Karafan

Quarterly Scientific Journal of National University of Skill

Spring 2026, Vol. 23, No. 1, p. 542-559

Journal Homepage: https://karafan.tvu.ac.ir/?lang=en

:10.48301/kkssa.2025.482750.3020

Proposed a new Seesaw bracing system to improve seismic resilience of structures

Mahdi Nakhaeirad[1], Abbas Sivandi-Pour[2*], Ehsan NoroozinejadFarsangi[3]

[1, 2, 3] Department of Civil and Surveying Engineering, Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran.

ARTICLE INFO

Article Type:
Original Research

Received: 2024.10.16
Revised: 2024.12.01
Accepted: 2025.01.13

Keyword:
Yielding damper
Seesaw bracing system
Energy absorption
Seismic resilience
Finite Element

***Corresponding Author:**
Abbas Sivandi-Pour
Email:
a.sivandi@kgut.ac.ir

ABSTRACT

During strong earthquakes, buildings often exceed their elastic limit and undergo significant changes to absorb the seismic energy. It is recommended to implement energy dissipation systems to reduce the structural load, minimize deformation, decrease damage to structural components, and prevent the system from going out of service. In recent years, the Seesaw energy dissipation system with various configurations has been proposed as part of passive structural control systems. This study introduces a novel type of yielding metal dampers, which have been modeled and analyzed using Abaqus finite element software within the Seesaw bracing system. The proposed damper consists of two main components: peripheral sheets and central hollow profiles. These elements are designed to ensure that under loading conditions, plastic deformation occurs in the hollow profiles while the other components remain within the elastic range. This setup allows only the hollow profiles to absorb energy through inelastic behavior. The damper can be installed in locations experiencing shear force, or a combination of shear and axial force. A finite element model of the Seesaw bracing system, along with the damper model in Abaqus software, was developed. By integrating this damper into the system, its behavior and energy absorption capacity were examined. The investigations revealed a significant increase of more than 105% in the overall energy dissipation capacity of the system.

©2024 the authors. Published by National University of Skill, Tehran, Iran. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International (CC BY-NC License) (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

E-ISSN: 2538-4430
ISSN: 2382-9796

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

In recent years, the approach of seismic codes has gone towards using the inelastic capacity of structures, but using the inelastic capacity of the structure will cause large changes in the shape and durability of structural members due to very high lateral loads. And damage occurs in the main members of the structure and the structure is taken out of service. By installing energy dissipation systems such as systems that include dampers, a measure can be devised that these systems absorb energy, yields, plastic deformation, etc., in short, damage will occur in dampers, and other structural members such as beams and columns do not suffer from deterioration and plastic deformation. Energy dissipation systems can be divided into different types such as passive, semi-active, active control and seismic-isolators. In recent years, the energy dissipation system of Seesaw, equipped with passive dampers, has been proposed, which is included in the subcategory of passive control.

Seesaw bracing system

Based on research by Gao and Tagawa in 2012, the seesaw bracing system was introduced. This system included cross cables as a bracing member and a rotating mechanism at the bottom and dampers at the bottom.

Methodology

Verification

In order to verify the validity of the software modeling, article by Mr. Tagawa and his colleagues in 2016, which investigated the laboratory investigation of the Seesaw brace system equipped with slit steel damper, it has been selected. Also, Abaqus software has been selected for validation. A good similarity has been observed between the results of software modeling in the Abaqus software environment and the laboratory results.

Geometry of models

In the following, the types of yielding metal dampers that have been used in this research in the Seesaw bracing system have been introduced.

Table 1. Names and characteristics of dampers

Properties	Name	Row
ADAS Damper with 9 layers steel sheet	ADAS 9L	1
ADAS Damper with 7 layers steel sheet	ADAS 7L	2
Yielding metal damper including solid bars and peripheral filler parts	BAR	3
Yielding metal damper including solid bars without peripheral filler parts	BAR-CH2	4
The yielding steel damper including circular hollow sections with an outer radius of 5 mm	PIPE 5	5

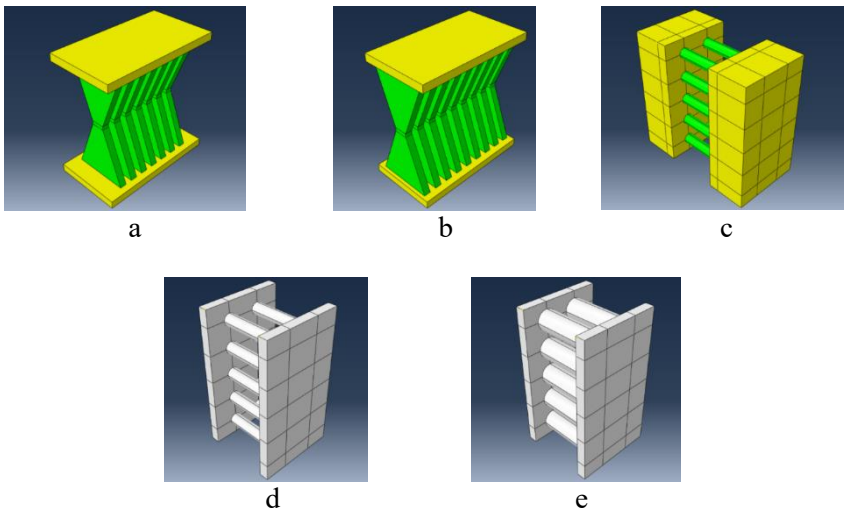


Figure 1. figure of a) ADAS 7L Partition b) ADAS 9L Partition c) Bar Partition d) Bar-ch2 Partition e) Pipe 5 Partition

Results and discussion

Performance comparison of Seesaw brace system equipped with different dampers

The model of the Seesaw bracing system equipped with a slit steel damper has been selected as a reference model Below is a diagram including the hysteresis diagram related to different models, which shows the performance of different models in terms of energy dissipation side by side.

