

Numerical and analytical investigation of the effect of u-shaped aluminum dampers on the seismic performance of steel frames

Farbod Daemi¹, Mohammad Reza Habibi^{2*}, Mohammad Hadi Tavana³, Hamed Eivani⁴

1- Ph.D. Student in Civil Engineering, Department of Civil Engineering, College of Engineering, Kermanshah Branch, Islamic Azad University, Kermanshah, Iran.

2- Assistant Professor, Technical and Engineering Faculty, Department of Civil Engineering, Kermanshah Branch, Islamic Azad University, Kermanshah, Iran.

3- Assistant Professor, Technical and Engineering Faculty, Department of Civil Engineering, Kermanshah Branch, Islamic Azad University, Kermanshah, Iran.

4- Assistant Professor, Technical and Engineering Faculty, Department of Civil Engineering, Kermanshah Branch, Islamic Azad University, Kermanshah, Iran

ABSTRACT

Yielding dampers are one of the energy-dissipating systems that operate passively. Energy dissipation in these dampers occurs through plastic deformations. The design of these dampers in structures is such that they yield before the main structural members. Therefore, the use of ductile materials with a low yield point is considered a suitable option for the construction of such dampers. In this study, the performance of U-shaped aluminum dampers as an energy-dissipating system in steel moment frames is proposed. Initially, an experimental specimen and analytical equations were used to validate the numerical model. Subsequently, the effect of these dampers on the seismic performance of the steel frame was investigated. The analyses performed on the frame equipped with aluminum dampers were conducted cyclically. The aim of these analyses was to examine the influence of the damper's radius and thickness on the effective and elastic stiffness, energy dissipation, strength, and the equivalent damping ratio of the frame. The results indicated that increasing the stiffness ratio of the dampers to the frame led to an increase in the stiffness and strength of the damper-equipped frame. The maximum energy dissipation occurred in the model where the stiffness ratio of the dampers to the frame was 10. A decrease in the damper stiffness relative to the frame resulted in an increase in the equivalent damping ratio of the frame. The results also showed that the increase in the elastic stiffness of the damper-equipped frame closely matched the sum of the damper and original frame stiffness.

ARTICLE INFO

Receive Date: 16 November 2024

Revise Date: 03 January 2025

Accept Date: 05 February 2025

Keywords:

Aluminum yielding damper
Cyclic behavior
Energy dissipation
Steel moment frame
Numerical analysis

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: [10.22065/jsce.2025.489205.3571](https://doi.org/10.22065/jsce.2025.489205.3571)

*Corresponding author: Mohammad Reza Habibi.

Email address: m.r.habibi@iau.ac.ir

بررسی عددی و تحلیلی تأثیر میراگرهای U شکل آلومینیومی بر عملکرد لرزه‌ای قاب‌های فولادی

فرید دائمی^۱، محمدرضا حبیبی^{۲*}، محمدهادی توانا^۳، حامد ایوانی^۴

۱- دانشجوی دکتری، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی عمران، واحد کرمانشاه، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمانشاه، ایران.

۲- استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی عمران، واحد کرمانشاه، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمانشاه، ایران.

۳- استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی عمران، واحد کرمانشاه، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمانشاه، ایران.

۴- استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی عمران، واحد کرمانشاه، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمانشاه، ایران.

چکیده

میراگرهای تسلیمی یکی از سیستم‌های جاذب انرژی هستند که به صورت غیرفعال عمل می‌کنند. جذب انرژی در این میراگرها با تغییر شکل‌های پلاستیک انجام می‌شود. طراحی این میراگرها در سازه طوری انجام می‌شود که قبل از اعضای اصلی آن، تسلیم شوند. به این ترتیب، استفاده از مصالح شکل‌پذیر و با نقطه تسلیم پایین، گزینه مناسبی برای ساخت این نوع میراگرها محسوب می‌شود. در این مطالعه، عملکرد میراگر U شکل آلومینیومی به عنوان سیستم جاذب انرژی در قاب‌های خمشی فولادی پیشنهاد شده است. در ابتدا، برای صحت‌سنجی مدل عددی از یک نمونه آزمایشگاهی و روابط تحلیلی استفاده شده است. سپس، تأثیر آن بر عملکرد لرزه‌ای قاب فولادی مورد بررسی قرار گرفت. تحلیل‌های انجام‌شده بر روی قاب مجهز به میراگر آلومینیومی به انجام چرخه‌ای انجام گرفت. هدف از این تحلیل‌ها، بررسی تأثیر شعاع و ضخامت میراگر بر پارامترهای سختی مؤثر و الاستیک، جذب انرژی، مقاومت و نسبت میرایی معادل قاب بود. نتایج تحقیق نشان داد که افزایش نسبت سختی میراگرها به قاب، موجب افزایش سختی و مقاومت قاب مجهز به میراگر می‌شود. بیشترین جذب را مدلی از خود نشان داد که نسبت سختی میراگرها به قاب برابر ۱۰ بود. کاهش سختی میراگرها به قاب موجب افزایش نسبت میرایی معادل قاب گردید. نتایج همچنین نشان داد که افزایش سختی الاستیک قاب مجهز به میراگر با دقت قابل قبولی برابر مجموع سختی میراگرها و قاب است.

کلمات کلیدی: میراگر تسلیمی آلومینیومی، رفتار چرخه‌ای، جذب انرژی، قاب خمشی فولادی، تحلیل عددی.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	10.22065/jsce.2025.489205.3571	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	https://doi.org/10.22065/jsce.2025.489205.3571	۱۴۰۴/۰۲/۳۱	۱۴۰۳/۱۱/۱۷	۱۴۰۳/۱۱/۱۷	۱۴۰۳/۱۰/۱۴	۱۴۰۳/۰۸/۲۶
محمدرضا حبیبی m.r.habibi@iau.ac.ir					*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:	

۱- مقدمه

پارامتر	شرح
a	ارتفاع قسمت پایین ساق میراگر U شکل
b	ضخامت ورق میراگر U شکل
t	ضخامت میراگر U شکل (در راستای شعاع)
R	شعاع میراگر U شکل
E	مدول یانگ مصالح
N	تعداد میراگر U شکل موجود در مدل
K_{eU}	سختی الاستیک میراگر U شکل
F_y	نیروی تسلیم میراگر U شکل
σ_y	تنش تسلیم مصالح
α_k	نسبت سختی الاستیک مجموع میراگرها به سختی الاستیک قاب تنها
α_s	نسبت مقاومت تسلیم مجموع میراگرها به مقاومت تسلیم قاب تنها
E_{loop}	جذب انرژی یا مساحت داخلی حلقه‌های پسماند
E_s	انرژی الاستیک
F^+, F^-	حداکثر نیرو در راستای مثبت و منفی در حلقه هیستریزس
D^+, D^-	حداکثر جابجایی در راستای مثبت و منفی در حلقه هیستریزس
K_{eff}	سختی موثر
ξ	نسبت میرایی معادل
K_t	سختی الاستیک قاب مجهز به میراگر U شکل
K_{frame}	سختی الاستیک قاب تنها
F_u	حداکثر مقاومت قاب مجهز به میراگر U شکل
F_{uframe}	حداکثر مقاومت قاب تنها

زمین لرزه‌ها تهدیدی جدی برای سازه‌ها به شمار می‌آیند و می‌توانند موجب آسیب و خرابی آن‌ها شوند. با وجود پیشرفت‌های فناوری، پیش‌بینی دقیق زلزله همچنان چالش برانگیز است. به این ترتیب برای کاهش اثرات مخرب ناشی از نیروهای زلزله، سیستم‌های متعددی برای کنترل ارتعاشات سازه‌ها پیشنهاد شده‌اند [۱، ۲]. این سیستم‌ها به‌طور کلی به چهار دسته تقسیم می‌شوند: سیستم‌های غیرفعال، فعال، نیمه‌فعال و ترکیبی [۳، ۴]. در این میان، سیستم‌های کنترل غیرفعال مانند میراگرهای تسلیمی، ظرفیت بالایی برای جذب انرژی دارند و به منبع انرژی خارجی نیاز ندارند [۵]. میراگرهای تسلیمی به دلیل کارایی بالا، مقاوم در برابر تغییرات دمای محیط، قابل تعویض بودن پس از زلزله و روشی مقرون‌به‌صرفه برای کاهش نیروهای لرزه‌ای وارد بر سازه‌ها به شمار می‌روند [۶]. ظهور روش اجزا محدود تحول بزرگی در مسیر تحقیقات مرتبط با انواع میراگرها ایجاد کرده است، به‌گونه‌ای که این روش امکان مدل‌سازی دقیق و تحلیل رفتار پیچیده میراگرها را تحت شرایط مختلف بارگذاری فراهم کرده و به توسعه دانش طراحی و بهینه‌سازی این ابزارهای مؤثر در مهندسی سازه کمک شایانی نموده است [۷، ۸].

