

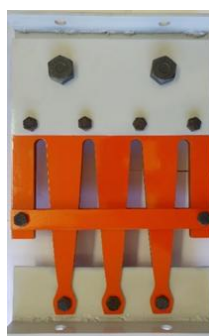


شکل ۳: لینک اتصال میراگر اصطکاکی و فولادی.

میراگر اصطکاکی متشکل از مجموعه پدهای اصطکاکی کامپوزیتی (شکل ۴ (الف)) است، که مابین یک المان T شکل و مجموعه صفحات پوششی (شکل ۴ (ب)) قرار می‌گیرد. محدوده حداکثر دامنه جابجایی میراگر اصطکاکی، توسط سوراخ‌های لوبیایی تعبیه شده در المان T شکل (شکل ۴ (ب)) کنترل می‌شود که محدوده حرکتی در جهت مثبت و منفی دارد و وقتی جابجایی افقی (d) به مقدار محدوده حداکثر دامنه جابجایی میراگر اصطکاکی مورد نظر (d_{FD}) می‌رسد، محدوده حرکتی میراگر اصطکاکی توسط متوقف کننده که شامل ۲ پیچ پرمقاومت M24 است، متوقف می‌شود و تغییر شکل‌های غیر الاستیک در میراگر فولادی روی می‌دهد. از این رو پس از وقوع زلزله‌های شدید کافی است، تنها میراگر فولادی تعویض شود. شکل ۵ نمونه میراگر ترکیبی ساخته شده را نشان می‌دهد.



شکل ۴: (الف) پدهای اصطکاکی (ب) اجزاء میراگر اصطکاکی.

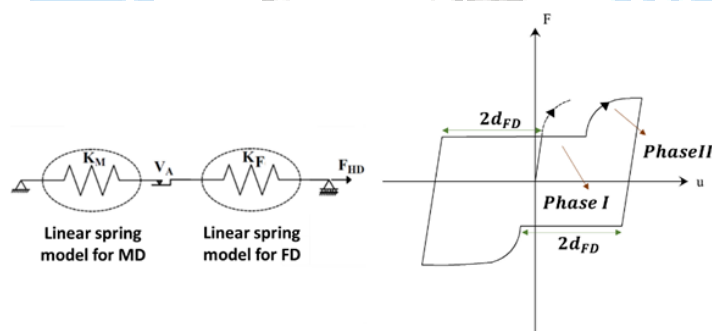


شکل ۵: میراگر ترکیبی پیشنهادی.

⁵ Clamp

مکانیزم عملکردی میراگر ترکیبی شامل دو فاز است؛ که برای کنترل سازه تحت زلزله‌های خفیف و باد فاز ۱ برنامه ریزی شده است و استهلاک انرژی ورودی تنها با میراگر اصطکاکی مهار می‌شود. تحت یک زلزله قوی، سیستم میرایی ممکن است جابجایی بیش‌تر از (d_{FD}) را تجربه کند. در این وضعیت، رفتار ترکیبی فاز ۲ از طریق فعال سازی میراگر اصطکاکی و میراگر فولادی اتفاق می‌افتد. هنگامی که جابجایی افقی d به محدوده‌ای بیش از محدوده حداکثر دامنه جابجایی میراگر اصطکاکی برسد، توسط متوقف کننده‌های تعبیه شده، محدوده حرکتی میراگر اصطکاکی محدود می‌شود. در نتیجه اگر d بیش از d_{FD} باشد، میراگر ترکیبی وارد فاز ۲ شده و میراگر فولادی شروع به کار می‌کند. شکل ۶ نشان دهنده مراحل رفتاری و منحنی ایده‌آل هیستریزس می‌باشد که نشان دهنده مفهوم رفتار چند مرحله‌ای میراگر ترکیبی فوق است. در فاز ۲ به دلیل این‌که که انرژی توسط تغییر شکل‌های غیرالاستیک نوارهای فولادی و همچنین میراگر اصطکاکی اتلاف می‌شود، بهره‌وری اتلاف انرژی به طور قابل توجهی در مقایسه با فاز ۱ افزایش می‌یابد. الزامات پایداری برای میراگر ترکیبی پیشنهادی، برای عملکرد مناسب مورد نظر که شامل رفتار چند مرحله‌ای میراگر اصطکاکی و میراگر فولادی می‌باشد، به شرح زیر خلاصه می‌شود:

- حداکثر محدوده دامنه جابجایی میراگر اصطکاکی بایستی در محدوده‌ای طراحی شود که میراگر فولادی تحت آن وضعیت فعال نشده و بتواند اتلاف انرژی برای یک سطح نسبتاً پایین از بار لرزه‌ای را انجام دهد.
- برای جلوگیری از تغییر شکل‌های بیش از حد در میراگر اصطکاکی، d_{FD} بایستی در یک محدوده مناسب با توجه به تقاضای لرزه-ای خفیفی که انتظار می‌رود، محدود شود.
- میراگر فولادی باید در فاز ۱ به صورت الاستیک باقی بماند و هیچگونه تغییر شکل غیرالاستیک در آن رخ ندهد.
- متوقف کننده‌ها (استاپرها) بایستی به اندازه کافی قوی باشند که در برابر مقاومت نهایی مورد انتظار، مقاومت کنند.



شکل ۶: مراحل رفتاری میراگر ترکیبی.

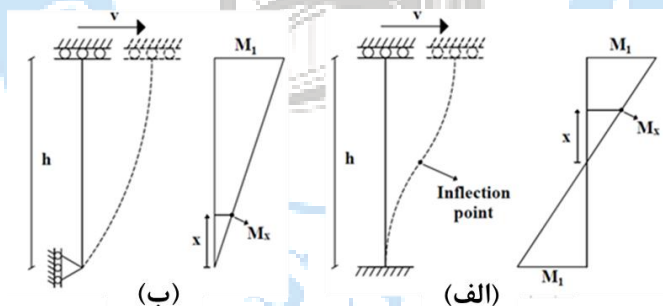
از آنجا که هدف از انجام این پژوهش بهبود رفتار میراگرهای فولادی می‌باشد، لذا با توجه به تعداد لینک‌های میراگر فولادی می‌توان نوع میراگر اصطکاکی، ابعاد و ضخامت پدهای اصطکاکی را طراحی نمود. سه پارامتر اصلی که در طراحی میراگر ترکیبی پیشنهادی اهمیت دارد؛ عبارتند از:

- محدودیت ابعادی میراگر ترکیبی
- محدودیت دامنه جابجایی میراگر اصطکاکی
- تامین نیروی لازم الاستیک میراگر فولادی توسط میراگر اصطکاکی برای دامنه جابجایی متناسب با حداکثر کرنش برشی در نظر گرفته شده است.