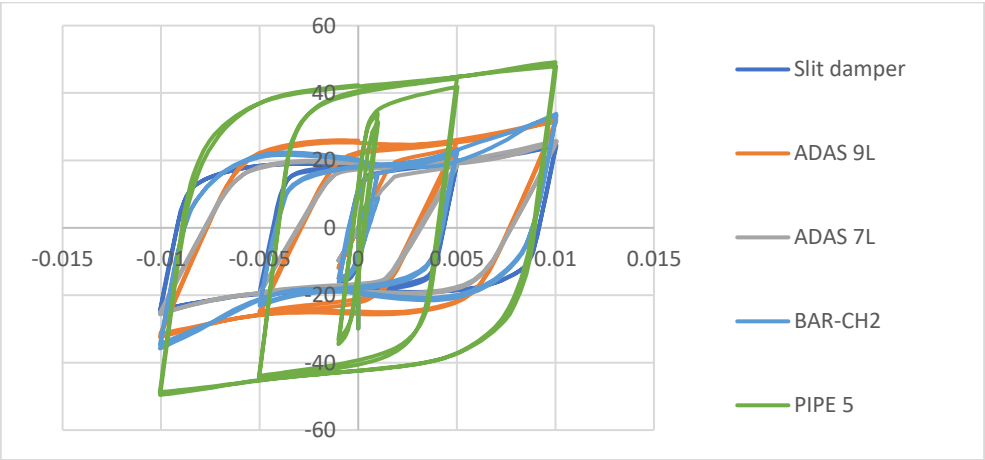


Figure 2. Hysteresis comparison diagram for the Seesaw bracing system equipped with different dampers

When the system is equipped with the ADAS-7L damper, the maximum tolerated forces were similar to the slit yielding steel damper, but energy dissipation decreased by over 20%. This

reduction in hysteresis area and force approximation occurred with more than double the material used in the energy-consuming part compared to the primary system.

Using the ADAS-9L damper increased tolerated forces compared to the initial state, but energy dissipation remained almost the same. The material ratio in the energy-consuming part was over three times that of the original system.

With the solid circular damper, there was a slight increase in tolerated forces in some corners, with an overall 3% increase compared to the initial system. Material consumption in the energy-consuming part decreased by approximately 38%.

The hollow circular damper increased the forces borne by the system and the hysteresis loop area. Energy dissipation nearly doubled compared to the initial system, with material usage equal to the rod model and about 38% less than the initial model.

Conclusion

The investigation of 7 and 9-layer ADAS dampers revealed poor energy dissipation performance. The yield steel damper with solid circular sections exhibited better performance than the slit steel damper, with over 38% reduction in material volume consumption and more than 2% improvement in energy dissipation. The steel damper with a tubular section (pipe damper) outperformed both the slit and solid steel dampers in energy dissipation, with a 38% reduction in material volume compared to the slit steel damper and similar material consumption to the solid steel damper with solid circular sections (bar damper). Based on these findings, it is recommended to further investigate and consider using a tubular damper (pipe damper).

کارافن

فصلنامه علمی دانشگاه ملی مهارت

بهار ۱۴۰۵، دوره ۲۳، شماره ۱، ۵۵۹-۵۴۲

آدرس نشریه: https://karafan.tvu.ac.ir

:10.48301/kssa.2025.482750.3020

معرفی سیستم مهاربندی الاکلنگی با پیکربندی جدید جهت بهبود تاب‌آوری لرزه‌ای سازه‌ها

مهدی نخعی‌راد[۱]، عباس سیوندی‌پور[۲*]، احسان نوروزی‌نژادفرسنگی[۳]

۱و۲و۳- دانشکده مهندسی عمران و نقشه برداری، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران.

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۷/۲۵

بازنگری مقاله: ۱۴۰۳/۰۹/۱۱

پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۱۰/۲۴

کلید واژگان:

میراگر تسلیمی

سیستم مهاربندی الاکلنگی

استهلاک انرژی

تاب‌آوری لرزه‌ای

المان محدود

***نویسنده مسئول:**

عباس سیوندی پور

پست الکترونیکی:

a.sivandi@kgut.ac.ir

چکیده

در زلزله‌های شدید، سازه‌ها از محدوده رفتار الاستیک خارج شده و ممکن است به علت جذب انرژی زلزله آسیب‌هایی را متحمل شوند. امروزه استفاده از سیستم‌های اتلاف انرژی برای کاهش تنش‌ها و تغییر شکل‌های سازه و در نهایت کاهش آسیب‌های وارده به اعضای سازه متداول شده است. در سال‌های اخیر در تحقیقات صورت‌گرفته در زمینه مهندسی زلزله، سیستم اتلاف انرژی الاکلنگی پیشنهاد شده است که در زیر مجموعه سیستم‌های کنترل غیرفعال قرار می‌گیرد. در این تحقیق نوع جدیدی از سیستم مهاربندی الاکلنگی برای افزایش تاب‌آوری لرزه‌ای سازه‌ها با استفاده از میراگرهای فلزی تسلیمی ارائه شده است. میراگر فلزی پیشنهادی از دو جزء اصلی ورق‌های پیرامونی و پروفیل‌های توخالی میانی تشکیل شده است. این اعضا طوری طراحی شده‌اند که در زلزله‌های خفیف و متوسط سازه در حالت الاستیک باقی می‌ماند و در زلزله‌های شدید، تغییر شکل پلاستیک در پروفیل‌های توخالی رخ می‌دهد و عملکرد سایر اعضای سیستم در محدوده الاستیک باقی می‌ماند. مدل المان محدود سیستم مهاربندی الاکلنگی با پیکربندی پیشنهادی در نرم‌افزار آباکوس توسعه یافته و با قراردادن این میراگر در سیستم موردنظر، رفتار این میراگر و قابلیت جذب انرژی آن بررسی شده است. نتایج تحقیق بیانگر قابلیت جذب انرژی مناسب در سیستم پیشنهادی نسبت به سیستم موجود است بطوریکه در سیستم پیشنهادی علاوه بر کاهش مصالح، میزان استهلاک انرژی لرزه‌ای کل سیستم نیز بیش از ۱۰۵ درصد افزایش یافته است. باتوجه‌به نتایج هر دو هدف افزایش عملکرد و کاهش مصالح مصرفی هم‌زمان به‌دست‌آمده است.