تاکنون محققان میراگرهای تسلیمی زیادی را پیشنهاد داده‌اند که هر یک دارای هندسه، مصالح و پیکربندی متفاوتی هستند. مدھسواران^۱ و همکاران (۲۰۱۷) ساختمان بتنی مسلح سه طبقه را با نصب میراگر فلزی X شکل در طبقه همکف برای ارزیابی رفتار لرزه‌ای طراحی و اجرا کرده‌اند. آزمایش‌ها در این مطالعه با استفاده از میز لرزان سه جهته انجام شد. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که استفاده از میراگر فلزی X شکل، جابجایی طبقه اول و آسیب‌پذیری ستون‌های طبقه همکف را به‌طور چشمگیری کاهش می‌دهد [۹]. آغلرا^۲ و همکاران (۲۰۱۸) میراگر فیوزی لوله‌ای را برای بهبود پاسخ لرزه‌ای سازه‌ها معرفی کرده‌اند. این میراگر از اجزای قابل تعویض لوله‌ای به‌عنوان جاذب انرژی استفاده می‌کند و در آزمایش‌ها رفتاری پایدار با ظرفیت جذب انرژی بالا و امکان تعویض آسان اجزا پس از خرابی نشان داده است [۱۰]. عبادی جامخانه و همکاران (۲۰۱۹) میراگر فلزی تسلیم‌شونده به شکل U را به‌عنوان سیستم جذب انرژی معرفی کرده‌اند که به‌عنوان فیوز جایگزین و اقتصادی در قاب‌های سازه‌ای برای بهبود شکل‌پذیری جانبی، جذب انرژی و میرایی در برابر زلزله استفاده می‌شود. آزمایش‌های چرخه‌ای برای ارزیابی عملکرد این میراگر انجام و مدل‌های عددی المان محدود برای بررسی پارامترهای هندسی میراگر ارائه شد. تحلیل‌ها نشان دادند که این میراگر با حفظ مقاومت و سختی، انرژی را در جابجایی‌های بزرگ جذب می‌کند [۱۱]. گرجی‌زندریانی و همکاران (۲۰۲۰) رفتار چرخه‌ای میراگر حلقه‌ای فولادی را از طریق روش‌های عددی و تحلیلی مورد بررسی قرار دادند. در این پژوهش به‌منظور ارزیابی شکل‌پذیری و جذب انرژی و ارائه معادله‌ای برای تخمین ظرفیت تسلیم، مطالعات پارامتریک با استفاده از روش اجزاء محدود انجام شد. تحلیل‌ها اثر پارامترهایی چون ضخامت، طول و قطر حلقه بر رفتار میراگر را شامل می‌شدند. نتایج این مطالعه نشان داد که ظرفیت تسلیم با طول و قطر حلقه فولادی و تنش تسلیم رابطه مستقیم دارد و افزایش نسبت قطر به ضخامت موجب کاهش مقاومت، شکل‌پذیری و جذب انرژی می‌شود [۱۲]. گوا^۳ و همکاران (۲۰۲۱) ترکیب میراگرهای تسلیمی برشی و خمشی را به‌عنوان سیستم جاذب انرژی پیشنهاد دادند. در مدل پیشنهادی، صفحات خمشی در دو طرف صفحه برشی قرار گرفتند تا کماتش آن کنترل شود. آزمایش‌های چرخه‌ای برای بررسی رفتار لرزه‌ای این میراگر انجام شد و مدل‌های اجزای محدود جهت بررسی رفتار پلاستیک مدل، به‌ویژه در مرحله پس از کماتش، ایجاد شد. نتایج نشان دادند که صفحه برشی حالت کماتش بالایی داشت و نوارهای کششی بین صفحات خمشی مجاور توزیع می‌شدند. نتایج این مطالعه همچنین نشان داد که استفاده از میراگر ترکیبی برشی-خمشی باعث بهبود ظرفیت جذب انرژی و افزایش شکل‌پذیری سازه می‌شود، در حالی که به دلیل قرارگیری صفحات خمشی، کماتش صفحه برشی به‌خوبی کنترل می‌شود [۱۳]. ژائو^۴ و همکاران (۲۰۲۲) در یک مطالعه آزمایشگاهی و عددی به بررسی میراگرهای پانل برشی پرداخته‌اند که به‌طور گسترده‌ای می‌توان برای افزایش سختی، مقاومت و همچنین اتلاف انرژی ورودی در بارگذاری لرزه‌ای استفاده شوند. در این تحقیق میراگرهای پانل برشی با استفاده از فولاد با نقطه تسلیم پایین مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. دوازده نمونه تحت بارگذاری چرخه‌ای طراحی و آزمایش شدند تا تأثیر ضخامت جان، مهار کماتش خارج از صفحه و تأثیر ابعاد این لینک‌های برشی بر رفتار چرخه‌ای آن‌ها بررسی شود. در نهایت، مدل‌های اجزای محدود برای شبیه‌سازی رفتار چرخه‌ای این میراگرهای برشی و تحلیل پارامترهای مؤثر بر خواص مکانیکی آن‌ها ایجاد شد [۱۴]. قائدی و همکاران (۲۰۲۳) در یک مطالعه عددی و آزمایشگاهی به بررسی میراگر میله‌ای پرداخته‌اند که بهبود عملکرد چرخه‌ای قاب‌های نیمه‌صلب را امکان‌پذیر می‌سازد. برای ارزیابی کارایی میراگر میله‌ای، یک تحلیل اولیه بار افزون بر روی یک قاب نیمه‌صلب با این میراگر انجام و با قاب‌های صلب و نیمه‌صلب بدون میراگر مقایسه شد. در ادامه تأثیر این میراگر بر روی قاب‌های نیمه‌صلب مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج این تحقیق نشان داد که استفاده از میراگر میله‌ای موجب بهبود قابل توجه مقاومت، سختی، نسبت میرایی معادل و ظرفیت اتلاف انرژی در قاب‌های نیمه‌صلب می‌شود [۱۵]. آغنی و همکاران (۲۰۲۴) در یک تحقیق عددی و تحلیلی به بررسی اثر میراگر آلومینیومی با هندسه تاداس^۵ بر روی قاب فولادی پرداختند. مطالعات پارامتریک برای بررسی تأثیر تعداد میراگرها تاداس و نیروی محوری ستون بر سختی، مقاومت نهایی، شکل‌پذیری و ظرفیت اتلاف انرژی قاب انجام شد. نتایج نشان داد که افزودن میراگر موجب افزایش سختی، اتلاف انرژی و استحکام نهایی قاب شده و اثر منفی نیروی محوری ستون را بر اتلاف انرژی کاهش می‌دهد [۱۶]. هندسه‌های متفاوتی دیگر همچون

¹ Madheswaran

² Aghlra

³ Guo

⁴ Zhao

⁵ TADAS (Triangular added damping and stiffness)

D شکل [۱۷]، S شکل [۱۸، ۱۹]، U شکل زاویه دار [۲۰-۲۲]، T شکل [۲۳]، I شکل [۲۴] و Y شکل [۲۵] برای میراگرهای تسلیمی توسط محققان پیشنهاد شده است. در این مطالعات مهم‌ترین پارامترهای لرزه‌ای میراگر همچون، سختی الاستیک و موثر، جذب انرژی، مقاومت و نسبت میرایی معادل آن بررسی شده است. میراگرهای U شکل به دلیل ویژگی هندسی آن قابلیت تغییر شکل‌های زیاد و همچنین در چند جهت را دارد. به همین منظور می‌تواند در بخش‌های متفاوتی از سازه قرار گیرد. این میراگرها به دلیل رفتار غیرارتجاعی مناسب، مورد توجه زیادی از محققان بوده است [۲۶-۲۸]. این میراگرها همچنین به عنوان سیستم‌های جداگر لرزه‌ای نیز پیشنهاد گردیده‌اند [۲۹-۳۱]. شبیه‌سازی بسیاری از میراگرهای تسلیمی با استفاده از روش اجزا محدود انجام شده است، زیرا این روش با دقت بالایی قابلیت مدل‌سازی رفتار غیرخطی و پیچیده این ابزارها را تحت شرایط مختلف بارگذاری دارد و به‌عنوان ابزاری کارآمد در تحلیل و طراحی میراگرها شناخته می‌شود [۳۲-۳۵].

میراگر تسلیمی باید طوری طراحی شود که پیش از اعضای اصلی سازه تسلیم شود. به طوری که استفاده از مصالح با حد تسلیم پایین و شکل‌پذیری بالا گزینه‌ای مناسب برای ساخت این میراگرها محسوب می‌شود. در مطالعات گذشته، مصالحی همچون آلومینیوم [۱۶]، ۳۶، ۳۷ و فولاد حد تسلیم پایین [۳۸-۴۲] برای ساخت میراگرها پیشنهاد شده‌اند.

یکی از محدودیت‌های استفاده از میراگر تسلیمی آلومینیومی به عنوان سیستم جاذب انرژی، اتصال آن به قاب سازه است. میراگر U شکل آلومینیومی پیشنهادی در این مطالعه، با استفاده از پیچ، قابلیت نصب به سازه را دارد که در مطالعات گذشته کمتر به آن پرداخته شده است. این میراگرها پس از زلزله به راحتی قابل تعویض هستند. از آنجا که تاکنون رفتار لرزه‌ای قاب‌های فولادی مجهز به میراگر U شکل آلومینیومی مورد بررسی قرار نگرفته است، مطالعه حاضر به این موضوع به صورت عددی پرداخت. تحلیل‌های عددی در مطالعه حاضر به صورت چرخه‌ای انجام گرفت. در ابتدا، مدل عددی با استفاده از نمونه آزمایشگاهی و معادلات تحلیلی صحت‌سنجی شد. سپس، تأثیر ابعاد آن بر پارامترهای لرزه‌ای مانند سختی الاستیک و موثر، جذب انرژی، مقاومت و نسبت میرایی معادل قاب ارزیابی گردید. همچنین، معادلاتی برای محاسبه سختی الاستیک و مقاومت حداکثر قاب مجهز به میراگر آلومینیومی ارائه شد که می‌تواند در طراحی این نوع سازه‌ها مورد استفاده قرار گیرد.

۲- صحت‌سنجی مدل عددی

در این بخش صحت‌سنجی مدل‌های اجزای محدودی میراگر U شکل و قاب فولادی تشریح شده است. تحلیل‌های غیرخطی در این تحقیق با روش اجزای محدود انجام گرفت و مدل‌ها با نرم‌افزار المان محدود آباکوس^۶ مورد بررسی قرار گرفتند [۴۳].

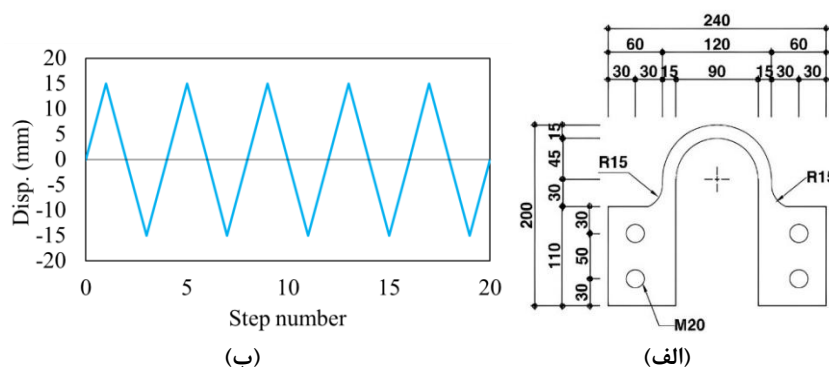
۲-۱ صحت‌سنجی و تحلیل میراگر U شکل

برای صحت‌سنجی میراگر آلومینیومی ابتدا میراگر U شکل آزمایشگاهی که از فولاد ساخته شده بود صحت‌سنجی شد. سپس برای این میراگرها مصالح آلومینیومی تعریف گردید و نتایج آن با روابط تحلیلی مقایسه شد. در مطالعات آزمایشگاهی سانگ وو کیم^۷ و کیل هی کیم^۸ [۴۴] ۴ عدد میراگر U شکل با ابعاد شکل ۱-الف آزمایش شده است. این ۴ میراگر تحت بارگذاری چرخه‌ای بر اساس الگوی بارگذاری شکل ۱-ب قرار گرفت. طبق گزارش آزمایشگاهی، هیچ‌گونه لغزشی در بین قطعات مدل ایجاد نشده و تسلیم‌شدگی در بخش خمیده میراگر متمرکز شده بود. مصالح فولادی به کار رفته در این میراگر U شکل دارای تنش تسلیم و نهایی به ترتیب ۲۴۵ و ۴۲۰ مگاپاسکال بود.

⁶ ABAQUS

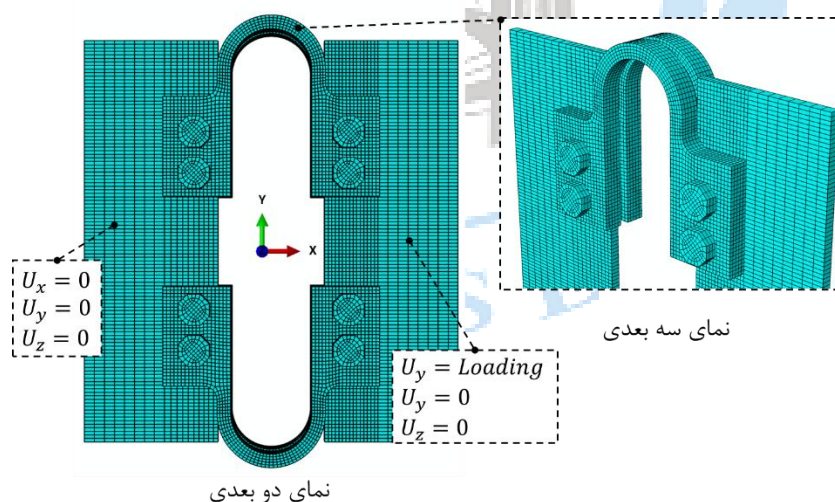
⁷ Sang-Woo Kim

⁸ Kil-Hee Kim



شکل ۱: (الف) ابعاد میراگرهای U شکل [۴۴] (واحد میلیمتر) (ب) الگوی بارگذاری

مدل آزمایشگاهی شامل میراگرهای U شکل، پیچ و صفحات اتصال بود. برای مدل‌سازی این سه عضو در مدل عددی از المان حجمی^۹ استفاده شد. این المان‌ها دارای ۸ گره هستند که هر یک ۳ درجه آزادی انتقالی دارند. ضریب اصطکاک بین ورق‌ها و میراگر برابر ۰/۲۵ در نظر گرفته شد. به طوری که تا انتهای بارگذاری اطمینان حاصل شد که لغزشی بین اجزای آن رخ نمی‌دهد. تحلیل مدل به صورت استاتیکی غیرخطی و با رویکرد کنترل-جابجایی^{۱۰} انجام گرفت. در مدل عددی تغییر شکل‌های بزرگ و رفتار غیرخطی مصالح لحاظ شد. یک مدل ترکیبی چرخه‌ای، شامل سخت‌شوندگی سینماتیکی^{۱۱} و همسانگرد^{۱۲}، بر پایه‌ی معیار فون میزس^{۱۳}، برای شبیه‌سازی رفتار چرخه‌ای میراگر استفاده گردید. برای محاسبه ابعاد مش بهینه، ۶ تحلیل عددی انجام شد و تاثیر ابعاد مش‌بندی بر روی نتایج سختی الاستیک و جذب انرژی محاسبه شد. نتایج این آنالیز حساسیت در جدول ۱ ارائه شده است. نتایج نشان داد ابعاد مش‌بندی ۴ میلی‌متر بهینه‌ترین ابعاد برای این مدل می‌باشد. شکل ۲ مدل مش‌بندی شده و شرایط مرزی آن را نشان می‌دهد.