ظرفیت نهایی میراگر ترکیبی براساس تعداد نوارهای فولادی میراگر فولادی تعیین می‌شود. لذا براساس حداکثر نیروی وارد بر سازه می‌توان تعداد نوارهای میراگر فولادی مورد نیاز را بدست آورد. از طرف دیگر با تعیین تعداد نوارها می‌توان نیروی الاستیک میراگر ترکیبی را بدست آورد. بنابراین با توجه به نوع پد اصطکاکی حداکثر نیروی پیش تنیدگی مورد نیاز برای میراگر اصطکاکی بدست می‌آید. برای تعیین طول سوراخ‌های لوبیایی کافی است که محدوده حداکثر تغییر شکل سازه تحت ارتعاشات خفیف مورد ارزیابی قرار گیرد. بنابراین با دانستن موارد فوق و محدودیت‌های ابعادی میراگر ترکیبی می‌توان اقدام به طراحی دامنه جابجایی میراگر اصطکاکی و استاپرها کرد.

۱-۲- طراحی میراگر فولادی

همانطور که در بخش ۱ بیان شد میراگرهای تسلیم شونده فولادی براساس نحوه قرارگیری نوارها به دو دسته ADAS-TADAS و SSD-CTD تقسیم می‌شوند. اما میراگرهای تسلیم شونده فولادی که نوارهای آن به گونه‌ای است که حول محور ضعیف تغییر شکل می‌دهند، به واسطه خمش خارج از صفحه خود دارای سختی قابل توجهی نمی‌باشند. درحالی‌که میراگرهای فلزی شیاردار (SSD) و دندان‌شانه‌ای (CTD)، به دلیل تغییر شکل‌های خمشی درون صفحه ناشی از بارگذاری صفحه‌ای، دارای سختی بیشتری نسبت به ورق‌های به کار رفته در ADAS و TADAS می‌باشند که این امر می‌تواند باعث کاهش وزن فولاد مصرفی برای ساخت میراگرهای فلزی شود، با این حال در این نوع میراگرها نگرانی‌هایی ناشی از ناپایداری رفتار هیسترتیک وجود دارد. بنابراین طراحی میراگر ترکیبی، هندسه نوارهای میراگر فولادی شیاردار و دندان‌شانه‌ای بایستی به گونه‌ای باشد که توزیع تنش یکنواخت را در سرتاسر المان تضمین نموده و از ایجاد تمرکز تنش در طول نوارها جلوگیری شود. نوارهای میراگر فولادی شیاردار را می‌توان به صورت یک تکیه‌گاه دو سرگیردار در نظر گرفت به طوری که در یک تکیه‌گاه آن نشست رخ داده است، (شکل ۷ الف)). همچنین با آزاد کردن انتهای نوارهای میراگر فولادی شیاردار، می‌توان نوارهای میراگر دندان‌شانه‌ای را به صورت (شکل ۷ ب)) مدل نمود.



شکل ۷: رفتار میراگرهای فولادی (الف) میراگر فولادی شیاردار (SSD) (ب) میراگر فولادی دندان‌شانه‌ای (CTD).

این نوع میراگرهای فلزی متشکل از نوارهای فلزی می‌باشند که به صورت موازی با یکدیگر ترکیب شده‌اند. برای بررسی رفتار این نوع میراگر، کافی است رفتار یکی از نوارها را مورد بررسی قرار دهیم. چنانچه میراگر تحت نیروی برشی به اندازه V قرار گیرد، نیروی برشی وارد بر هر نوار (v) را می‌توان به صورت رابطه (۱) تعیین نمود:

$$v = \frac{V}{n} \quad (1)$$

که n تعداد نوارهای میراگر فلزی می‌باشد. با در نظر گرفتن شرایط مرزی حاکم بر هر نوع نوار می‌توان توزیع لنگر را به صورت رابطه (۲) در نظر گرفت.

$$M_x = \frac{\alpha M_1 x}{h} = vx \quad (2)$$

که h ، M_1 به ترتیب حداکثر لنگر خمشی در انتهای نوار و ارتفاع نوار می‌باشند. α ضریب مربوط به نوع نوار می‌باشد که برای نوارهای میراگر شیاردار و دندانه‌شانه‌ای به ترتیب برابر ۲ و ۱ می‌باشد. همچنین میزان لنگر پلاستیک برای هر یک از نوارها به صورت رابطه (۳) تعیین می‌شود.

$$M_{p,x} = F_y Z_x = F_y \left(\frac{t_x b_x^2}{4} \right) \quad (3)$$

که F_y ، Z_x ، t_x و b_x به ترتیب تنش تسلیم، اساس مقطع پلاستیک، ضخامت و عرض نوار می‌باشد. از آنجا که هدف از طراحی نوارها، ایجاد تغییر شکل غیر ارتجاعی در طول نوارهای المان است، وقتی تمام سطح مقطع به طور همزمان به تسلیم پلاستیک^۶ برسد، می‌توان رابطه (۲) و (۳) را برابر یکدیگر قرار دهیم. از این رو داریم:

$$b_x = 2 \left(\frac{vx}{F_y t_x} \right)^{0.5} = 2\lambda \sqrt{x} \quad (4)$$

که در آن، λ ضریب شکل نوار و واحد آن ریشه دوم واحد طول می‌باشد. لذا با توجه به رابطه (۴) هندسه کلی نوارها به صورت سهمی می‌باشد.

روابط فوق بر این فرض استوار می‌باشند که فقط نوار میراگر تحت لنگر خمشی قرار داشته باشد، در این حالت میراگر نمی‌تواند در برابر نیروی برشی در وسط نوار (برای میراگر فلزی شیاردار) و انتهای نوار (برای میراگر دندانه‌شانه‌ای) مقاومت کافی را داشته باشد و بایستی تنش ناشی از برش در نظر گرفته شود. لذا سطح مقطع بخش مرکزی و انتهایی نوار بایستی به گونه‌ای باشد که قبل از شکست برشی، تغییر شکل خمیری در طول نوار ایجاد شود. بر این اساس پهنای نوار در قسمت وسط (برای میراگر شیاردار) و انتهای نوار (برای میراگر دندانه‌شانه‌ای) (b_0) مطابق رابطه (۵) محاسبه می‌شود.

$$b_0 > \frac{2\sqrt{3}v}{F_y t_0} \quad (5)$$

که در آن، t_0 ضخامت نوار در وسط و انتهای نوار می‌باشد.

اگر مقاومت پلاستیک (P_p) نیروی افقی نوار باشد، لنگر خمشی پلاستیک (M_p) را می‌توان با استفاده از تعادل، بصورت رابطه (۶) بیان کرد.

$$M_p = \frac{P_p h}{\alpha} \quad (6)$$

با استفاده از روابط (۳) و (۶) می‌توان میزان مقاومت پلاستیک مقطع را مطابق رابطه (۷) بیان کرد

$$P_p = \frac{\alpha F_y t_x b_x^2}{4h} \quad (7)$$

با توجه به این که ضریب شکل^۷ (SF) در مقاطع مستطیلی برابر با ۱.۵ می‌باشد، لذا میزان مقاومت تسلیم (P_y) مطابق رابطه (۹) بدست می‌آید.