شاپای الکترونیکی: ۲۵۳۸-۴۴۳۰

شاپای چاپی: ۲۳۸۲-۹۷۹۶

©2024 the authors. Published by National University of Skill, Tehran, Iran. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International (CC BY-NC License) (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

مقدمه

در سال‌های اخیر رویکرد آیین‌نامه‌های لرزه‌ای به سمت استفاده از ظرفیت غیر الاستیک سازه‌ها رفته است. استفاده از ظرفیت غیر الاستیک سازه اگرچه موجب اقتصادی تر شدن سازه ها می گردد ولی باعث خواهد شد که در اثر بارهای جانبی خیلی زیاد، تغییر شکل‌های بزرگ و ماندگاری در اعضای سازه‌ای به وجود آید [۱-۳]. با تعبیه سیستم‌های اتلاف انرژی مانند میراگرها می توان تدبیری اندیشید که جذب انرژی، جاری شدن، تغییر شکل های زیاد و به طور کلی خرابی ها در میراگرها واقع شده و سایر اعضای سازه ای مانند تیرها و ستون ها دچار خرابی و تغییر شکل های پلاستیک نشود. در زلزله های شدید سیستم جاذب انرژی می تواند در کنار سازه اصلی به جذب انرژی پرداخته و سازه با احتمال بیشتری بتواند از زلزله های شدیدتر بدون خسارات عمده عبور کرده و پایدار بماند. بعد از زلزله نیز تعویض میراگرها که بنا به انتخاب نوع میراگر می تواند امری نسبتا ساده باشد سازه را به وضعیت خدمت رسانی اولیه برگرداند [۴-۷]. یکی از جدید ترین سیستم‌های اتلاف انرژی، سیستم مهاربندی الاکلنگی [1] می باشد که در تحقیقات اخیر مورد توجه قرار گرفته است.

کانگ و تاگاوا در سال ۲۰۱۲ به بررسی پاسخ لرزه‌ای سازه‌های فلزی با سیستم الاکلنگی مجهز به میراگر ویسکوالاستیک پرداخته اند. نحوه پیکربندی سیستم به‌طور قوی براثر میرایی تأثیر گذاشته است. این محققین همچنین در سال ۲۰۱۳ بر روی عملکرد لرزه‌ای سازه‌های فولادی با سیستم اتلاف انرژی الاکلنگی با استفاده از میراگرهای مایع ویسکوز کارکرده‌اند. نکته مهم در مطالعات ایشان در نظر گرفتن تعادل بین سختی میله‌ها و ضریب میرایی بوده است. این محققین با استفاده از مطالعات آزمایشگاهی، مشخصه‌های دینامیکی سیستم اتلاف انرژی الاکلنگی برای کنترل ارتعاش سازه ها را بررسی کردند. نتایج نشان داد که اثر نصب سیستم میراگر و تعریف پیش تنیدگی در دوره تناوب طبیعی بسیار ناچیز می باشد اما نسبت میرایی بصورت چشمگیری افزایش‌یافته است. در ادامه با مقایسه بین نتایج آزمایشگاهی و تحلیلی برای سیستم‌های اتلاف انرژی الاکلنگی با میراگر مایع ویسکوز حالت های بهینه برای سیستم میراگر الاکلنگی مجهز به میراگر ویسکوز ارائه گردید [۸; ۹]. تاگاوا و همکاران در سال ۲۰۱۶ به بررسی رفتار چرخه‌ای سیستم‌های اتلاف انرژی الاکلنگی مجهز به میراگر شکاف‌دار پرداختند. رفتار هیسترزیس به‌دست‌آمده از نتایج تست شش مدل، پایداری رفتار و مقدار اتلاف انرژی زیادی را نشان داد. در تمامی پیکربندی‌ها در زاویه دریفت طبقه نزدیک به ۰,۰۰۱ رادیان، میراگرها به تسلیم رسیدند. از ویژگی‌های خوب این سیستم راحتی کنترل عملکرد میرایی بوده است که می‌توان با تغییر ضخامت میراگر، طول آن و جانمایی آن به کنترل مقدار میرایی پرداخت. همچنین مدل هیسترزیس سه خطی برای مدل کردن رفتار چرخه ای سیستم میراگر پیشنهادی، معرفی گردید [۱۰]. فنایی و همکاران در سال ۲۰۱۶ به بررسی تقویت قاب خمشی با استفاده از مهاربند کابلی-استوانه ای پرداختند. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، قاب‌های خمشی تقویت شده با مهاربندی‌های کابل-استوانه ای در مقایسه با مهاربندی‌های کابلی متقاطع عملکرد بهتری داشتند [۱۱]. مهرابی و همکاران در سال ۲۰۱۹ به بررسی ویژگی‌های لرزه‌ای قاب‌های مهاربندی شده با کابلهای ضربدری همراه با فنر پیش فشرده پرداختند [۱۲]. جاو و همکاران در سال ۲۰۱۶ رفتار یک سیستم مهاربندی لرزه‌ای نوآورانه بر پایه به کارگیری یک حلقه آلیاژ حافظه دار سوپرالاستیک را بررسی کردند [۱۳]. اسپیچر و همکاران در سال ۲۰۱۷ یک سیستم مهاربندی چهارضلعی مفصلی با استفاده از آلیاژهای حافظه دار معرفی کردند که عضو¬های مهاربندی در این سیستم نیز از نوع کابلی بوده اند [۱۴].