شکل ۲: شرایط مرزی مدل عددی میراگر U شکل

⁹ Solid

¹⁰ Displacement-Control

¹¹ Kinematic

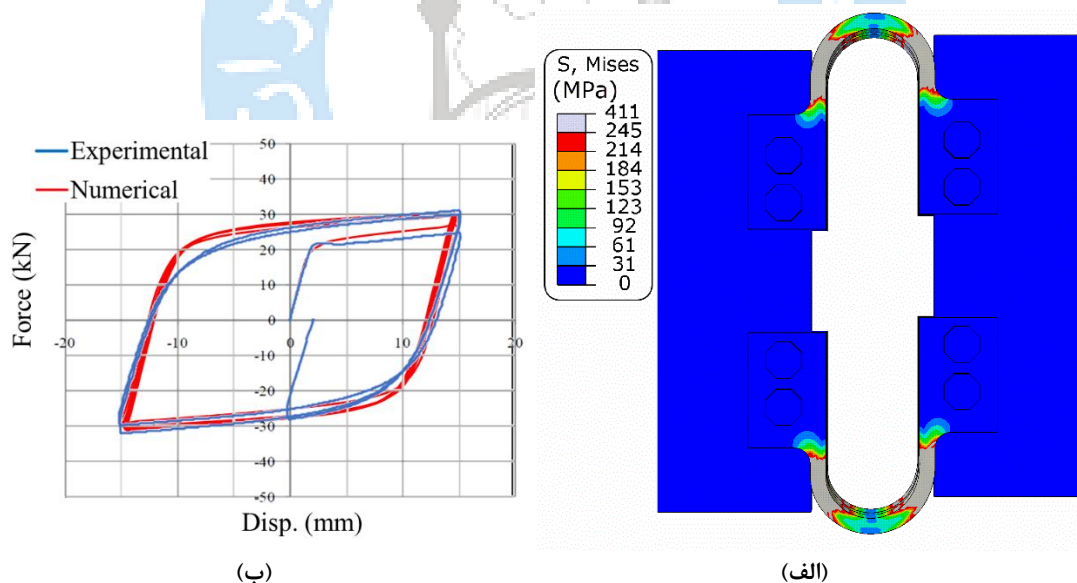
¹² Isotropic

¹³ Von Mises

جدول ۱: نتایج آنالیز حساسیت مش بندی

شماره مدل	ابعاد مش بندی (میلیمتر)	درصد خطای نتایج نسبت به مدل شماره ۴	
		جذب انرژی	سختی الاستیک
۱	۱۰	۱۵/۲	۱۱/۵
۲	۷/۵	۷/۳	۸/۸
۳	۵	۴/۲	۲/۱
۴	۴	۰	۰
۵	۲	۰/۰۴	۰/۱
۶	۱	۰/۰۵	۰/۱

پس از تحلیل مدل عددی، توزیع تنش فون میزس آن به صورت شکل ۳-الف حاصل شد. این حالت تنش مربوط به جابجایی حداکثر (۱۵ میلیمتر) است. مشاهده می شود که حداکثر تنش های ایجاد شده در این مدل در نزدیکی اتصال نواحی خمیده حاصل شده است. این نواحی حداکثر لنگر خمشی را تجربه می کنند [۴۵]. نتایج هیستریزس مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی در شکل ۳-ب نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود نتایج مدل عددی تا حد قابل قبولی با نتایج آزمایشگاه مطابقت دارد. برای مقایسه دقیق تر نتایج عددی و آزمایشگاهی، جدول ۲ ارائه شد. در این جدول نتایج سختی الاستیک (شیب اولیه نمودار)، مقاومت تسلیم و مساحت داخلی اولین حلقه هیستریزس ارائه شده است. مشاهده می شود که حداکثر اختلاف بین نتایج ۳/۱ درصد حاصل شده است که نشان دهنده مطابقت قابل قبول آن است.



شکل ۳: (الف) توزیع تنش فون میزس (ب) مقایسه نتایج هیستریزس مدل عددی و آزمایشگاهی

جدول ۲: مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی (واحد: kN, mm)

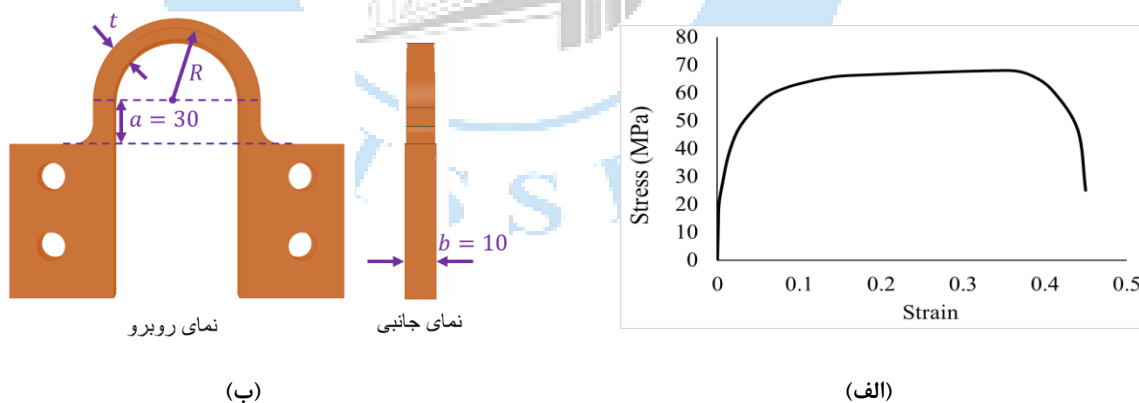
نتایج	مدل عددی	نتایج آزمایشگاهی [۴۴]	خطا (%)
سختی الاستیک	۱۱/۹۵	۱۱/۸	۱/۳
مقاومت تسلیم	۲۱/۲	۲۱/۷	۲/۳
جذب انرژی در سیکل اول بارگذاری	۱۲۹۱	۱۲۵۲	۳/۱

پس از صحت‌سنجی میراگر U شکل فولادی، مصالح آلومینیومی بر اساس مطالعات ماتیس^{۱۴} و همکاران [۴۶] برای میراگر U شکل تعریف شد که نمودار تنش-کرنش آن در شکل ۴-الف ارائه شده است. برای این مصالح آلومینیومی، مدول یانگ، تنش تسلیم و تنش نهایی به ترتیب ۲۱/۳، ۷۰۰۰ و ۸۰ مگاپاسکال گزارش شده است.

در مطالعات چرایی و همکاران [۴۵] برای محاسبه سختی الاستیک و مقاومت تسلیم میراگر U شکل معادلات ۱ و ۲ پیشنهاد شده است. در این معادلات E، N، σ_y و به ترتیب معرف تعداد میراگر U شکل در مدل، مدول یانگ و تنش تسلیم مصالح است. بقیه پارامترها نیز در شکل ۴-ب تعریف شده است.

$$K_{e_u} = N \frac{E \times b \times t^3}{6R^2 \times (\pi \times R + 4a)} \quad (۱)$$

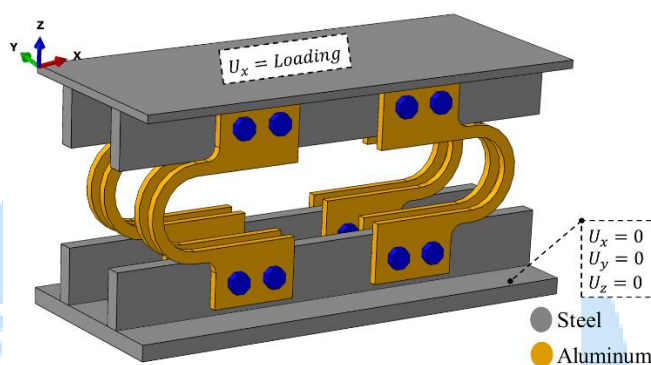
$$F_y = N \frac{b \times t^2}{4R} \sigma_y \quad (۲)$$



شکل ۴: الف) نمودار تنش کرنش آلومینیوم [۴۶] (ب) ابعاد و متغیرهای میراگر آلومینیومی (واحد میلیمتر)

در این بخش میراگرهای U شکل آلومینیومی، مطابق شکل ۵ به صورت بار-افزون تحلیل شد. هدف از این تحلیل‌ها مقایسه سختی الاستیک و استحکام تسلیم حاصل از مدل عددی و نتایج معادلات ۱ و ۲ است. همان‌طور که مشاهده می‌شود تعداد میراگرها ۸ عدد می‌باشد، به طوری که برای تمامی مدل‌ها ثابت در نظر گرفته شد. در شکل ۵، شرایط مرزی مدل نیز نشان داده شده است. تمامی فرض‌های در نظر گرفته شده در این بخش مشابه صحت‌سنجی میراگر U شکل است، با این تفاوت که تعداد آن‌ها ۸ عدد بوده و مصالح آن

مطابق شکل ۴-الف تعریف گردید. تمامی مدل‌های مورد بررسی در این بخش در جدول ۳ تعریف شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، متغیرهای میراگرها شامل شعاع و ضخامت آن هستند. لازم به ذکر است که شعاع و ضخامت میراگرها به‌گونه‌ای در نظر گرفته شد که سختی الاستیک آن نسبتی از سختی الاستیک قاب فولادی باشد، که در ادامه تشریح شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود ابعاد میراگرها طوری طراحی شده است که سختی آن از ۱/۴۸ تا ۱۷/۶۶ کیلونیوتن بر میلی‌متر متغیر باشد. این مقادیر به ترتیب ۱ تا ۱۸ برابر سختی الاستیک قاب فولادی است که در ادامه تشریح شده است. لازم به ذکر است که ابعاد دیگر میراگر مانند a و b طبق شکل ۴-ب در نظر گرفته شده است. قطر بولت‌ها نیز برای تمامی مدل‌ها ثابت فرض گردید. مدل با پیکربندی شکل ۵ اگر در سازه قرار داده شود، بیشترین تغییرشکل‌های که تجربه می‌کند در راستای x است. اگر تغییرشکل‌های ناچیز در جهت z و در راستای منفی به آن اعمال شود، این دمپرها تغییرشکل کمانشی را تجربه نمی‌کند و عمده آن به صورت تغییرشکل خمشی است. بدین معنی که در یک راستا موجب کاهش شعاع آن می‌شود که رفتار خمشی است.