⁶ Plastic yielding

$$SF_R = \frac{Z}{S} = 1.5 \quad (8)$$

$$P_y = \frac{\alpha F_y t_x b_x^2}{6h} = \frac{2}{3} F_y t_x \lambda^2 \quad (9)$$

همچنین برای محاسبه میزان نیروی الاستیک میراگر فلزی می‌توان از روش کار مجازی استفاده نمود. در واقع این نیرو برای طراحی ابعاد و تعداد لایه‌های الاستومر میراگر ویسکوالاستیک کاربرد دارد. با فرض رفتار الاستیک خطی و استفاده از قضیه کار مجازی، می‌توان سختی الاستیک^۸ (K_e) و جابجایی تسلیم^۹ (δ_y) را محاسبه نمود.

$$\delta = \int \frac{M_x m_x}{EI_x} dx = \frac{12\alpha P}{E} \int_0^{h/\alpha} \frac{x^2}{t_x b_x^3} dx \quad (10)$$

که در آن، E و I_x به ترتیب مدول یانگ و ممان اینرسی هر نوار در محل x می‌باشد. زمانی که دو انتها به طور کامل گیردار فرض شده باشد میزان سختی الاستیک برابر است با:

$$K_e = C \frac{P}{\delta} = C \frac{E}{12\alpha \int_0^{h/\alpha} \left(\frac{x^2}{b_x^3 t_x} \right) dx} = C \frac{Et\lambda^3}{\alpha \left(\frac{h}{\alpha} \right)^{1.5}} \quad (11)$$

که در آن، $C \leq 1$ ضریب سختی می‌باشد. هر چه میزان گیرداری دو انتها کم‌تر باشد، میزان این ضریب کاهش پیدا می‌کند. لی^{۱۰} و همکاران [۱۳] میزان ضریب سختی را برای میراگرهای پیشنه‌دای خود (SSD) بین ۰.۷ تا ۰.۸ بدست آوردند که این موضوع به دلیل اثر نرم‌شدگی انتهای نوارهای گیردار می‌باشد. براساس قانون هوک^{۱۱} اگر P جایگزین P_y شود جابجایی تسلیم برابر است با:

$$\delta_y = \frac{P_y}{CK_e} = \frac{\alpha F_y t b_1^2}{6Ch} \times \frac{12\alpha \int_0^{h/\alpha} \left(\frac{x^2}{b_x^3 t_x} \right) dx}{E} = \frac{2\alpha F_y \left(\frac{h}{\alpha} \right)^{1.5}}{3CE\lambda} \quad (12)$$

طراحی این نوع هندسه برای نوارها دارای اتلاف انرژی بسیار مناسب است، اما دو مود خرابی کمناش خمشی-پیچشی و کمناش فشاری برای میراگر فلزی شیاردار محتمل است. همچنین ضریب شکل هندسه نوارها λ چالش دیگری است که بایستی در طراحی میراگر تسلیم شونده فولادی در نظر گرفته شود. از طرف دیگر روابط بالا با فرض غالب بودن رفتار خمشی بدست آمده است. بنابراین نسبت انرژی برشی به انرژی کل باید کمتر از ۰.۵ باشد. لذا داریم:

$$\frac{U_s}{U_s + U_m} = \frac{3.12\lambda^2}{3.12\lambda^2 + h} < 0.05 \quad (13)$$

با در نظر گرفتن ارتفاع ۲۰۰ میلی‌متر برای نمونه، می‌توان محدوده ضریب شکلی بین ۱ تا ۲ در نظر گرفت. که در ادامه بهینه‌ترین ضریب شکل با توجه به پروتکل بارگذاری میراگرهای وابسته به جابجایی مورد استخراج قرار می‌گیرد.

⁷ Shape factor

⁸ Elastic stiffness

⁹ Yield displacement

¹⁰ Lee

¹¹ Hooke's law

۲-۲- طراحی میراگر اصطکاکی

به منظور طراحی میراگر اصطکاکی می توان از صفحات اصطکاکی متفاوتی مانند لنت، آلیاژ آلومینیوم، کامپوزیت و صفحات صاب نخورده فولاد استفاده نمود. نصب و راه اندازی میراگرهای ترکیبی بدین صورت است که ابتدا ۴ پد اصطکاکی با ابعاد $100 \times 50 \times 5 \text{ mm}$ و ضریب اصطکاک ۰.۳ تهیه و یک میراگر اصطکاکی برشی با دامنه جابجایی ± 20 میلی متر تولید می شود. طبق رابطه کولمب نیروی اصطکاک برابر است با:

$$F = \mu n m N_b \quad (14)$$

که در این رابطه، F نیروی لغزش، m تعداد سطوح اصطکاکی در گیر، n تعداد و N_b نیروی پیش تنیدگی هر پیچ می باشد. لازم به ذکر است که نیروی پیش تنیدگی هر پیچ (N_b) با استفاده از رابطه لنگر پیچش زیر بدست می آید.

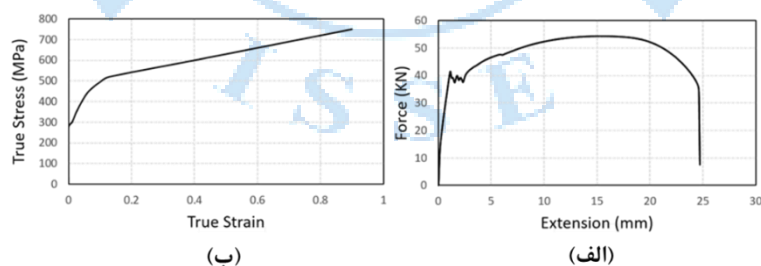
$$N_b = \frac{T_b}{0.2d} \quad (15)$$

۳- مدلسازی عددی

در این مطالعه، به منظور بررسی رفتار مکانیزم عملکردی میراگر ترکیبی پیشنهادی مدل سازی عددی جامعی بر روی هر یک از اجزاء انجام شد. در بخش اول به هندسه بهینه میراگر فولادی پرداخته شده و در بخش بعد مکانیزم رفتاری میراگر ترکیبی پیشنهادی مورد مطالعه قرار گرفته است.

۳-۱- مشخصات فولاد

برای معرفی مشخصات مصالح فولادی میراگرهای فلزی از آزمایش تک محوری نمونه های دمبلی با ضخامت ۱۰ میلی متر استفاده شده است. منحنی هر یک از نمونه ها براساس مقادیر نیرو و جابجایی ثبت شده در طول آزمایش (شکل ۸ الف)) و براساس ابعاد اولیه نمونه منحنی تنش کرنش حقیقی ترسیم شده است (شکل ۸ ب)).



شکل ۸: منحنی رفتار فولاد مورد استفاده (الف) منحنی نیرو و جابجایی حاصل از آزمون کشش تک محوره (ب) منحنی تنش کرنش حقیقی [11].