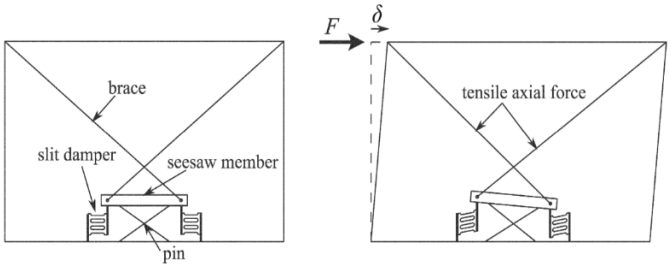
کانگ و موری در سال ۲۰۱۷ بر روی روش ساده‌شده‌ی تخمین تقاضای غیر الاستیک ساختمان‌ها با سیستم اتلاف انرژی الاکلنگی مجهز به میراگر مایع ویسکوز تحقیقاتی انجام دادند [۱۵]. نعیم و کیم به بررسی ارزیابی عملکرد لرزه‌ای سیستم کابلی مجهز به میراگر ویسکوز مایع فنری پرداختند. موسوی و زهرایی در یک مطالعه تحلیلی به بررسی کمک

[1] Seesaw

مهاربندهای کابلی از قبل شل شده به پایداری دینامیکی قاب های غیر شکل پذیر پرداخته اند. این محققین در مطالعه دیگری به بررسی رفتار تحلیلی و آزمایشگاهی اتصالات بدون شل شدگی برای بهبود رفتار لرزه‌ای مهاربندهای کششی پرداختند [۱۶; ۱۷].

ژانگ و همکاران در سال ۲۰۲۰ رفتار لرزه‌ای یک قاب فولادی پیچ و مهره ای با مهاربند کابلی ضربدری را ارزیابی کردند. در این مطالعه یک قاب خمشی پیچ و مهره ای بدون مهاربند و ۴ قاب مجهز به مهاربند کابلی ضربدری بررسی گردید [۱۸]. کاتسیمپینی و همکاران در سال ۲۰۲۰ بر روی پا سخ لرزه‌ای سازه‌های فولادی سه بعدی کوتاه مرتبه مجهز به سیستم الاکلنگی مطالعاتی انجام دادند [۱۹]. سانگ و همکاران بر روی ارزیابی شکنندگی لرزه‌ای مهاربند کابلی مرکز گرا تقویت شده در سازه های بتن م سلح تحقیق کردند. برای بهبود عملکرد لرزه‌ای قاب های ساختمانی موجود، یک مهاربند کابلی مرکزگرای جدید مجهز به میراگر اصطکاکی بررسی شد. در مقایسه با مهاربند کمانش تاب، سیستم مهاربندی پیشنهادی قابلیت لرزه‌ای به وضوح بهتری در زلزله های شدید نشان داد [۲۰]. هاشمی و همکاران در سال ۲۰۲۱بر روی عملکرد لرزه‌ای قاب های فولادی مجهز به میراگرهای اصطکاکی و مهاربندی شده به وسیله مهاربند های ارتجاعی صرفا کششی بررسی انجام دادند. در مدل پیشنهادی این محققین، علاوه بر کنترل تغییر مکان های میان طبقاتی، سازه مقاومت مناسبی در زمین‌لرزه‌های شدید دارد [۲۱].

در شکل ۱،پیکربندی و عملکرد سیستم مهاربند الاکلنگی با میراگر تسلیمی شکاف‌دار نمایش داده شده است.

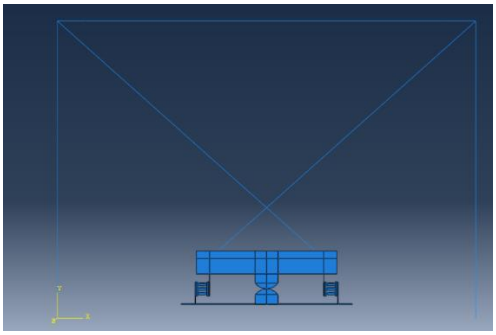


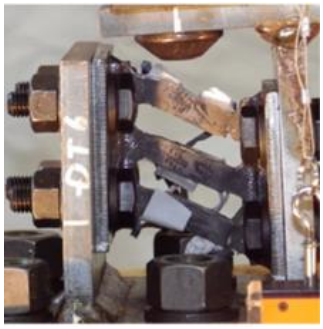
شکل ۱. عملکرد سیستم مهاربندی الاکلنگی مجهز به میراگر فلزی تسلیمی شکاف‌دار[۱۰].

در مطالعات اخیر، انواع مختلفی از میراگرهای غیرفعال شامل ویسکوالاستیک، ویسکوز و تسلیمی در سیستم مهاربندی الاکلنگی استفاده شده است. باتوجه‌به نتایج مطالعات صورت‌گرفته، به علت ویژگی‌های مثبت میراگرهای فلزی تسلیمی، استفاده از این میراگر در سیستم‌های مهاربندی الاکلنگی رفتار لرزه‌ای بهتری را برای سازه در بر داشته است [۲۲-۲۵]. در این تحقیق پیکربندی جدیدی برای سیستم مهاربند الاکلنگی موجود پیشنهاد شده است. در سیستم پیشنهادی از یک میراگر لوله‌ای هیسترزیس جدید استفاده شده است. رفتار لرزه‌ای سیستم پیشنهادی با استفاده از میراگرهای لوله‌ای مختلف با سیستم موجود مقایسه گردید.

صحت سنجی تحلیل مدل ها

به‌منظور صحت سنجی مدل نرم‌افزاری، از مطالعه تاگاوا و همکاران که به بررسی آزمایشگاهی سیستم مهاربندی الاکلنگی مجهز به میراگر فلزی شکاف‌دار پرداختند، استفاده شده است. برای انجام فرایند صحت سنجی یکی از مدل‌های بررسی شده در مقاله مذکور بنام S4.5 انتخاب شده است [۱۰]. در شکل ۲ مدل نرم‌افزاری و آزمایشگاهی سیستم مهاربند الاکلنگی نمایش داده شده است.