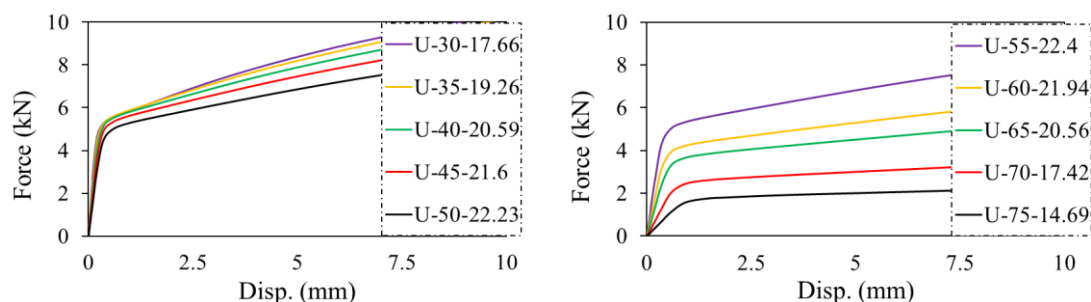


شکل ۵: مشخصات و شرایط مرزی مدل عددی

پس از تحلیل مدل‌های جدول ۳، نتایج آن‌ها به صورت شکل ۶ استخراج شد. این نمودارها، نتایج نیرو-جابجایی مدل‌ها را نشان می‌دهند که با اعمال جابجایی جانبی یک‌جهته حاصل می‌شوند. در اینگونه تحلیل‌ها جابجایی باید تا جایی ادامه یابد که مدل وارد فاز غیرخطی شود. هدف از استخراج این نمودارها، محاسبه سختی و مقاومت تسلیم مدل است. به این ترتیب پس از محاسبه سختی الاستیک و مقاومت تسلیم، نتایج در جدول ۳ ارائه شد. در این جدول نتایج معادلات ۱ و ۲ نیز نشان داده شده است که مشاهده می‌شود مطابقت قابل قبولی با نتایج عددی دارد.

جدول ۳: مشخصات مدل‌ها و نتایج سختی الاستیک و مقاومت تسلیم (واحد: kN, mm)

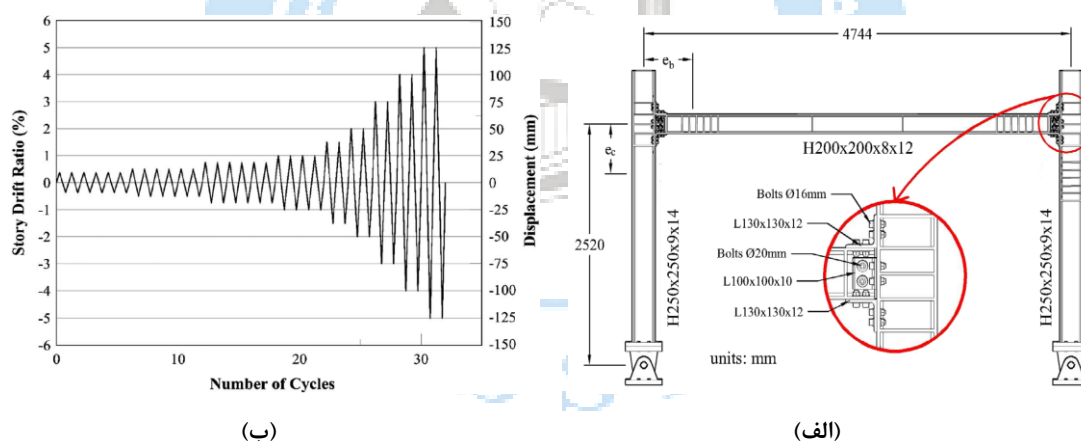
نام مدل	ابعاد میراگر		نتایج معادلات تحلیلی ۱ و ۲		نتایج مدل عددی تحقیق حاضر		مقدار خطا (%)
	R	t	سختی الاستیک	مقاومت تسلیم	سختی الاستیک	مقاومت تسلیم	
U-75-14.69	۷۵	۱۴/۶۹	۱/۴۸	۱/۳۳	۱/۴۹	۱/۳۵	۰/۶۷
U-70-17.42	۷۰	۱۷/۴۲	۲/۹۶	۲	۲/۹۴	۲/۰۴	۰/۶۸
U-65-20.56	۶۵	۲۰/۵۶	۵/۹۲	۳	۵/۷۸	۳/۰۳	۲/۴۲
U-60-21.94	۶۰	۲۱/۹۴	۸/۸۸	۳/۷۱	۸/۶۳	۳/۷۳	۲/۹
U-55-22.4	۵۵	۲۲/۴	۱۱/۸۴	۴/۳۱	۱۱/۴۸	۴/۲۴	۳/۱۴
U-50-22.23	۵۰	۲۲/۲۳	۱۴/۸	۴/۵۷	۱۴/۳۵	۴/۴۸	۳/۱۴
U-45-21.6	۴۵	۲۱/۶	۱۷/۷۶	۴/۷۹	۱۷/۲۶	۴/۸	۲/۹
U-40-20.59	۴۰	۲۰/۵۹	۲۰/۷۲	۴/۹	۲۰/۲۱	۴/۹۲	۲/۵۲
U-35-19.26	۳۵	۱۹/۲۶	۲۳/۶۸	۴/۹	۲۳/۲۴	۴/۹۶	۱/۸۹
U-30-17.66	۳۰	۱۷/۶۶	۲۶/۶۴	۴/۸	۲۶/۴۳	۴/۹	۰/۷۹



شکل ۶: نتایج نیرو-جابجایی مدل‌های جدول ۳

۲-۲ صحت‌سنجی قاب فولادی

در این بخش به صحت‌سنجی قاب فولادی پرداخته شده است. به همین منظور از قاب فولادی آزمایشگاهی سو^{۱۵} و حلیم^{۱۶} [۴۷] که در شکل ۷-الف ابعاد آن تعریف شده است استفاده گردید. این قاب در ابعاد واقعی ساخته شده است. اتصال پای ستون‌ها به صورت مفصلی بوده و قابلیت دوران دارد. برای جلوگیری از جابجایی خارج از صفحه این قاب، از یک قاب فولادی قوی‌تر در آزمایشگاه استفاده شده است. تنش تسلیم و تنش نهایی فولاد به کاررفته برای تیر و ستون، به ترتیب ۳۰۰ و ۴۰۰ مگاپاسکال است. بارگذاری جانبی قاب طبق الگوی شکل ۷-ب و به صورت جانبی انجام گرفته است.



شکل ۷: (الف) ابعاد و مشخصات قاب آزمایشگاهی (واحد: میلیمتر) (ب) الگوی بارگذاری جانبی [۴۷]

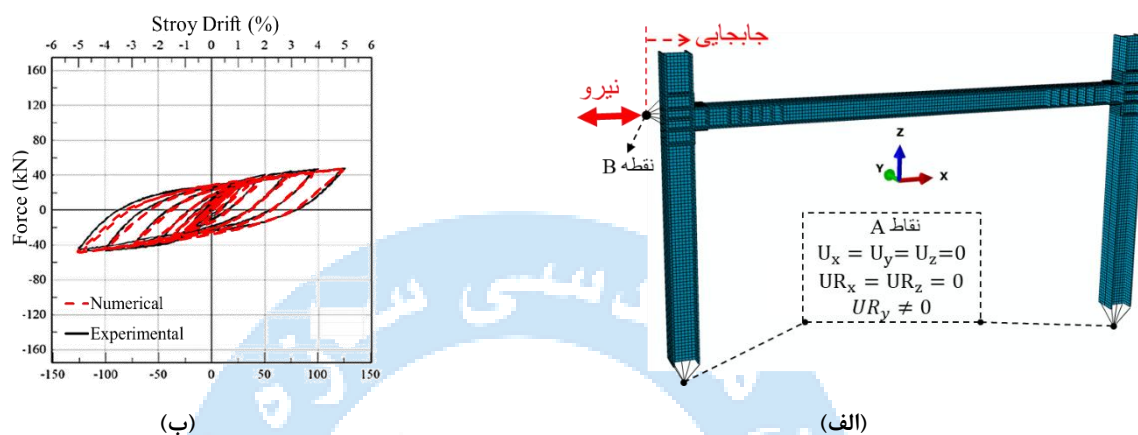
مدل‌سازی عددی تمامی اعضای قاب با المان حجمی انجام شد. طبق تحلیل حساسیت، ابعاد مش‌بندی تیر و ستون برابر با ۳۰ میلی‌متر و برای نبشی‌ها برابر ۱۰ میلی‌متر در نظر گرفته شد. از آنجا که در نمونه آزمایشگاهی گسیختگی در پیچ‌ها مشاهده نشد، مدل‌سازی پیچ‌ها حذف و تنها موقعیت آن‌ها با قید "Tie" تعریف شد. قید Tie در آباکوس یک اتصال صلب میان سطوح ایجاد می‌کند که از حرکت نسبی آن‌ها جلوگیری می‌کند. مدل مش‌بندی شده و شرایط مرزی آن در شکل ۸-الف نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده

15 Hsu

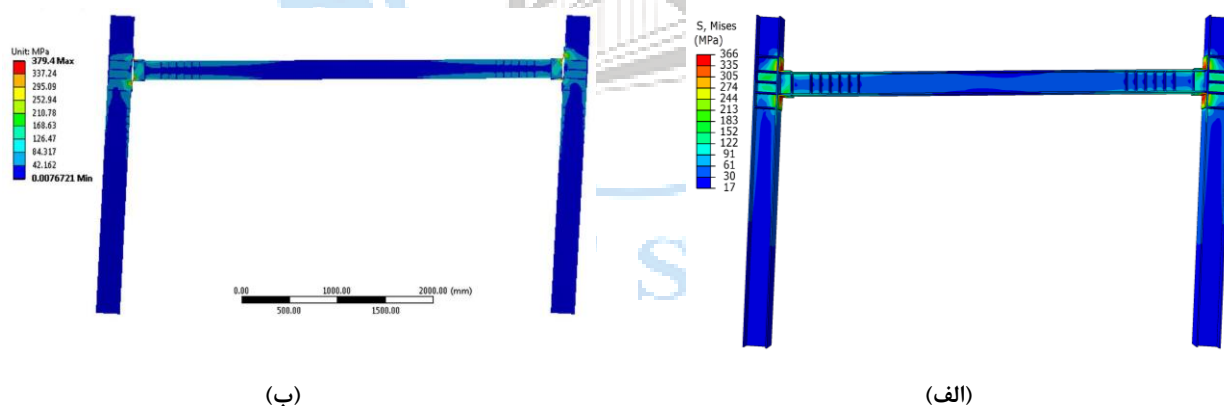
16 Halim

می‌شود، برای شبیه‌سازی اتصال مفصلی در پای ستون، از نقاط وابسته A^{17} استفاده شد. همچنین نیروی جانبی قاب به صورت چرخه‌ای به نقطه وابسته B اعمال شد تا تمرکز نیروی موضعی کاهش یابد. پس از تحلیل مدل عددی، منحنی هیستریزس آن با نتایج آزمایشگاهی در شکل ۸-ب مقایسه گردید. نتایج نشان‌دهنده دقت قابل قبول نتایج عددی است.

همچنین برای ارزیابی دقیق‌تر مدل عددی این تحقیق، نتایج توزیع تنش فون میزس در جابجایی ۱۲۵ میلی‌متر با نتایج عددی به‌دست‌آمده از مطالعه سو و حلیم [۴۷] مقایسه شد. مشاهده می‌شود که در هر دو مدل، بیشترین تنش در ناحیه اتصال ایجاد گردیده است. همچنین، از نظر حداکثر تنش ایجاد شده، تطابق خوبی بین نتایج هر دو مدل وجود دارد.



شکل ۸: (الف) شرایط مرزی و جزئیات مدل عددی (ب) مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی



شکل ۹: نتایج توزیع تنش در مدل عددی (الف) تحقیق حاضر و (ب) سو و حلیم [۴۷]

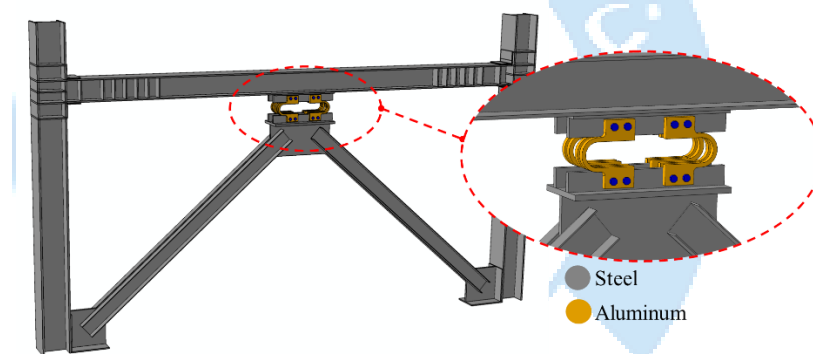
۳- مطالعات پارامتریک

در این بخش، مطالعات پارامتریک به‌منظور بررسی تأثیر میراگر تسلیمی آلومینیومی بر عملکرد لرزه‌ای قاب فولادی انجام گرفت. قاب مورد بررسی در این بخش برابر همان مدل صحت‌سنجی بود که مطابق شکل ۱۰ به ۸ عدد میراگر U شکل آلومینیومی مجهز شده

است. این میراگرها در جایی تعبیه شده‌اند که در هنگام دریافت قاب، حداکثر تغییرشکل را تجربه می‌کنند. به همین منظور از یک مهاربند شورون برای اتصال آن به قاب استفاده شده است. در این مدل، مهاربندها باید به گونه‌ای طراحی شوند که در طول بارگذاری دچار کمناش نشوند. به طوری که طراحی آن‌ها باید بر اساس نیرویی معادل حداکثر مقاومت میراگرها انجام شود.