از آنجا که ابعاد سطح مقطع نمونه دمبلی شکل در طول آزمایش ثابت نیستند و از طرف دیگر منحنی تنش-کرنش مهندسی براساس ابعاد اولیه نمونه ترسیم می شود، لذا نمودار فوق، نمودار واقعی تغییر شکل یک فلز نمی باشد. تنش حقیقی (σ) و کرنش حقیقی، ϵ ، بر اساس تنش و کرنش مهندسی به صورت زیر می باشد.

$$\sigma = S (1 + e) \quad (16)$$

$$\epsilon = \ln \left(\frac{L}{L_0} \right) = \ln (e + 1) \quad (17)$$

که در آن، S و e به ترتیب تنش و کرنش مهندسی می‌باشند. لازم به ذکر است که رابطه فوق تا قبل از ایجاد ناحیه باریک شدگی معتبر می‌باشد و سپس تنش کرنش حقیقی را با داشتن مقادیر لحظه‌ای بار، P ، و مساحت، A ، با استفاده از روابط زیر محاسبه نمود.

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (18)$$

$$\varepsilon = \ln\left(\frac{A}{A_0}\right) \quad (19)$$

در این مطالعه، با استفاده از روابط فوق مقادیر تنش کرنش حقیقی محاسبه شده و برای مدل المان محدود مورد استفاده قرار می‌گیرد.

همچنین به منظور در نظر گرفتن رفتار سخت شونده‌گی نوارهای میراگر فلزی از مدل سخت شونده‌گی ترکیبی استفاده شده است. این مدل از ترکیب سطح تسلیم فون میسز، جریان خمیری و سخت شونده‌گی غیرخطی مرکب همسانگرد و جنبشی ایجاد شده است. در واقع این مدل یک مدل خمیری غیرخطی است که برای بارگذارپهای چرخه‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد. مقادیر کالیبره شده متغیرهای فوق برای مدل فولادی المان محدود در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱: مقادیر کالیبره شده متغیرها برای نمونه‌های فولادی.

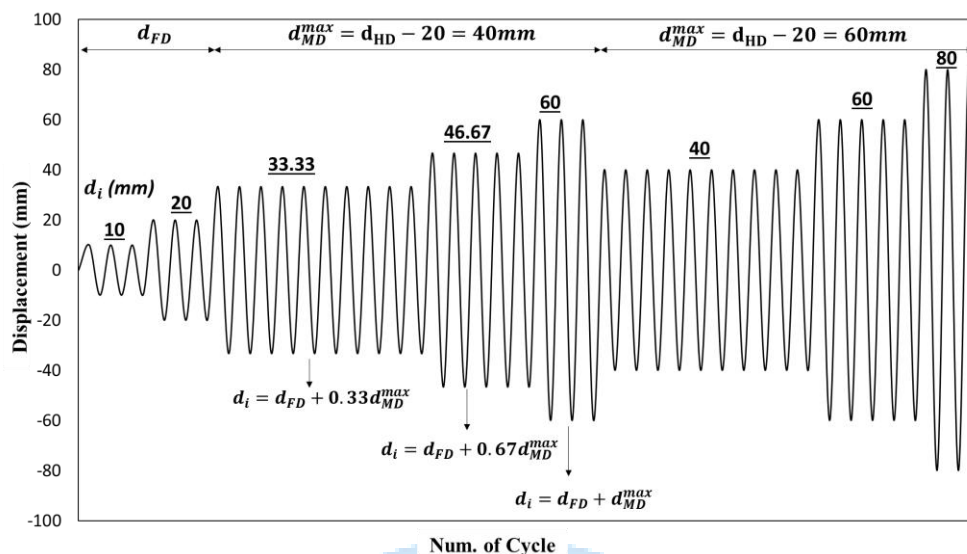
σ_0	Q_∞	B
۲۸۵	۵۰	۵

۳-۲- پروتکل بارگذاری

طبق ضوابط ASCE7-17 [۲۱] یکی از شرایط تأیید تأیید میراگرهای وابسته به تغییر مکان به عنوان وسیله اتلاف انرژی در سازه، تحمل چرخه‌های رفت و برگشتی زیر می‌باشد.

- توانایی تحمل ۱۰ چرخه رفت و برگشت کامل با دامنه جابجایی متناظر با ۰.۳۳ حداکثر دامنه جابجایی میراگر
- توانایی تحمل ۵ چرخه رفت و برگشت کامل با دامنه جابجایی متناظر با ۰.۶۷ حداکثر دامنه جابجایی میراگر
- توانایی تحمل ۳ چرخه رفت و برگشت کامل با دامنه جابجایی متناظر با حداکثر دامنه جابجایی میراگر

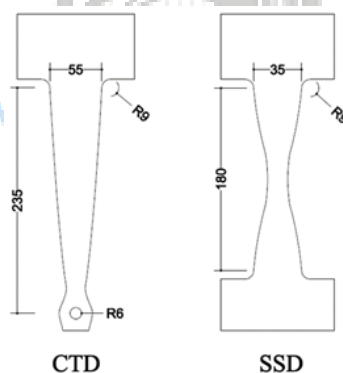
با توجه به نتایج مدل عددی و ابعاد در نظر گرفته برای هر یک از نوارهای میراگر فولادی، حداکثر دامنه تغییر مکانی میراگر فولادی برابر ۴۰ میلی‌متر فرض شده است. لذا تعداد سیکل‌های در نظر گرفته شده برای فعال سازی فاز ۲ میراگر ترکیبی، مجموعی از دو دامنه تغییر مکانی میراگر اصطکاکی و فولادی می‌باشد. به گونه‌ای که علاوه بر جابجایی ۲۰ میلی‌متر در مرحله فاز ۱ توسط میراگر اصطکاکی، میراگر ترکیبی تحت ۱۰ سیکل با دامنه ۰.۳۳ حداکثر جابجایی میراگر فولادی (33.33mm)، سپس ۵ سیکل با دامنه حداکثر جابجایی میراگر فولادی (46.67mm) و در انتها ۳ سیکل با دامنه حداکثر جابجایی میراگر فولادی (60mm) قرار گرفت. از آنجا که ممکن است در نمونه‌ها شکست یا کاهش مقاومتی مشاهده نشود، می‌توان حداکثر دامنه جابجایی میراگر فولادی را به ۶۰ میلی‌متر تغییر داد و مراحل فوق را با در نظر گرفتن این دامنه جابجایی انجام داد. شکل ۹ پروتکل بارگذاری مورد استفاده برای میراگر ترکیبی را نشان می‌دهد.



شکل ۹: پروتکل بارگذاری میراگر ترکیبی.