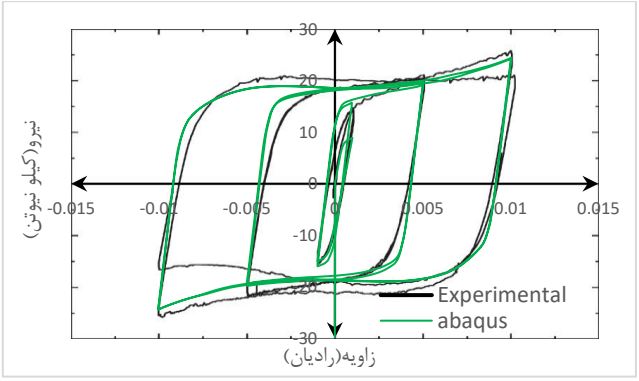




الف ب

شکل ۲. تصاویری از الف)مدلسازی سیستم مهاربندی الاکلنگی مجهز به میراگر فلزی تسلیمی شکاف‌دار جهت ب) مدل آزمایشگاهی [۱۰].

در شکل ۳ نتایج مربوط به مقایسه مدل آزمایشگاهی و مدل نرم‌افزاری جهت صحت سنجی ارائه شده است.



شکل ۳. مقایسه نمودار هیسترزیس مربوط به مدل آزمایشگاهی و مدل نرم‌افزاری.

با مقایسه نتایج به‌دست‌آمده از مدل‌سازی نرم‌افزاری و نتایج آزمایشگاهی، تطابق قابل‌قبولی مشاهده شده است.

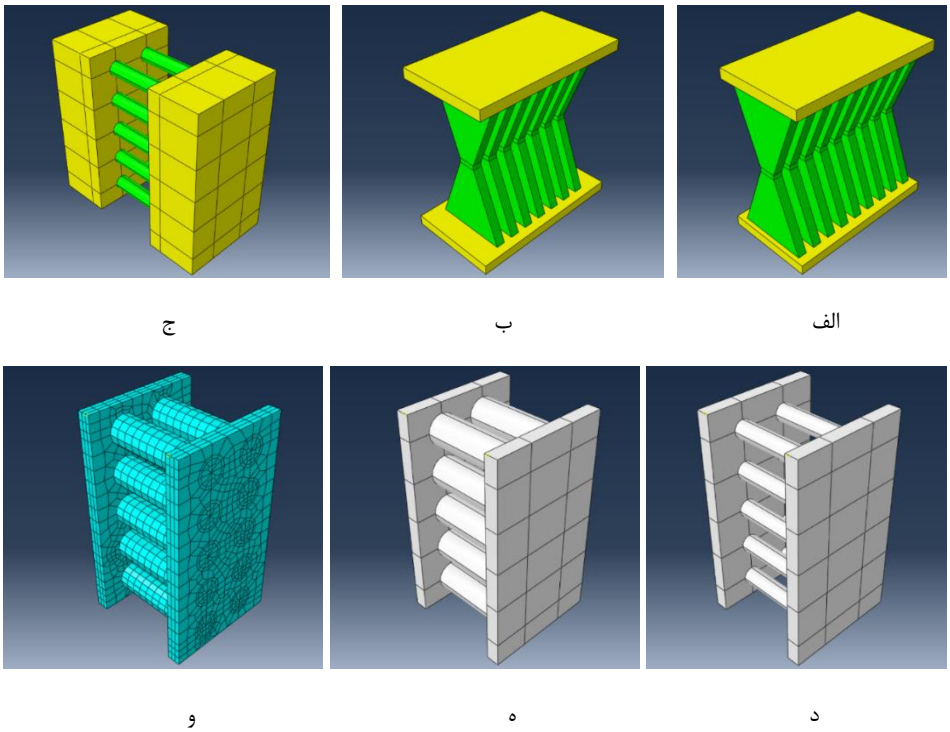
مدلسازی

به علت ویژگی‌های مثبت میراگرهای فلزی تسلیمی، در این تحقیق این نوع از میراگرها در سیستم مهاربندی الاکلنگی استفاده شده است. جهت اصلاح در پیکربندی سیستم مهاربندی الاکلنگی موجود و بالابردن میزان اتلاف انرژی این سیستم و بهبود عملکرد این سیستم، میراگر فلزی تسلیمی شکاف‌دار با میراگر فلزی تسلیمی جدید جایگزین گردید. در جدول ۱ و شکل ۴، انواع میراگرهای فلزی تسلیمی پیشنهادی در سیستم مهاربندی الاکلنگی معرفی شده است.

جدول ۱. مشخصات میراگرهای پیشنهادی.

نام میراگر	مشخصات میراگر
ADAS 9L	میراگر افزاینده میرایی و سختی شامل ۹ لایه ورق

ADAS 7L	میراگر افزاینده میرایی و سختی شامل ۷ لایه ورق
BAR	میراگر فلزی تسلیمی شامل میله‌های توپر و قسمت‌های پرکننده پیرامونی
BAR-CH2	میراگر فلزی تسلیمی شامل میله‌های توپر و فاقد قسمت‌های پرکننده پیرامونی
PIPE 5	میراگر فلزی تسلیمی شامل مقاطع توخالی دایره‌ای با شعاع خارجی ۵ میلی متر



شکل ۴. تصویری از الف) میراگر ADAS 9L ب) میراگر ADAS 7L ج) میراگر BAR د) میراگر BAR-CH ه) پارتیشن بندی میراگرPIPE 5 و) مش بندی میراگر PIPE 5.

پروتکل بارگذاری، شرایط تکیه‌گاهی و ... مانند مدل صحت سنجی بوده است. جنس مصالح مصرفی به‌کاررفته در ساخت تمامی میراگرها یکسان بوده است. میراگرها به صورت Solid، تیرها، ستون‌ها و کابل‌ها به صورت Wire و اعضای مکانیزم به‌صورت Shell مدل شده‌اند. در ادامه به معرفی مشخصات هریک از میراگرهای مدل‌سازی شده شامل میراگرهای شکاف‌دار و میراگرهای میله‌ای و لوله‌ای جدید پیشنهادی پرداخته می‌شود. در قسمت تعریف گام‌ها پس از گام اولیه که پیش‌فرض نرم‌افزار است یک گام از نوع دینامیکی ضمنی یا Dynamic Implicit تعریف شده است. مدت‌زمان گام دینامیکی ۱۵۰۰ به نرم‌افزار معرفی شده است.