در این مدل، با ایجاد تغییرشکل جانبی قاب میراگرها فعال می‌شوند، به طوری که جابجایی جانبی قاب و میراگرها یکسان است. به این ترتیب عملکرد آن‌ها را می‌توان به صورت فنرهای موازی در نظر گرفت (با صرف نظر از تغییر طول ناچیز مهاربندها). در قانون فنرهای موازی، نیرو بین اجزای سیستم به تناسب سختی آن‌ها تقسیم می‌شود و سختی کل سیستم برابر با مجموع سختی اجزای آن است. بنابراین، نسبت سختی و مقاومت تسلیم میراگرها به قاب از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. طبق قانون فنرهای موازی، افزایش نسبت سختی میراگرها به قاب موجب افزایش سهم نیروی جانبی میراگرها می‌شود و این پارامتر تأثیر قابل توجهی بر رفتار سازه دارد. همچنین، نسبت مقاومت تسلیم میراگرها به قاب نیز از پارامترهای مهم مدل به شمار می‌آید.

هدف از تحلیل‌های این بخش، بررسی تأثیر نسبت سختی میراگرها به قاب فولادی تنها، بر پارامترهای لرزه‌ای آن است. به همین ترتیب، تمامی مدل‌های پارامتریک در جدول ۴ معرفی شده‌اند. در این جدول، مشاهده می‌شود که مدل‌ها بر اساس نسبت سختی الاستیک و مقاومت تسلیم میراگرها به قاب تنها نام‌گذاری شده‌اند. سختی الاستیک و مقاومت تسلیم قاب تنها طبق گزارش آزمایشگاه به ترتیب برابر ۱/۴۸ کیلونیوتن بر متر و ۲۵ کیلونیوتن است [۴۷].



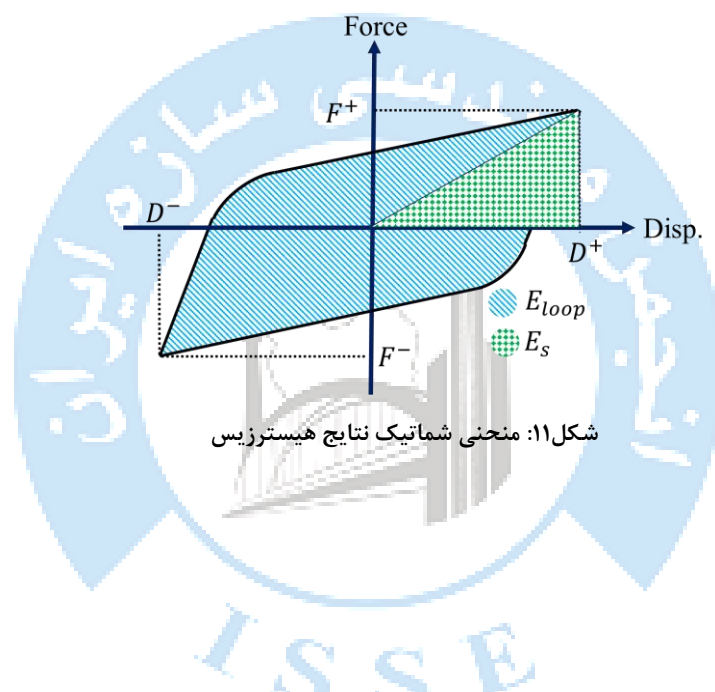
شکل ۱۰: مشخصات قاب مجهز به میراگر آلومینیومی

جدول ۴: مشخصات قاب‌های مجهز به میراگر

نام مدل	ابعاد میراگر (میلیمتر)		نسبت سختی میراگر به قاب (α_k)	نسبت مقاومت تسلیم میراگر به قاب (α_s)
	R	t		
F-1-0.05	۷۵	۱۴/۶۹	۱	۰/۰۵
F-2-0.08	۷۰	۱۷/۴۲	۲	۰/۰۸
F-4-0.12	۶۵	۲۰/۵۶	۴	۰/۱۲
F-6-0.15	۶۰	۲۱/۹۴	۶	۰/۱۵
F-8-0.17	۵۵	۲۲/۴	۸	۰/۱۷
F-10-0.18	۵۰	۲۲/۲۳	۱۰	۰/۱۸
F-12-0.19	۴۵	۲۱/۶	۱۲	۰/۱۹
F-14-0.2	۴۰	۲۰/۵۹	۱۴	۰/۲
F-16-0.2	۳۵	۱۹/۲۶	۱۶	۰/۲
F-18-0.19	۳۰	۱۷/۶۶	۱۸	۰/۱۹

در جدول ۴ مشاهده می‌شود که ابعاد میراگر طوری طراحی شد که سختی آن نسبت به قاب از ۱ تا ۱۸ متغیر باشد. بدین معنی که دمپرها موجود در مدل از ضعیف به قوی در نظر گرفته شده‌اند. دمپر ضعیف دارای تاثیر کم و دمپر قوی تاثیر قابل توجهی بر روی مدل دارد. اگر نسبت سختی میراگر به قاب کم باشد، سهم آن از نیروی جانبی کم و با افزایش این نسبت، سهم نیروی دمپرها افزایش می‌یابد.

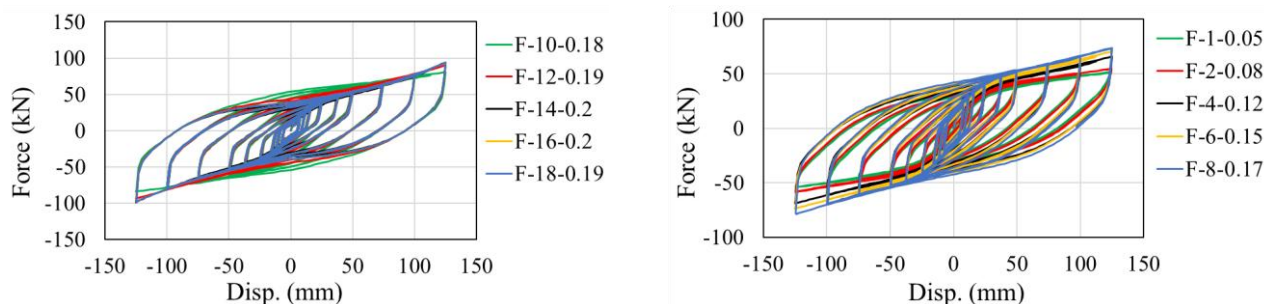
پس از اعمال الگوی بارگذاری به صورت شکل ۷-ب، نمودارهای هیستریزس استخراج گردید. اگر مدل تحت یک سیکل بارگذاری رفت و برگشتی قرار گیرد، این نمودار که یک حلقه هیستریزس است به صورت شکل ۱۱ به دست می‌آید. این حلقه نشان‌دهنده رفتار چرخه‌ای سیستم و ظرفیت آن در اتلاف انرژی به دلیل رفتار غیرالاستیک است. ناحیه داخل حلقه بیانگر انرژی اتلاف شده (E_{loop}) در هر سیکل بارگذاری است و رفتار غیرخطی و وابسته به تاریخچه بارگذاری سیستم را توصیف می‌کند. در این شکل همچنین حداکثر نیرو و جابجایی در دو راستای مثبت و منفی نشان داده شده است. سختی مؤثر و نسبت میرایی معادل بر اساس معادلات ۳ و ۴ تعریف می‌شوند [۴۸].



$$K_{eff} = \frac{F^+ + |F^-|}{D^+ + |D^-|} \quad (3)$$

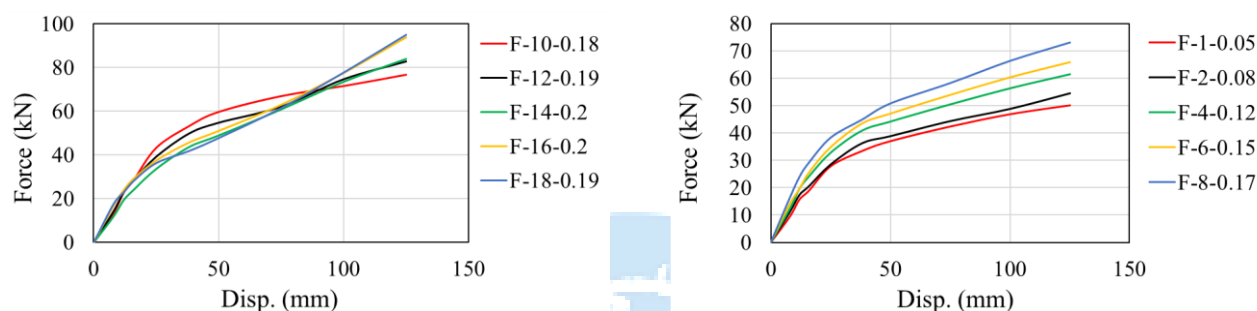
$$\xi = \frac{E_{loop}}{4\pi E_s} \quad (4)$$

پس از تحلیل مدل‌های معرفی شده در جدول ۴، نمودارهای هیستریزس آن‌ها به صورت شکل ۱۲ محاسبه شد. همان‌طور که مشاهده می‌شود این نتایج بر روی دو شکل ارائه شده‌اند. برای مقایسه دقیق‌تر این نتایج، پارامترهای لرزه‌ای این نمودارها استخراج گردید که در ادامه تشریح شده است.



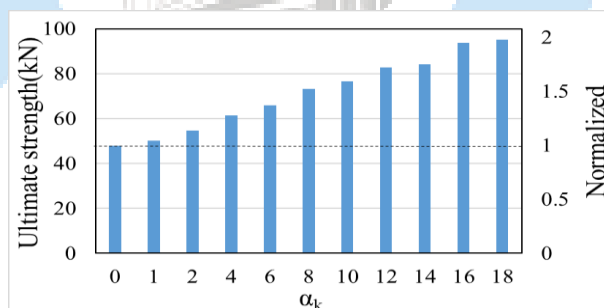
شکل ۱۲: نتایج هیستریزس مدل‌های معرفی شده در جدول ۴

نمودار بک بون^{۱۸} مدل‌ها به صورت شکل ۱۳ محاسبه شد. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش نسبت سختی الاستیک میراگر به قاب از ۱ تا ۱۰ به صورت منظم، ظرفیت مدل افزایش پیدا کرده است. با افزایش این نسبت از ۱۲ تا ۱۸ رفتار مدل‌ها متفاوت بوده است. به طوری مثال، مدل F-10-0.18 در جابجایی‌های کم، مقاومت بیشتری نسبت به مدل‌های با سختی بالاتر داشته است. افزایش سختی میراگرها (بیش از مدل F-10-0.18) باعث می‌شود که میراگرها سهم قابل توجهی از نیروی جانبی را داشته باشند. این سهم نیروی جانبی، موجب تسلیم زود هنگام آنها می‌شود. به این ترتیب مدل F-10-0.18، در جابجایی‌های کم، مقاومت بیشتری داشته است.