۳-۳- مدل سازی عددی

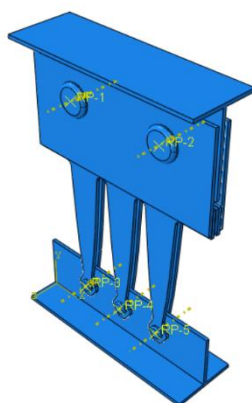
به منظور بررسی رفتار میراگر ترکیبی پیشنهادی متشکل از میراگر اصطکاکی و میراگر فولادی، از المان سه بعدی ۸ وجهی در نرم افزار آباکوس^{۱۲} ۲۰۲۰ [۲۲] استفاده شده است. ابتدا دو نوع هندسه مطابق شکل ۱۰ برای میراگر فولادی در نظر گرفته شد. پس از بررسی عملکرد میراگرهای فولادی میراگر CTD به دلیل مکانیزم به تعویق افتادن پدیده کمانش انتخاب گردید. برای یافتن هندسه بهینه این نوع میراگر، تعداد ۵ نوار فولادی جاری شونده با ضرایب شکل $\lambda = 1.4, 1.6, 1.8, 2$ و $2.8 (mm^{0.5})$ با ارتفاع ثابت ۲۰۰ میلی متر در نظر گرفته شد.



شکل ۱۰. هندسه میراگرهای CTD و SSD [11].

سپس مقاومت هر یک از نوارها، اثر ضریب شکل بر روی میزان اتلاف انرژی میرایی لزوج و بار بحرانی کمانش مورد ارزیابی قرار گرفت، تا یک هندسه بهینه برای میراگر فولادی استخراج شود. پس از تعیین هندسه بهینه، اقدام به مدل سازی عددی بر روی میراگر ترکیبی پیشنهادی انجام شد. شکل ۱۱ مدل سه بعدی میراگر ترکیبی پیشنهادی را نشان می دهد.

12 ABAQUS Software

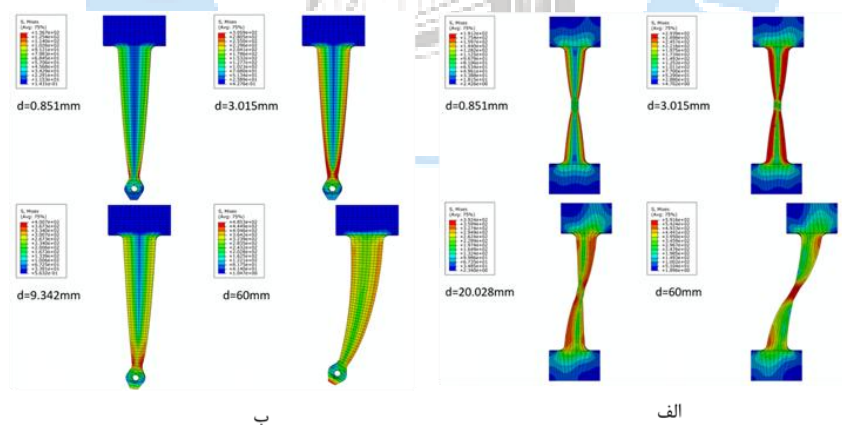


شکل ۱۱: هندسه نمونه اول میراگر ترکیبی.

۴- بررسی نتایج

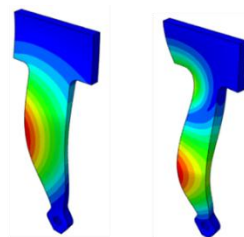
۴-۱- بررسی هندسه بهینه میراگر فولادی

به منظور بررسی رفتار و هندسه نوارهای میراگر فولادی شیاردار و دندانه شانه‌ای ابتدا مدل سازی آن‌ها انجام شد. نتایج حاصل از توزیع تنش برای میراگرهای فولادی دندانه شانه‌ای و شیاردار در شکل ۱۲ نشان داده شده است. همان‌طور که انتظار می‌رفت تغییر شکل خمیری به طور کامل در سرتاسر المان‌ها شکل گرفته است. اما امکان بروز شکست برشی در جابجایی ۶۰ میلی‌متر در نمونه‌های SSD وجود دارد. همچنین بروز کمانش در نمونه‌های SSD به دلیل افزایش و کاهش طول نوار در حرکت‌های چرخشی مشاهده شد. بنابراین در این پژوهش از نوارهای CTD برای میراگر ترکیبی پیشنهادی استفاده شد. که در ادامه رفتار این نوع نوارها برای ضرایب شکل متفاوت مورد بررسی قرار می‌گیرد.



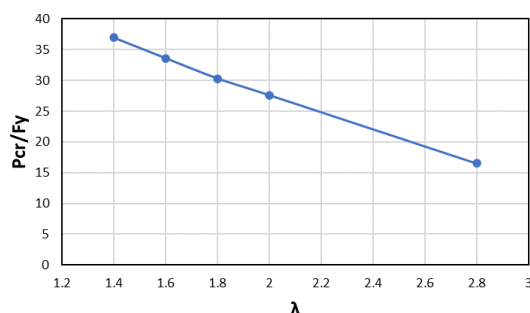
شکل ۱۲. توزیع تنش در نوارهای میراگر فولادی (الف) شیاردار. (ب) دندانه شانه‌ای.

همچنین در این پژوهش به منظور بررسی احتمال وقوع کمانش جانبی نوارهای فولادی، یک تحلیل کمانش الاستیک انجام شد (شکل ۱۳). همان‌طور که ملاحظه می‌شود، بار بحرانی کمانش الاستیک از تنش تسلیم نمونه‌ها که در جدول ۲ نشان داده شده است، بیش‌تر است (شکل ۱۴). این بدان معناست که قبل تسلیم نمونه‌ها امکان کمانش ارتجاعی وجود نخواهد داشت.



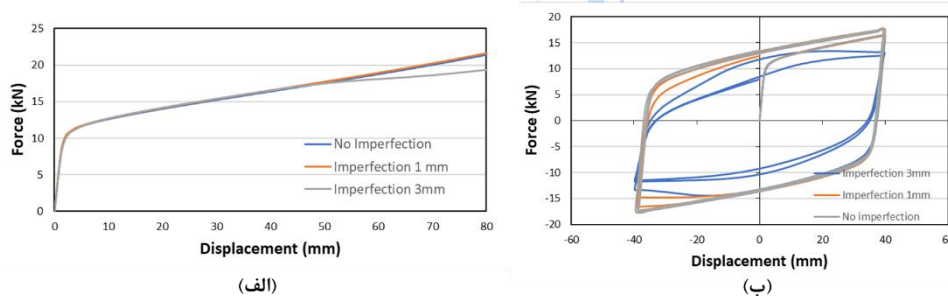
مود ۱ $P_{cr} = 224.5 (kN)$ مود ۲ $P_{cr} = 332.9 (kN)$

شکل ۱۳: مودهای کمانش جانبی الاستیک و بار بحرانی متناظر با آن.



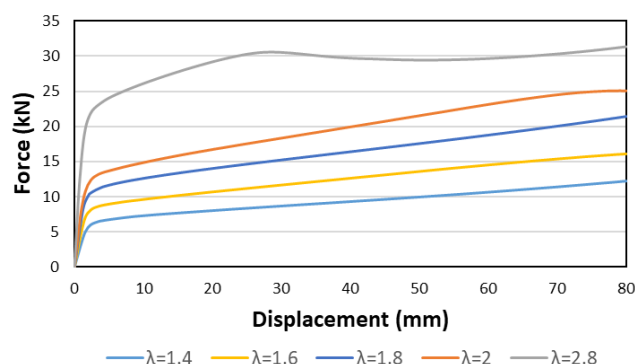
شکل ۱۴: نسبت نیروی بحرانی کمانش الاستیک به نیروی تسلیم نوارها.