سیستم مهاربندی الاکلنگی مجهز به میراگر ADAS 9L

این نوع میراگر که شامل ۹ لایه ورق برش خورده است. در سایر اجزا سیستم تغییری اعمال نشده است ومصالح مورد استفاده در این میراگر مشابه میراگر فلزی تسلیمی شکاف‌دار بوده است. در مش بندی این میراگر سعی شده

است تا به وسیله پارتیشن بندی، ورق‌های میانی در حالت مش Structured قرار بگیرند.برای مش بندی این میراگر هم در قسمت‌های دارای تکنیک مش بندی Sweep و هم قسمت‌های دارای تکنیک مش بندی Structured از المان C3D8R ا ستفاده شده ا ست.حداکثر ابعاد مش ۲،۵ میلیمتر در نظر گرفته شده ا ست. در برر سی های انجام گرفته مشخص شده است که این اندازه مش هم از نظر دقت و هم هزینه محاسباتی مناسب بوده است.

سیستم مهاربندی الاکلنگی مجهز به میراگر ADAS 7L

ضخامت لایه‌ها در دو میراگر ADAS 7L و ADAS 9L یکسان بوده است و تنها تعداد آن‌ها در میراگر ۷ لایه از ۹ عدد به ۷ عدد کاهش پیدا کرده است. با مقایسه مصالح مصرفی ۲ میراگر مشخص شده است که در ساخت لایه های میراگر ۷ لایه در مقایسه با میراگر ۹ لایه تقریبا ۲۲ درصد حجم مصالح مصرفی کاهش یافته است. مشخصات مصالح و مش بندی این میراگر مشابه میراگر ۹ لایه است.

سیستم مهاربندی الاکلنگی مجهز به میراگر فلزی تسلیمی با مقاطع دایره‌ای توپر(BAR)

در ادامه برای یافتن میراگر مناسب قابل‌استفاده در سیستم مهاربندی الاکلنگی از بین میراگرهای موجود، یک نوع از میراگرهای فلزی تسلیمی برای به‌کارگیری در سیستم مهاربندی الاکلنگی، انتخاب شده است. با بررسی‌های صورت‌گرفته مدل با میله ساده انتخاب شد. اما به‌منظور به‌کارگیری این میراگر، ضخامت ورق‌های اطراف، آن قدر افزایش یافته است تا اتصال بین فک‌ها و میراگر برقرار شود.

سیستم مهاربندی الاکلنگی مجهز به میراگر فلزی تسلیمی با مقاطع دایره‌ای توپر با پیکربندی تغییر یافته (BAR-CH)

از آن جا که میراگر میله‌ای با دو ورق ضخیم در دو سمت آن ساخته شده بوده ا ست و در مقایسه بین میراگرها ممکن است تداعی‌کننده آن باشد که ورق‌های ضخیم کناری هم جزئی از میراگر بوده و در فرایند استهلاک انرژی نقش دا شته‌اند، ازاین‌رو ت صمیم بر آن شده ا ست که میراگری با همان اندازه میله‌ها و چیدمان قبلی ساخته شده و ضخامت ورق‌های دو سمت به ضخامت ورق‌های دو سمت میراگر شکاف‌دار کاهش یابد. برای این امر لازم بوده که علاوه بر تغییر در پیکربندی میراگر، پیکربندی دو عضو بالایی و پایینی مکانیزم الاکلنگی نیز تغییریافته و فاصله ورق‌های نصب شده روی دو عضو که در دو سمت نقش دو فک برای اتصال میراگر را داشته‌اند نیز تغییر یابد. از آن جا که این امر تغییر در پیکربندی سایر اعضا بوده است، پس از ایجاد تغییر در پیکربندی میراگر و اعضا، اعضای سیستم به یکدیگر متصل شده‌اند و نرم‌افزار بار دیگر اجرا شده است و نتایج تحلیل شده است.

برای ساخت میراگر فلزی ت سلیمی دارای مقاطع دایره‌ای توپر یک پیکربندی از این نوع میراگر که شامل ۱۰میله فولادی با طول ۳۰ میلی‌متر و شعاع ۳ میلیمتر بوده است، انتخاب شده است. متریال مورداستفاده در این میراگر مشابه متریال استفاده شده در میراگر فلزی تسلیمی شکاف‌دار است.

سیستم مهاربندی الاکلنگی مجهز به میراگر فلزی تسلیمی با مقاطع دایره‌ای توخالی با شعاع۵ (PIPE 5)

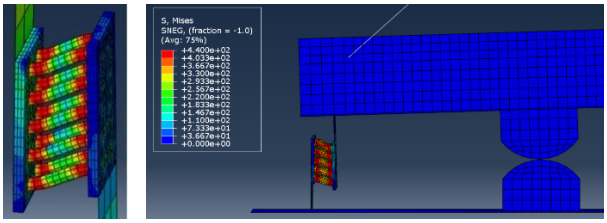
با توجه به رفتار منا سب میراگر میله‌ای در زمینه‌های مختلف سعی شده ا ست تا با اعمال تغییراتی در آن بتوان عملکرد آن را افزایش داد. در این رویکرد همچنان مسئله کاهش مصالح مصرفی نسبت به میراگر فلزی شکاف‌دار لحاظ گردیده است. به جهت اعمال تغییرات در پیکربندی میراگر فلزی تسلیمی با مقاطع دایره‌ای توپر، سعی شده است تا با تغییر در عضوهای مستهلک‌کننده انرژی یعنی میله‌های توپر به تغییر در پیکربندی میراگر پرداخته شود و به این منظور از مقاطع توخالی دایره‌ای به‌جای مقاطع توپر استفاده شده است.