شکل ۱۳: نتایج مقاومت قاب مجهز به میراگر نسبت به جابجایی آن

برای ارزیابی دقیق‌تر تأثیر نسبت سختی میراگرها به قاب^{۱۹} بر مقاومت حداکثر آن، شکل ۱۴ ارائه شده است. محور عمودی سمت راست این نمودار، نتایج نرمال شده به قاب تنها را نشان می‌دهد. همچنین، در این شکل، نتایج قاب تنها در نسبت سختی میراگرها به قاب برابر صفر ارائه شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش سختی میراگرها در قاب، مقاومت آن تقریباً به صورت خطی افزایش می‌یابد. در بیشترین حالت، اضافه شدن میراگرها موجب افزایش دو برابری مقاومت قاب گردیده است.



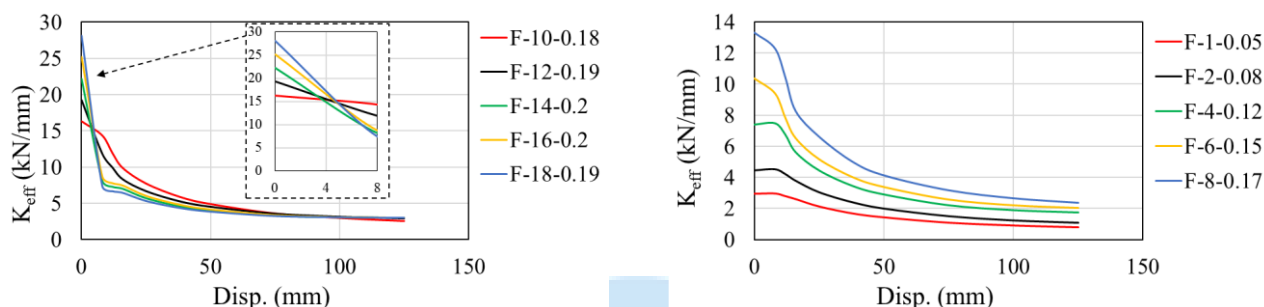
شکل ۱۴: نتایج مقاومت حداکثر نسبت به α_k

نتایج سختی مؤثر مدل‌ها در این بخش بررسی شده است. این پارامتر بر اساس معادله ۳ محاسبه می‌شود که در سیکل‌های مختلف بارگذاری مقدار آن متفاوت است. شکل ۱۵ تغییرات این پارامتر را نسبت به جابجایی قاب نشان می‌دهد. در این شکل‌ها، سختی در جابجایی صفر برابر با سختی الاستیک می‌باشد. می‌توان مشاهده کرد که با افزایش جابجایی قاب در تمامی مدل‌ها، سختی کاهش قابل توجهی داشته است. با افزایش نسبت سختی میراگر به قاب، شیب کاهش نتایج سختی قابل توجه‌تر بوده است. به‌طور مثال، در مدل F-1-

¹⁸ BackBone

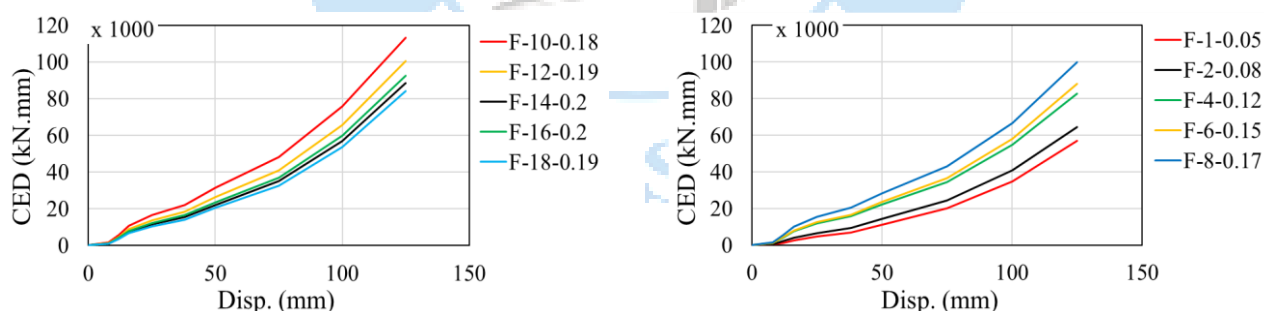
¹⁹ α_k

0.05، افزایش جابجایی قاب موجب شد که سختی آن در نهایت به ۲۶٪ سختی الاستیک کاهش یابد. در مدل F-8-0.17، افزایش جابجایی موجب شد سختی آن به ۱۶٪ کاهش پیدا کند. در مدل‌های با نسبت سختی میراگرها به قاب بیشتر از ۱۲، بیشترین کاهش سختی در جابجایی‌های کم حاصل گردیده است. در میراگرهای U شکل، افزایش سختی الاستیک موجب کاهش جابجایی تسلیم آن می‌شود. بنابراین در مدل‌هایی که سختی میراگر زیاد است، تاثیر آن غالب می‌شود. به این ترتیب، با تسلیم شدن میراگر، افت سختی قابل توجهی در مدل ایجاد می‌شود.



شکل ۱۵: نتایج سختی موثر نسبت به جابجایی قاب

نتایج اتلاف انرژی تجمعی^{۲۰} در شکل ۱۶ ارائه شده است. این نتایج برابر مجموع مساحت داخلی حلقه‌های هیستریزس می‌شود که یکی از پارامترهای مهم لرزه‌ای به شمار می‌آید. مشاهده می‌شود که افزایش نسبت سختی میراگرها به قاب از ۱ تا ۱۰ موجب افزایش جذب انرژی شده است. به طوری که حداکثر جذب انرژی مدل F-10-0.18، ۳ برابر مدل F-1-0.05 بوده است. افزایش سختی میراگرها نسبت به قاب از ۱۰، موجب کاهش جذب انرژی قاب گردیده است. این کاهش جذب انرژی به دلیل لاغرتر شدن حلقه‌های انتهایی هیستریزس می‌باشد. به طوری که حداکثر جذب انرژی مدل F-18-0.19 برابر ۶۴٪ جذب انرژی مدل یعنی F-10-0.18 محاسبه گردید.

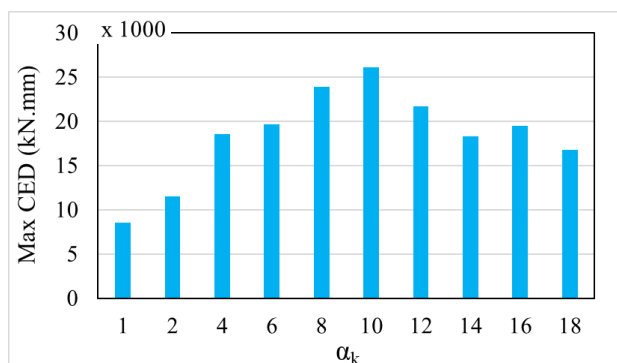


شکل ۱۶: نتایج اتلاف انرژی تجمعی مدل‌ها

برای ارزیابی دقیق‌تر تأثیر α_k بر روی جذب انرژی کل، شکل ۱۷ ارائه شد. بر اساس این شکل، مشاهده می‌شود که با افزایش نسبت سختی میراگرها به قاب از ۱ تا ۱۰، جذب انرژی مدل‌ها به طور صعودی افزایش یافته و پس از آن کاهش یافته است. این شکل نشان می‌دهد اگر سختی میراگرها کم باشد تأثیر آن ناچیز بوده و همچنین اگر زیاد باشد (بیش از ۱۰ برابر قاب)، به دلیل جذب قابل توجه از

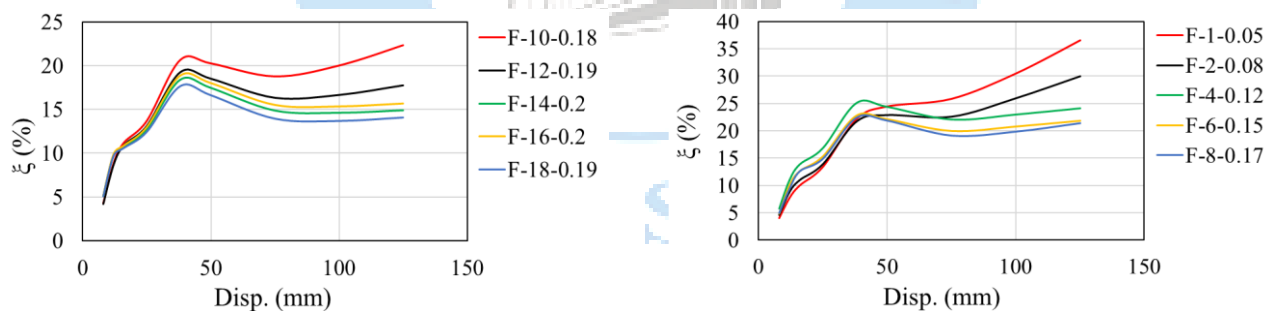
²⁰ Cumulative energy dissipation (CED)

نیروی جانبی، عملکرد مطلوبی حاصل نمی‌شود. بنابراین بهترین نتایج مربوط به مدلی است که سختی الاستیک میراگرها ۱۰ برابر سختی الاستیک قاب تنها بود در این حالت نیرو به نسبت مناسبی بین قاب و میراگر تقسیم می‌شود.



شکل ۱۷: تغییرات جذب انرژی کل نسبت به α_k

نسبت میرایی معادل یک پارامتر اساسی در مهندسی زلزله است که میزان اتلاف انرژی در سازه‌ها را نشان داده و بر پاسخ دینامیکی آن‌ها در برابر زلزله تأثیر می‌گذارد. این پارامتر طبق معادله ۴ در سیکل‌های مختلف بارگذاری قابل محاسبه است و نتایج آن برای مدل‌ها در شکل ۱۸ نشان داده شده است. در این شکل، مشاهده می‌شود که کاهش نسبت سختی میراگرها به قاب موجب افزایش نسبت میرایی معادل می‌گردد. در مدل‌های با α_k کم با وجود اینکه جذب انرژی کمتری نسبت به دیگر مدل‌ها دارند اما به دلیل کاهش شدید مساحت بخش الاستیک (Es مطابق شکل ۱۱)، نسبت میرایی معادل بیشتری داشته‌اند. در اکثر مدل‌ها، حداکثر نسبت میرایی معادل در جابجایی‌های ۳۸ و ۱۲۵ میلی‌متری قاب مشاهده شده است.



شکل ۱۸: نتایج نسبت میرایی معادل

همان‌طور که پیش‌تر بیان شد، به دلیل اینکه جابجایی میراگرها و قاب یکسان است، عملکردی مشابه فنرهای موازی از خود نشان می‌دهند. در یک سیستم با فنرهای موازی، سختی کل برابر مجموع سختی اعضای آن است. به این ترتیب برای محاسبه سختی الاستیک قاب مجهز به میراگر، می‌توان از معادله ۵ استفاده کرد. در این معادله K_t ، K_{eu} و K_{frame} به ترتیب معرف سختی الاستیک قاب مجهز به میراگر، مجموع سختی الاستیک میراگرها و سختی الاستیک قاب تنها است. در جدول ۵ نتایج سختی الاستیک حاصل از نتایج عددی و نتایج معادله ۵ ارائه شده است. مشاهده می‌شود که مطابقت قابل قبولی بین نتایج عددی و تحلیلی وجود دارد. در این جدول نتایج حداکثر مقاومت قاب نیز ارائه شده است. از آنجا که مقاومت حداکثر قاب مجهز به میراگر یکی از پارامترهای مهم قاب به شمار می‌آید، برای تخمین

سریع تر آن معادله ۶ پیشنهاد شد. این معادله طبق تکنیک برازش منحنی و بر اساس نتایج عددی محاسبه شد. برای محاسبه این معادله، ابتدا می بایست تاثیر متغیرها (تاثیر مستقیم یا معکوس) بر روی نتایج مشخص شود. سپس اگر تاثیر مستقیم دارد، در صورت نوشته شده و اگر تاثیر معکوس بر نتایج دارد، در مخرج بیان شود. سپس ضرایب آنها طوری محاسبه شود که نتایج آن، با نتایج عددی حداقل اختلاف را داشته باشد. در این معادله F_u و $F_{u \text{ frame}}$ به ترتیب معرف حداکثر مقاومت قاب تنها و قاب با میراگر است. یکی از مزیت های این معادله، پیوستگی نتایج آن است (برخلاف نتایج عددی). به این ترتیب در این معادله با داشتن نسبت سختی و مقاومت تسلیم میراگرها به قاب می توان مقاومت حداکثر قاب را تخمین زد.