با افزایش بارگذاری و تغییر شکل پلاستیک نمونه‌ها، سختی نمونه به تدریج کاهش یافته و احتمال اینکه نمونه در جابجایی‌های بالا دچار کمانش غیرارتجاعی شود وجود دارد. لذا بدین منظور برای تعیین مقاومت نوارها و در نظر گرفتن افت مقاومت ناشی از بارگذاری‌های چرخه‌ای، نقص اولیه به میزان ۱ میلی‌متر متناسب با مود اول و دوم کمانشی و ۰.۵ میلی‌متر متناسب با مود سوم کمانشی برای هندسه نوارها در نظر گرفته شد. بنابراین در تحلیل بارگذاری مونوتونیک جابجایی برابر ۱ میلی‌متر به عنوان نقص در ابتدای تحلیل وجود خواهد داشت. نقص‌های اولیه تضمین می‌کنند که کمانش در مدل عددی رخ دهد. شکل ۱۴ رفتار مونوتونیک و چرخه‌ای نوار با ضریب شکل $\lambda = 1.8 (mm^{0.5})$ را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل ۱۵ مشاهده می‌شود، در جابجایی محدوده ۴۰ میلی‌متر احتمال وقوع کمانش غیر ارتجاعی وجود دارد به طوری که هرچه میزان نقص افزایش یابد، میزان کاهش سختی افزایش پیدا می‌کند. لذا نیاز است که با استفاده از مهارهای جانبی کمانش جانبی غیرارتجاعی کنترل شود.



شکل ۱۵: منحنی نیرو تغییر مکان با در نظر نقص‌های متفاوت (الف) بارگذاری یکنوا (ب) بارگذاری چرخه‌ای شامل ۳ سیکل با دامنه ۴۰ میلی‌متر.

در ادامه‌ی روش عددی، رفتار نوارها با ضرایب شکل متفاوت تحت بارگذاری یکنوا^{۱۳} مورد مطالعه قرار گرفت. شکل ۱۶ منحنی نیرو-تغییر مکان نوارها به ازاء ضریب شکل متفاوت تحت بارگذاری یکنوا با نقص ۱ میلی‌متر متناسب با مود اول و دوم کمانشی و ۰.۵ میلی‌متر متناسب با مود سوم کمانشی را نشان می‌دهد.



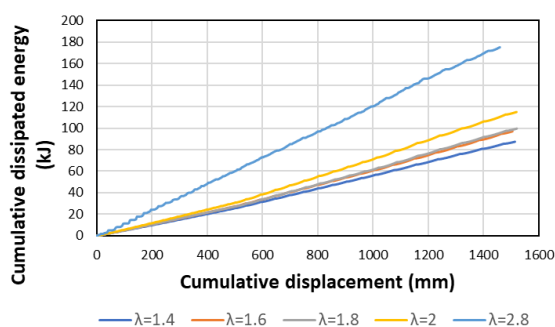
شکل ۱۶: رفتار نوارهای میراگر فولادی تحت بارگذاری یکنوا با ضرایب شکل متفاوت.

همانطور که در شکل ۱۶ مشاهده می‌شود، نوارهای با ضریب شکل ۲.۸ در تغییر شکل‌های بیش از ۲۵ میلیمتر دچار کمانش شده و ظرفیت آن‌ها برای تحمل بارگذاری چرخه‌ای کاهش می‌یابد. لذا از این ضریب شکل در طراحی نوارها صرف نظر می‌شود. جدول ۳ مقادیر نیروی الاستیک و سختی الاستیک نوارها را به ازای ضرایب شکل متفاوت نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود علت تفاوت اندک بین نتایج عددی و تحلیلی این است که در مدل عددی تغییر شکل برشی نوارها در نظر گرفته شده در حالی که روابط براساس تغییر شکل‌های خمشی استخراج شده است. همچنین هندسه مدل عددی با تحلیلی اندکی متفاوت است.

جدول ۳: مقایسه مقادیر الاستیک نوارها براساس نتایج عددی و تحلیلی.

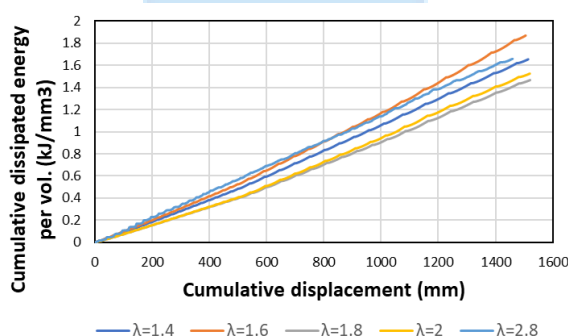
		P_y (N)	K_e (N/mm)	δ_y (mm)
$\lambda=1.4$	Analytical Equations	۳۷۲۴	۲۰۳۵	۱.۸۳
	Finite Element Model	۳۹۱۰	۲۰۵۸	۱.۹
$\lambda=1.6$	Analytical Equations	۴۸۶۴	۳۰۴۰	۱.۶
	Finite Element Model	۵۰۹۷	۲۹۲۹	۱.۷۴
$\lambda=1.8$	Analytical Equations	۶۱۵۶	۴۳۳۵	۱.۴۲
	Finite Element Model	۶۴۸۲	۴۳۸۰	۱.۴۸
$\lambda=2$	Analytical Equations	۷۶۰۰	۵۹۳۸	۱.۲۸
	Finite Element Model	۸۰۵۶	۶۱۵۰	۱.۳۱
$\lambda=2.8$	Analytical Equations	۱۴۸۹۶	۱۶۳۶۹	۰.۹۱
	Finite Element Model	۱۵۶۴۰	۱۶۸۱۷	۰.۹۳

معیار دیگری که در این مطالعه برای تعیین هندسه بهینه نوارها در نظر گرفته شده، میزان اتلاف انرژی هر یک از نوارها است. لذا هر یک از نوارها تحت پروتکل بارگذاری که در بخش ۲-۳ توضیح داده شد، قرار گرفته‌اند. همان‌طور که در شکل ۱۷ ملاحظه می‌شود، نمونه‌هایی که ضریب شکل بالایی دارند از میزان اتلاف انرژی زیادی برخوردارند. اما از طرف دیگر به دلیل هزینه‌ی بالای برش کاری و فولاد مصرفی نیاز است که میزان اتلاف انرژی در واحد حجم نمونه‌ها مورد مطالعه قرار گیرد تا نمونه بهینه استخراج شود.