شعاع‌های بیرونی و داخلی لوله‌ها آن چنان انتخاب شده ا ست که م صالح م صرفی در این میراگر و میراگر فلزی تسلیمی با مقاطع توپر برابر باشد. برای ساخت میراگر فلزی تسلیمی دارای مقاطع لوله‌ای یک پیکربندی از این نوع میراگر که شامل ۱۰ لوله فولادی با طول ۳۰میلی متر وشعاع بیرونی ۵ میلی متر و شعاع داخلی ۴ میلی متر بوده است، انتخاب شده است.

تحلیل مدل‌ها

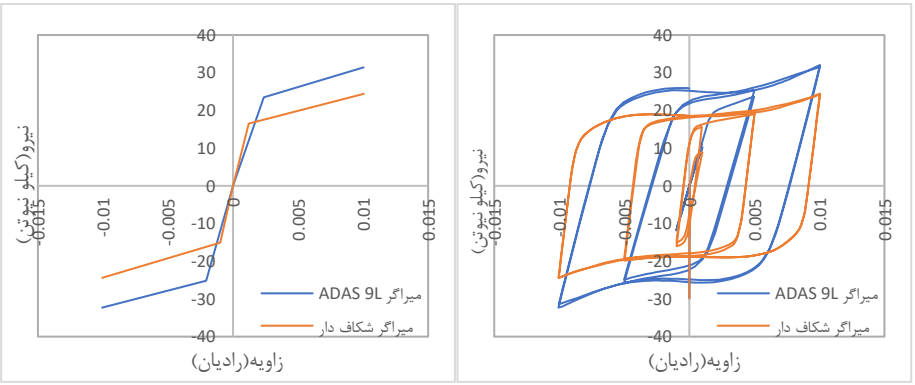
جهت بررسی رفتار سیستم مهاربندی الاکلنگی مجهز به میراگرهای مختلف با یکدیگر، سیستم مهاربندی الاکلنگی مجهز به میراگر فلزی تسلیمی شکاف‌دار به‌عنوان مرجع مقایسه انتخاب شده است. مقدار مصالح مصرفی، نمودار هیسترزیس و ... سیستم مهاربندی الاکلنگی مجهز به سایر میراگرها با سیستم مهاربندی الاکلنگی مجهز به میراگر فلزی تسلیمی شکاف‌دار مقایسه شده است.

در شکل ۵ تغییر شکل میراگر پیشنهادی تحت بارگذاری و تحلیل مورد نظر نشان داده شده است.



شکل ۵. تغییر شکل میراگر پیشنهادی تحت بارگذاری.

نتایج مربوط به جذب انرژی (هیسترزیس) برای سیستم مهاربندی الاکلنگی مجهز به میراگرهای پیشنهادی و میراگر فلزی تسلیمی شکاف‌دار در ادامه آورده شده است.



شکل ۶. مقایسه عملکرد سیستم مجهز به میراگر فلزی تسلیمی شکاف‌دار و سیستم مجهز به میراگر ADAS 9L الف) نمودار های هیسترزیس ب) حداکثر نیرو ها.

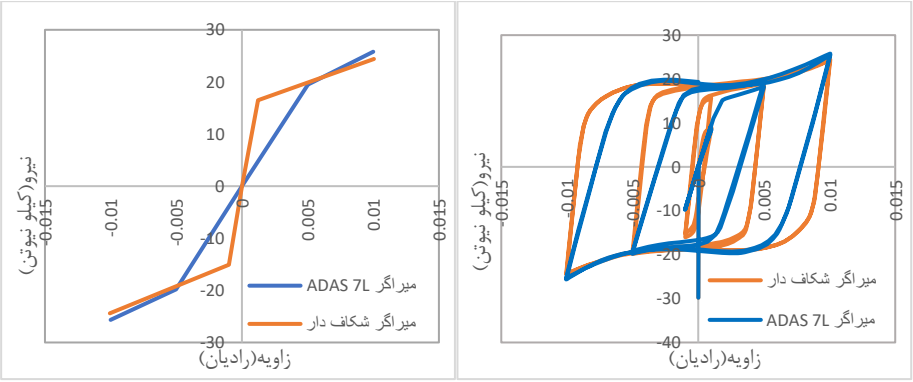
با توجه به شکل ۶ می توان این نکته را بیان کرد که عملکرد میراگر ADAS 9L در جذب نیرو ها و بهتر می باشد. از آن جا که ورق‌های پیرامونی در تمامی مدل ها مشترک بوده و در فرآیند استهلاک انرژی نقش موثری را ایفا نمی نمایند، بنابراین در محا سبه م صالح م صرفی، تنها مقایسه بین م صالح م صرفی ق سمت میانی

میراگرها انجام می شود چرا که ممکن ا ست حتی تغییر در ضخامت ورق ها تا چند در صد، تغییر محسو سی در نتایج ایجاد نکند. میزان انرژی جذب شده توسط سیستم که یک ویژگی مهم برای مقایسه سیستم‌های مختلف می باشد، در این تحقیق بررسی شده است. جدول ۲ مشخصات مدل ها شامل حجم مصالح مصرفی برای ساخت میراگرها و میزان انرژی مستهلک شده را نشان می دهد.

جدول ۲. مقایسه مشخصات و عملکرد میراگر ADAS 9L و میراگر فلزی تسلیمی شکاف‌دار.

نوع میراگر	مقدار مصالح مصرفی (mm^2)	میزان استهلاک انرژی (n.mm)
میراگر ADAS 9L	۴۵۹۵۷	۳۲۴۰۲۷۰
فلزی شکاف‌دار	۱۳۷۰۱	۳۲۵۱۷۴۰

در شکل ۷ نتایج مقایسه نمودار های مربوط به جذب انرژی(هیسترزیس) برای سیستم مهاربندی الاکلنگی مجهز به میراگر ADAS 7L و مجهز به میراگر فلزی تسلیمی شکاف‌دار ارائه شده است.