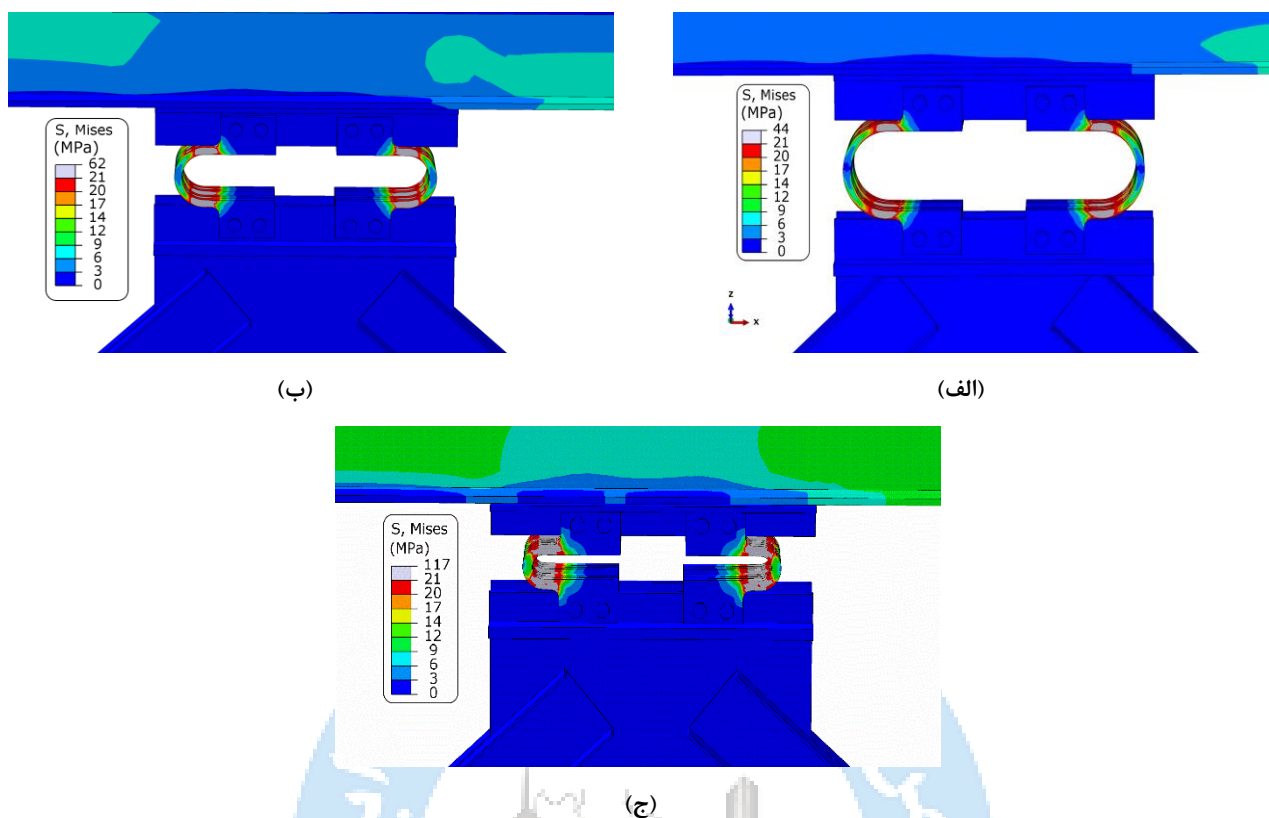
$$K_t = K_{e_u} + K_{frame} \quad (5)$$

$$F_u = F_{u \text{ frame}} + 108\alpha_s^{1.5} + 2.1\alpha_k \text{ (kN)} \quad (6)$$

جدول ۵: نتایج سختی الاستیک و مقاومت حداکثر قاب مجهز به میراگر

مدل	نتایج سختی (kN/mm)		نتایج مقاومت (kN)	
	معادله ۵	عددی	معادله ۶	عددی
F-1-0.05	۲/۹۶	۳/۱۴	۵۱/۳	۵۰/۲
F-2-0.08	۴/۴۴	۴/۵۷	۵۴/۶	۵۴/۵
F-4-0.12	۷/۴	۷/۶۲	۶۰/۹	۶۱/۴
F-6-0.15	۱/۳۶	۱/۹۸	۶۶/۹	۶۵/۹
F-8-0.17	۱۳/۳۲	۱۳/۷۲	۷۲/۴	۷۳/۱
F-10-0.18	۱۶/۲۸	۱۶/۶۱	۷۷/۲	۷۶/۶
F-12-0.19	۱۹/۲۴	۲۳/۹	۸۲/۱	۸۲/۷
F-14-0.2	۲۲/۲	۲۳/۷۵	۸۷/۱	۸۴
F-16-0.2	۲۵/۱۶	۲۶/۱۷	۹۱/۳	۹۳/۸
F-18-0.19	۲۸/۱۲	۲۹/۲۴	۹۴/۷	۹۵/۱

میراگرهای تسلیمی طوری طراحی می شوند که تسلیم آن ها قبل از اعضای اصلی سازه رخ دهد. یکی از مزیت های میراگر آلومینیومی تسلیم زود هنگام آن ها است. در این بخش کانتور تنش سه نمونه از مدل ها (مطابق شکل ۱۹) در لحظه تسلیم میراگر نشان داده شده است. این ارزیابی به منظور بررسی تنش های ایجاد شده در قاب در لحظه تسلیم میراگر انجام شده است. در این سه مدل، نسبت سختی میراگر به قاب به ترتیب برابر با ۱، ۱۰ و ۱۸ است. این سه مدل به دلیل داشتن سختی الاستیک کم، متوسط و زیاد برای میراگرها انتخاب شده اند. طبق این نتایج می توان مشاهده کرد که افزایش سختی میراگرها موجب افزایش حداکثر تنش در قاب شده است. افزایش سختی میراگرها همچنین موجب کاهش جابجایی تسلیم قاب شد، به طوری که بیشترین جابجایی تسلیم مربوط به مدل F-1-0.05 بود که میراگرها کمترین سختی را داشتند. حداکثر تنش های ایجاد شده در این شکل ها مشابه نمونه آزمایشگاهی در محل اتصال نواحی خمیده رخ داده است.



شکل ۱۹: نتایج تنش فون میزس مدل‌های (الف) F-1-0.05 (ب) F-10-0.18 (ج) F-18-0.19

۴- نتیجه‌گیری

در این مطالعه رفتار لرزه‌ای قاب‌های خمشی فولادی مجهز به میراگر تسلیمی آلومینیومی U شکل بررسی شد. تحلیل مدل‌ها در این تحقیق با استفاده از نرم‌افزار المان محدود آباکوس انجام گرفت. در ابتدا مدل عددی با استفاده از یک نمونه آزمایشگاهی و معادلات تحلیلی صحت‌سنجی شد. سپس تأثیر آن بر رفتار لرزه‌ای قاب فولادی ارزیابی گردید. متغیرهای این مدل‌ها شامل نسبت سختی الاستیک و مقاومت تسلیم میراگرهای آلومینیومی به قاب تنها بود. به طوری که تعداد میراگرها در قاب یکسان و با تغییر شعاع و ضخامت آن، مدل‌ها تعریف شد. خروجی‌های این تحلیل‌های چرخه‌ای شامل سختی موثر و الاستیک، مقاومت نهایی، جذب انرژی و نسبت میرایی معادل بود. همچنین برای محاسبه سختی الاستیک و مقاومت نهایی قاب مجهز به میراگر، معادلاتی پیشنهاد شد. پس از بررسی نتایج خلاصه آن در بندهای زیر ارائه شده است:

- ۱- نتایج عددی سختی الاستیک و مقاومت تسلیم میراگرهای آلومینیومی تطابق قابل قبولی با نتایج تحلیلی داشتند. به این ترتیب می‌توان از این معادلات، برای تخمین این دو پارامتر اساسی میراگر استفاده شود.
- ۲- افزایش سختی و مقاومت تسلیم میراگرها موجب افزایش مقاومت قاب گردید. حداکثر مقاومت در مدلی مشاهده شد که سختی میراگر ۱۸ برابر سختی قاب بود؛ به طوری که مقاومت آن دو برابر مقاومت قاب تنها حاصل شد. برای محاسبه مقاومت حداکثر قاب، یک معادله پیشنهاد شد که بر اساس نسبت سختی و مقاومت میراگرها به قاب، می‌توان حداکثر مقاومت را با دقت قابل قبولی تخمین زد.

- ۳- در تمامی مدل‌ها با افزایش جابجایی قاب، سختی موثر آن کاهش یافت. این کاهش سختی در مدل‌های که سختی میراگر بیش از ۱۲ برابر قاب بود بیشتر مشاهده شد. در مدل‌هایی که نسبت سختی میراگرها به قاب به ترتیب برابر ۱ و ۱۰ و ۱۸ بود، افزایش ۴۸، ۲۳ و ۵ میلی‌متر جابجایی باعث شد که سختی آن به ۵۰٪ سختی الاستیک کاهش یابد. همچنین سختی قاب مجهز به میراگر تسلیمی با دقت قابل قبولی برابر مجموع سختی میراگرها و قاب تنها بود.
- ۴- نتایج جذب انرژی مدل‌ها نشان داد که افزایش نسبت سختی میراگرها به قاب تا ۱۰، باعث افزایش آن شده و پس از آن کاهش می‌یابد. در مدلی که سختی میراگرها ۱۰ برابر قاب بود، جذب انرژی ۳ برابر مدلی بود که سختی میراگرها و قاب یکسان بود.
- ۵- نتایج نسبت میرایی معادل، با دیگر نتایج لرزه‌ای قاب متفاوت بود، به طوری که کاهش سختی میراگرها باعث افزایش آن شد. در اکثر مدل‌ها، حداکثر مقدار این پارامتر در جابجایی‌های ۳۸ و ۱۲۵ میلی‌متر مشاهده شد.
- ۶- در طراحی میراگرهای U شکل آلومینیومی در قاب‌های فولادی باید سختی الاستیک و مقاومت تسلیم آن‌ها به ترتیب برابر ۱۰ و ۰/۱۸ برابر قاب تنها در نظر گرفته شود. در این مدل می‌توان اطمینان داشت که بیشترین جذب انرژی حاصل می‌شود. همچنین مقاومت و سختی این مدل به ترتیب ۱/۶ و ۱۱ برابر قاب تنها محاسبه گردید.