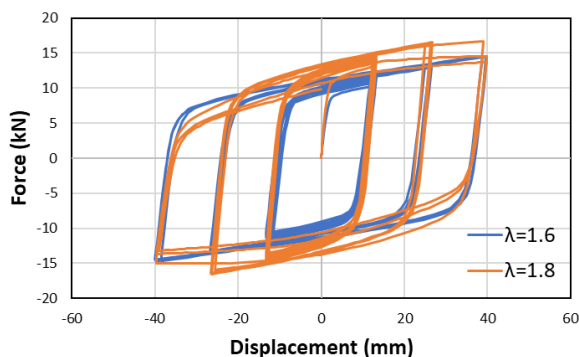
شکل ۱۷: اتلاف انرژی نوارها به ازای ضرایب شکل متفاوت.

مطابق شکل ۱۸ می‌توان انرژی اتلاف شده در واحد حجم نمونه‌ها به ازای ضرایب مختلف را مشاهده کرد. به طوری که برای ضریب شکل ۱.۶ حداکثر اتلاف انرژی در واحد حجم نمونه وجود دارد.



شکل ۱۸: اتلاف انرژی نوارها بر واحد حجم به ازای ضرایب شکل متفاوت.

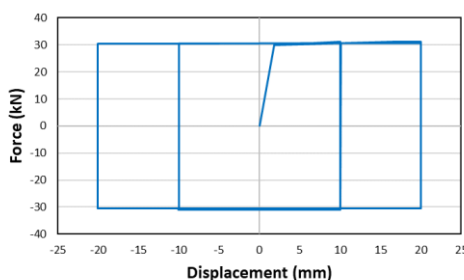
برای اطمینان از عملکرد مناسب نوار با ضریب شکل ۱.۶، نمونه تحت پروتکل بارگذاری با حداکثر دامنه جابجایی ۴۰ میلی‌متر مطابق با توضیحات بخش ۳-۲ قرار گرفت، (شکل ۹). همانطور که مشاهده می‌شود، نمونه با ضریب شکل ۱.۶ رفتار چرخه‌ای پایدارتری نسبت به نمونه با ضریب شکل ۱.۸ دارد و افت مقاومت در این حالت نیازمند افزایش دامنه جابجایی است. بنابراین نتایج عددی نشان می‌دهد که بهترین حالت برای این نوع میراگر، نوار است که دارای ضریب شکل ۱.۶ باشد. نمونه‌ای که دارای ضریب شکل ۱.۸ است در دامنه جابجایی ۴۰ میلی‌متر دچار افت مقاومت می‌شود.



شکل ۱۹: رفتار چرخه‌ای میراگر فلزی تحت پروتکل بارگذاری چرخه‌ای.

۲-۴- بررسی رفتار میراگر ترکیبی

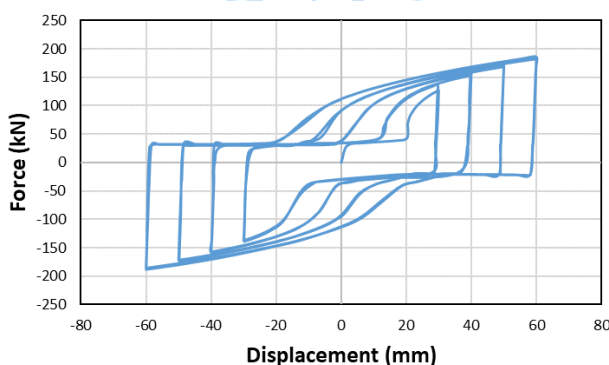
ابتدا به منظور بررسی رفتار فاز ۱، میراگر ترکیبی پیشنهادی تحت تاریخچه بارگذاری جابجایی-کنترل ۲۰ میلی‌متر و کم‌تر از آن قرار گرفت. و پس از آن برای بررسی رفتار فاز ۲ میراگر ترکیبی، از تاریخچه بارگذاری جابجایی-کنترل بیش از ۲۰ میلی‌متر استفاده شد. همانطور که انتظار می‌رفت تسلیم میراگر تقریباً در جابجایی ۲۰ میلی‌متر شروع شده و قبل از عمل کردن متوقف کننده‌ها، میراگر فولادی در حالت الاستیک باقی مانده است. شکل ۲۰ بیانگر رفتار میراگر ترکیبی (HD) در فاز ۱ می‌باشد. علت آنکه تسلیم میراگر دقیقاً در جابجایی در نظر گرفته یعنی ۲۰ میلی‌متر رخ نداده است، جابجایی لینک اتصال دو نوع میراگر و سرعت پایین بارگذاری است. در واقع از آنجا که طبق روابط تحلیلی و مدل المان محدود، تسلیم میراگر تقریباً در جابجایی ۲ میلی‌متر شروع شده لذا اتصال موازی میراگر دندانه شانه‌ای و لینک اتصال باعث جابجایی ۲ میلی‌متر می‌شود و از آنجا که متوقف کننده‌ها در جابجایی ۲۰ میلی‌متر عمل می‌کنند، بنابراین تسلیم میراگر ترکیبی در دامنه جابجایی در حدود ۲۲ میلی‌متر رخ می‌دهد.



شکل ۲۰: رفتار میراگر ترکیبی HD در فاز ۱.

به دلیل آنکه تحت رفتار چرخه‌ای، میراگر فولادی دچار کمناش خارج از صفحه می‌شود لذا می‌توان با سختی خارج از صفحه مناسب و کافی ظرفیت اتلاف انرژی میراگر فولادی را افزایش داد. بنابراین به منظور جلوگیری از کاهش مقاومت لینک‌ها بر اثر پدیده کمناش، از یک سری قید تسمه گونه به ضخامت ۵ میلی‌متر استفاده شد. که در دو طرف میراگر فولادی تعبیه شدند. لازم به ذکر است که قیدهای اضافه شده هیچگونه ممانعتی با حرکت داخل صفحه لینک‌ها ندارند. برای این کار مابین تسمه و شاخک‌های اضافه شده به میراگر دندانه شانه‌ای از یکسری واشر با ضخامت ۱ میلی‌متر استفاده شده تا هیچگونه ممانعتی در حرکت داخل صفحه لینک نداشته باشند.

پس از بررسی رفتار میراگر HD1 در حالت فاز ۱، افزایش دامنه جابجایی میراگر فولادی تا ۴۰ میلی‌متر انجام شد، (شکل ۲۱). اما در پایان این مرحله نشانه‌ای از افت مقاومت یا شکست مشاهده نشد لذا دوباره دامنه جابجایی میراگر فولادی را می‌توان تا ۶۰ میلی‌متر افزایش داد، شکل ۲۱ بیانگر رفتار میراگر ترکیبی فوق می‌باشد.



شکل ۲۱: رفتار میراگر HD در فاز ۲ با در نظر گرفتن حداکثر جابجایی ۶۰ میلی‌متر.

۶- نتیجه گیری

در این پژوهش به نحوه ساخت میراگر ترکیبی پیشنهادی متشکل از میراگر اصطکاکی و فولادی پرداخته شد. سپس عملکرد هر یک از اجزاء این نوع میراگر و مکانیزم رفتاری میراگر ترکیبی با مدل سازی عددی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل مکانیزم رفتاری میراگر ترکیبی را می توان به صورت زیر بیان کرد.

۱- مدل تحلیلی در نظر گرفته شده برای طراحی هندسه نوارها تسلیم یکنواخت تارهای بیرونی و عدم تمرکز تنش را در طول المان های فولادی تضمین می کند.

۲- در نوارهای فولادی احتمال وقوع کمانش ارتجاعی وجود ندارد. اما با افزایش ضریب شکل در نظر گرفته شده برای طراحی هندسه نوارها، احتمال پدیده کمانش غیر ارتجاعی افزایش می یابد. زیرا با افزایش دامنه بارگذاری در نوارهای فولادی و تغییر شکل پلاستیک نوارها، سختی نمونه به تدریج کاهش می یابد و احتمال کمانش غیر ارتجاعی نوارها در جابجایی های بالا وجود دارد.

۳- با توجه به نتایج عددی و در نظر گرفتن نقص ناشی از کمانش غیرارتجاعی برای نوارهای فولادی، مناسب ترین ضریب شکل برای میراگر فولادی ۱.۶ است. زیرا براساس پروتکل بارگذاری ASCE7-17 برای میراگرهای وابسته به جابجایی، هیچگونه افت مقاومتی تا جابجایی ۴۰ میلی متر مشاهده نشد. در حالی که برای نوارهای فولادی با ضریب شکل ۱.۸ به بالا در جابجایی ۴۰ میلی متر شروع افت مقاومت داریم. بنابراین ضریب شکل ۱.۶ می تواند چرخه های بارگذاری بیشتری را تحمل کند. همچنین این نوع هندسه نوار حداکثر اتلاف انرژی در واحد حجم خود خواهد داشت.

۴- مکانیزم طراحی بخش میراگر اصطکاکی برای میراگر ترکیبی پیشنهادی، براساس نیروی الاستیک نوارها انجام می شود. مقایسه نتایج تحلیلی با عددی برای پیش بینی خواص الاستیک نوارها نشان می دهد که روش تحلیلی پیشنهادی از دقت مناسبی برخوردار است، به طوری که میزان خطا کم تر از ۶٪ می باشد.

۵- مدل سازی عددی میراگر ترکیبی پیشنهادی نشان می دهد، اتصال سری میراگر فولادی با اصطکاکی سبب شده است که در ارتعاشات خفیف به دلیل باقی ماندن میراگر فولادی در حالت الاستیک، استهلاک انرژی ورودی توسط میراگر اصطکاکی صورت گیرد درحالی که در بارهای لرزه ای شدید دو میراگر توأم اقدام به اتلاف انرژی ورودی کنند. همچنین مکانیزم رفتاری میراگر ترکیبی نشان می دهد که دارای رفتار چرخه ای پایدار با دامنه جابجایی بیش از ۶۰ میلی متر می باشد.

مراجع

- [1] Titirla MD (2023) A state-of-the-art review of passive energy dissipation systems in steel braces. Buildings 13:851
- [2] Almajhali KYM (2023) Review on passive energy dissipation devices and techniques of installation for high rise building structures. Structures, Bd. 51 1019–1029
- [3] Gong N, Freddi F, Li P (2024) Shaking table tests and numerical analysis of RC coupled shear wall structure with hybrid replaceable coupling beams. Earthq Eng Struct Dyn 53:1742–1766
- [4] Ghandil M, Riahi HT, Behnamfar F (2023) Numerical and experimental studies on a new metallic-yielding piston damper based on pure-bending flexural yielding mechanism. Journal of Building Engineering 78:107690
- [5] Yan X, Yang Y, Guo T, Lan G, Mao H (2023) Numerical and Theoretical Analyses of Friction-Oval Section Mild Steel Rod Composite Dampers. Buildings 13:2401
- [6] Baduidana M, Wang X, Kenfack-Jiotsa A (2022) Parameters optimization of series-parallel inerter system with negative stiffness in controlling a single-degree-of-freedom system under base excitation. Journal of Vibration and Control 28:864–881

- [7] Kim D-H, Ju YK, Kim M-H, Kim S-D (2014) Wind-induced vibration control of tall buildings using hybrid buckling-restrained braces. *The Structural Design of Tall and Special Buildings* 23:549–562
- [8] Montgomery MS (2012) Fork Configuration Damper (FCDs) for Enhanced Dynamic Performance of High-rise Buildings. University of Toronto
- [9] Marshall JD, Charney FA (2012) Seismic response of steel frame structures with hybrid passive control systems. *Earthq Eng Struct Dyn* 41:715–733
- [10] Yamamoto M, Sone T (2014) Damping systems that are effective over a wide range of displacement amplitudes using metallic yielding component and viscoelastic damper in series. *Earthq Eng Struct Dyn* 43:2097–2114
- [11] Ranaei O, Aghakouchak AA (2019) A new hybrid energy dissipation system with viscoelastic and flexural yielding strips dampers for multi-level vibration control. *Archives of Civil and Mechanical Engineering* 19:584–597
- [12] Ranaei O, Aghakouchak AA (o. J.) Experimental and numerical study on developed elastomeric layers based on natural and butyl matrix rubbers for viscoelastic dampers. *Mech Time Depend Mater* 1–23
- [13] Lee C-H, Kim J, Kim D-H, Ryu J, Ju YK (2016) Numerical and experimental analysis of combined behavior of shear-type friction damper and non-uniform strip damper for multi-level seismic protection. *Eng Struct* 114:75–92
- [14] Kim J, Shin H (2017) Seismic loss assessment of a structure retrofitted with slit-friction hybrid dampers. *Eng Struct* 130:336–350
- [15] Avestaeifar P, Khezzzadeh H (2021) Experimental and numerical assessment of piston hybrid frictional metallic damper (PHFMD). *Eng Struct* 243:112669
- [16] Guo JWW, Christopoulos C (2016) Response prediction, experimental characterization and P-spectra design of frames with viscoelastic-plastic dampers. *Earthq Eng Struct Dyn* 45:1855–1874
- [17] Hedayat AA (2015) Prediction of the force displacement capacity boundary of an unbuckled steel slit damper. *J Constr Steel Res* 114:30–50
- [18] Garivani S, Aghakouchak AA, Shahbeyk S (2016) Numerical and experimental study of comb-teeth metallic yielding dampers. *International Journal of Steel Structures* 16:177–196
- [19] Khoshkalam M, Mortezagholi MH, Zahrai SM (2022) Proposed modification for ADAS damper to eliminate axial force and improve seismic performance. *Journal of earthquake engineering* 26:5130–5152
- [20] Mohammadi RK, Nasri A, Ghaffary A (2017) TADAS dampers in very large deformations. *International Journal of Steel Structures* 17:515–524
- [21] American society of Civil Engineers (2017) Minimum design loads and associated criteria for buildings and other structures
- [22] Abaqus G (2020) Abaqus 6.11. Dassault Systemes Simulia Corporation, Providence, RI, USA 3