مراجع

- [1] Parvari, A., Hoshmand, M. (2021). Investigation on the Seismic Response Behavior of the Pipe Rack Equipped with Viscos Damper. *Journal of Structural and Construction Engineering*. 8(6), pp. 81-96. <https://doi.org/10.22065/jsce.2020.161187.1742>.
- [2] Kiani, M., Vaseghi Amiri, J. (2019). Evaluation of effects of hysteretic damping of shape memory alloys on seismic performance of tuned mass damper. *Journal of Structural and Construction Engineering*. 6(Special Issue 2), pp. 5-24. <https://doi.org/10.22065/jsce.2018.96994.1310>.
- [3] Enayati, H., Rousta, A.M. (2022). The Investigation of the effect of earthquake type on the structure s behavior with Tuned liquid damper with variable baffles under semi-active control. *Journal of Structural and Construction Engineering*. 8(Special Issue 4), pp. 77-92. <https://doi.org/10.22065/jsce.2020.172223.1786>.
- [4] Jalaeifar, A., Kiani, M. (2021). Assessing the Efficiency of an Active Viscous Damper in Near-Field and Far-Field Earthquakes. *Journal of Structural and Construction Engineering*. 8(6), pp. 280-300. <https://doi.org/10.22065/jsce.2020.197694.1927>.
- [5] Shojaeifar, H., Maleki, A., Lotfollahi-Yaghin, M.-A. (2022). Investigation of the performance of semi-rigid moment steel frames system with passive steel curved dampers. *Journal of Structural and Construction Engineering*. 9(4), pp. 5-24. <https://doi.org/10.22065/jsce.2021.279152.2404>.
- [6] Ghaderi, M., Akbari Baghal, A.E., Afkar, A., Pirboudaghi, S. (2024). Numerical study of the seismic performance of shape memory alloys yielding metal dampers. *Journal of Structural and Construction Engineering*. 10(12), pp. 106-127. <https://doi.org/10.22065/jsce.2023.344066.2826>.
- [7] Akrami, V., Mazloumi, N., Rahman Shokrgozar, H. (2024). A Parametric Study on the Bending Capacity of Dented Hollow Circular Section. *Civil Infrastructure Researches*. pp. -.10.22091/cer.2024.11423.1578.
- [8] Kia Darbandsari, S., Firoozi Nezamabadi, M., Abbasi, H., Yaghoobi Vayeghan, F. (2022). Numerical Study of Horizontal Friction Dampers Made of Steel and Brake Pads in Chevron frame under Cyclic Loads. *Civil Infrastructure Researches*. 8(1), pp. 97-114.10.22091/cer.2022.7565.1325.
- [9] Madheswaran, C.K., Prakash vel, J., Sathishkumar, K., Rao, G.V.R. (2017). Earthquake Response of Reinforced Concrete Building Retrofitted with Geopolymer Concrete and X-shaped Metallic Damper. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series A*. 98(1), pp. 41-52. <https://doi.org/10.1007/s40030-017-0209-z>.
- [10] Aghlara, R., Tahir, M.M., Adnan, A.B. (2018). Experimental study of Pipe-Fuse Damper for passive energy dissipation in structures. *Journal of Constructional Steel Research*. 148, pp. 351-360. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2018.06.004>.
- [11] Ebadi Jamkhaneh, M., Ebrahimi, A.H., Shokri Amiri, M. (2019). Experimental and Numerical Investigation of Steel Moment Resisting Frame with U-Shaped Metallic Yielding Damper. *International Journal of Steel Structures*. 19(3), pp. 806-818. <https://doi.org/10.1007/s13296-018-0166-z>.

- [12] Gorji Azandariani, M., Abdolmaleki, H., Gorji Azandariani, A. (2020). Numerical and analytical investigation of cyclic behavior of steel ring dampers (SRDs). *Thin-Walled Structures*. 151, pp. 106751. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2020.106751>.
- [13] Guo, L., Wang, J., Wang, W., Wang, H. (2021). Experimental, numerical and analytical study on seismic performance of shear-bending yielding coupling dampers. *Engineering Structures*. 244, pp. 112724. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112724>.
- [14] Zhao, J.-Z., Tao, M.-X., Wu, Z.-H., Zhuang, L.-D. (2022). Experimental and numerical study on bent shear panel damper made of BLY160 steel. *Engineering Structures*. 260, pp. 114229. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.114229>.
- [15] Ghaedi, K., Javanmardi, A., Ibrahim, Z., Gordan, M., S. M. Rashid, R., Khatibi, H., Vaghei, R. (2023). Experimental and numerical studies on the cyclic performance of structural frames equipped with bar dampers. *Structures*. 50, pp. 707-722. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.02.070>.
- [16] Aghani, H., Cheraghi, K., Bakhshipour, M. (2024). Numerical Investigation of the Effect of Aluminum Yielding Damper for the Retrofitting of Semi-rigid Steel Frames. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*. 68(2), pp. 349-357. <https://doi.org/10.3311/PPci.23119>.
- [17] Cheraghi, K., TahamouliRoudsari, M., Kiasat, S., Cheraghi, K. (2024). Numerical and analytical investigation of cyclic behavior of D-Shape yielding damper. *Structural Engineering and Mechanics*. 89(4), pp. 411. <https://doi.org/10.12989/sem.2024.89.4.411>.
- [18] Guo, W., Li, S., Zhai, Z., Li, Z., Tan, S., Ding, F. (2022). Seismic performance of a new S-shaped mild steel damper with varied yielding cross-sections. *Journal of Building Engineering*. 45, pp. 103508. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103508>.
- [19] Zhai, Z., Guo, W., Yu, Z., He, C., Zeng, Z. (2020). Experimental and numerical study of S-shaped steel plate damper for seismic resilient application. *Engineering Structures*. 221, pp. 111006. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111006>.
- [20] Cheraghi, K., TahamouliRoudsari, M., Kiasat, S., Esfandiari, J. (2024). Numerical Investigation of Cyclic Behavior of Angled U-shaped Yielding Damper on Steel Frames. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*. 68(2), pp. 426-434. <https://doi.org/10.3311/PPci.23213>.
- [21] Cheraghi, K., TahamouliRoudsari, M. (2024). Analytical and numerical investigation of the cyclic behavior of angled U-shape damper. *Steel and Composite Structures*. 51(3), pp. 325-335. <https://doi.org/10.12989/scs.2024.51.3.325>.
- [22] (2025). Parametric study of the innovative model of angled U-shape damper with multiphase yielding mechanism. *International Journal of Non-Linear Mechanics*. 170, pp. 104998. <https://doi.org/10.1016/j.ijnonlinmec.2024.104998>.
- [23] Bayat, K., Shekastehband, B. (2019). Seismic performance of beam to column connections with T-shaped slit dampers. *Thin-Walled Structures*. 141, pp. 28-46. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2019.04.010>.
- [24] Ghamari, A., Kim, Y.-J., Bae, J. (2021). Utilizing an I-shaped shear link as a damper to improve the behaviour of a concentrically braced frame. *Journal of Constructional Steel Research*. 186, pp. 106915. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2021.106915>.
- [25] Solaimani Nezhad, M.R., Mahmoudi, M. (2021). Experimental and analytical evaluation of the seismic performance of Y-shaped braces equipped with yielding diagonal dampers. *Journal of Building Engineering*. 42, pp. 102362. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102362>.
- [26] Wang, B., Chen, P., Zhu, S., Dai, K. (2023). Seismic performance of buildings with novel self-centering base isolation system for earthquake resilience. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*. 52(5), pp. 1360-1380. <https://doi.org/10.1002/eqe.3820>.
- [27] Deng, K., Liang, H., Yi, Y., Zhao, C., Dai, S., Wu, D. (2023). Sliding U-shaped steel damper for multi-directional displacement. *International Journal of Non-Linear Mechanics*. 156, pp. 104483. <https://doi.org/10.1016/j.ijnonlinmec.2023.104483>.
- [28] Mazzolani, F.M., Taiyari, F. *The Influence of the U-Shaped Damper Configuration on the Seismic Performance of Steel Building Frames*. in *Proceedings of the 10th International Conference on Behaviour of Steel Structures in Seismic Areas*. 2022. Cham: Springer International Publishing.
- [29] Yu, Q.-Q., Wu, J.-Y., Gu, X.-L., Zhou, F.-Y. (2022). Experimental study on effects of U-shape dampers on earthquake responses of a base-isolated LNG inner tank. *Engineering Structures*. 269, pp. 114841. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.114841>.
- [30] Manchalwar, A., 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. <https://doi.org/10.1007/s11204-020-09653-4>.

- [31] Ene, D., Kishiki, S., Yamada, S., Jiao, Y., Konishi, Y., Terashima, M., Kawamura, N. (2016). Experimental study on the bidirectional inelastic deformation capacity of U-shaped steel dampers for seismic isolated buildings. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*. 45(2), pp. 173-192. <https://doi.org/10.1002/eqe.2621>.
- [32] Ramezani, M., Mohammadzadeh, M.R., shojaee, S. (2024). Optimal Design of Variable Peripheral Mass Dampers in Passive and Active Vibration Control of Tall Buildings. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*. 48(6), pp. 4505-4519. <https://doi.org/10.1007/s40996-024-01598-0>.
- [33] Nazeran, R., Hemmati, A., Kazemi, H. (2024). Numerical and experimental behavior of moment concrete frame retrofitted with TADAS metal yielding damper under lateral loading. *Structural Engineering and Mechanics*. 89(5), pp. 507-524. <https://doi.org/10.12989/sem.2024.89.5.507>.
- [34] Cheraghi, K., TahamouliRoudsari, M. (2024). Numerical and analytical study of cyclic behavior of TADAS and the impact of axial force on its performance. *Steel and Composite Structures*. 53(2), pp. 195-208. <https://doi.org/10.12989/scs.2024.53.2.195>.
- [35] Mortezaagholi, M.H., Zahrai, S.M., Abbasi Shanbehbazzari, R. (2024). Cyclic Behavior of a Novel MADAS Damper with No Axial Force and Improved Seismic Performance (Experimental, Numerical, and Analytical Assessment). *Journal of Earthquake Engineering*. 28(8), pp. 2249-2272. <https://doi.org/10.1080/13632469.2023.2286378>.
- [36] Rai, D.C., Annam, P.K., Pradhan, T. (2013). Seismic testing of steel braced frames with aluminum shear yielding dampers. *Engineering Structures*. 46, pp. 737-747. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2012.08.027>.
- [37] Sahoo, D.R., Rai, D.C. (2009). A Novel Technique of Seismic Strengthening of Nonductile RC Frame using Steel Caging and Aluminum Shear Yielding Damper. *Earthquake Spectra*. 25(2), pp. 415-437. <https://doi.org/10.1193/1.3111173>.
- [38] Yao, Z., Wang, W., Zhu, Y. (2021). Experimental evaluation and numerical simulation of low-yield-point steel shear panel dampers. *Engineering Structures*. 245, pp. 112860. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112860>.
- [39] Xu, L.-Y., Nie, X., Fan, J.-S. (2016). Cyclic behaviour of low-yield-point steel shear panel dampers. *Engineering Structures*. 126, pp. 391-404. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.08.002>.
- [40] Zhang, C., Aoki, T., Zhang, Q., Wu, M. (2015). The performance of low-yield-strength steel shear-panel damper with without buckling. *Materials and Structures*. 48(4), pp. 1233-1242. <https://doi.org/10.1617/s11527-013-0228-9>.
- [41] (2013). Experimental investigation on the low-yield-strength steel shear panel damper under different loading. *Journal of Constructional Steel Research*. 84, pp. 105-113. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2013.01.014>.
- [42] Zhuang, L., Wang, J., Nie, X., Wu, Z. (2022). Experimental study on the cyclic behaviour of shear links made of BLY160 steel. *Thin-Walled Structures*. 174, pp. 109072. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2022.109072>.
- [43] Hibbitt, K., Sorensen, I., *ABAQUS/Standard user's Manual Volumes I-III and ABAQUS CAE Manual*. 2014, Version.
- [44] Sang-Woo Kim, Kil-Hee Kim. (2020). Evaluation of Structural Behavior of Hysteretic Steel Dampers under Cyclic Loading. *Applied Sciences*. 10(22), pp. 8264. <https://doi.org/10.3390/app10228264>.
- [45] Cheraghi, K., TahamouliRoudsari, M., Kiasat, S. (2023). Numerical and analytical investigation of U-shape dampers and its effect on steel frames. *Structures*. 55, pp. 498-509. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.06.037>.
- [46] De Matteis, G., Formisano, A., Panico, S., Mazzolani, F.M. (2008). Numerical and experimental analysis of pure aluminium shear panels with welded stiffeners. *Computers & Structures*. 86(6), pp. 545-555. <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2007.05.027>.
- [47] Hsu, H.L., Halim, H. (2018). Brace performance with steel curved dampers and amplified deformation mechanisms. *Engineering Structures*. 175, pp. 628-644. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.08.052>.
- [48] Chopra, A.K., *Dynamics of structures*. 2007: Pearson Education India.