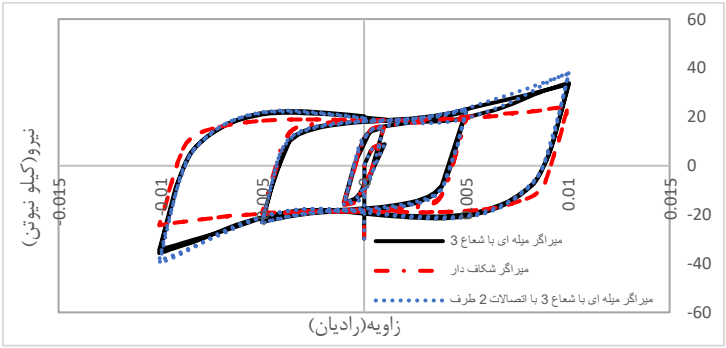
شکل ۷. مقایسه عملکرد سیستم مجهز به میراگر فلزی تسلیمی شکاف‌دار و سیستم مجهز به میراگر ADAS 7L
الف) نمودار های هیسترزیس ب) حداکثر نیرو ها.

با اعمال تغییر در میراگر ADAS باز هم نتایج بهتری نسبت به میراگر شکاف‌دار ثبت نشده ا ست. با توجه جدول ۲ می توان بیان کرد که با این که میزان مصالح مصرفی برای ساخت میراگر ADAS 7 بیش از ۲,۵ برابر حجم مصالح مصرفی برای میراگر شکاف‌دار بوده ا ست اما عملکرد این سیستم در ا ستهلاک انرژی تقریبا ۲۲ در صد کمتر از این میراگر بوده است.

جدول ۳. مقایسه مشخصات و عملکرد میراگر ADAS 7L و میراگر فلزی تسلیمی شکاف‌دار.

نوع میراگر	مقدار مصالح مصرفی (mm^2)	میزان استهلاک انرژی (n.mm)
میراگر ADAS 7L	۳۵۷۴۵	۲۵۵۹۲۷۶
فلزی شکاف‌دار	۱۳۷۰۱	۳۲۵۱۷۴۰

در شکل ۸ عملکرد سیستم مهاربندی الاکلنگی مجهز به میراگر فلزی تسلیمی با مقاطع دایره‌ای توپر(BAR) با عملکرد دو میراگر دیگر، مقایسه شده است.

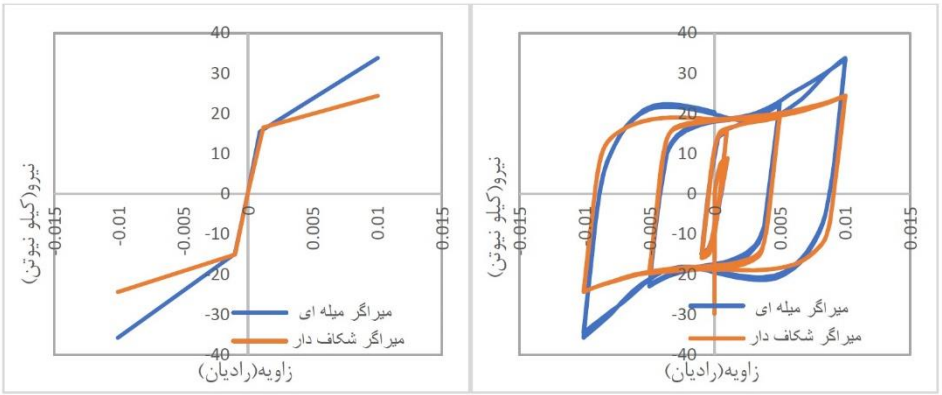


شکل ۸. عملکردرچرخه ای سیستم مهاربندی الاکلنگی مجهز به میراگر میله‌ای توپر (BAR) و میراگر فلزی تسلیمی شکاف‌دار و میراگر با مقاطع دایره‌ای توپر با پیکربندی تغییر یافته (BAR-CH).

نمودار هیسترزیس مربوط به مدل پیشنهادی گستردگی خوبی را نشان داده است. در کل باتوجه‌به مقایسه انجام شده بین نمودارهای هیسترزیس دو میراگر به نظر میراگر میله‌ای رفتار خوبی داشته است و این در حالی بوده است که مصالح مصرفی برای ساخت میله‌ها در این میراگر از مصالح مصرفی جهت ساخت ورق میانی در میراگر شکاف‌دار کمتر بوده است.

جهت برر سی اثرات تغییرهای انجام شده بر روی عملکرد سیستم، نمودار هیسترزیس مربوط به سیستم مهاربندی الاکلنگی مجهز به میراگر میله‌ای با پیکربندی جدید (BAR-CH) در مقایسه با سیستم مهاربندی الاکلنگی مجهز به میراگر BAR و سیستم مهاربندی الاکلنگی مجهز به میراگر فلزی تسلیمی شکاف‌دار آورده شده است. مقایسه بین نمودارهای هیسترزیس سیستم در دو حالت قبل و بعد از ایجاد تغییر در پیکربندی، نشان داده است ایجاد تغییرات در سیستم موجب کاهش گستردگی نمودار هیسترزیس میراگر فلزی تسلیمی میله‌ای در بعضی قسمت‌ها شده است. اما رفتار سیستم در سایر قسمت‌ها تغییر چندانی نداشته است و همچنان رفتار سیستم مجهز به میراگر فلزی تسلیمی میله‌ای تغییر پیکربندی داده شده (BAR-CH) در مقایسه با سیستم مجهز به میراگر فلزی تسلیمی شکاف‌دار تغییر زیادی نداشته است.

نمودارهای مربوط به مقایسه عملکرد سیستم مهاربندی الاکلنگی مجهز به میراگر BAR-CH و میراگر فلزی تسلیمی شکاف‌دار در شکل ۹ و جدول ۴ آورده شده است.



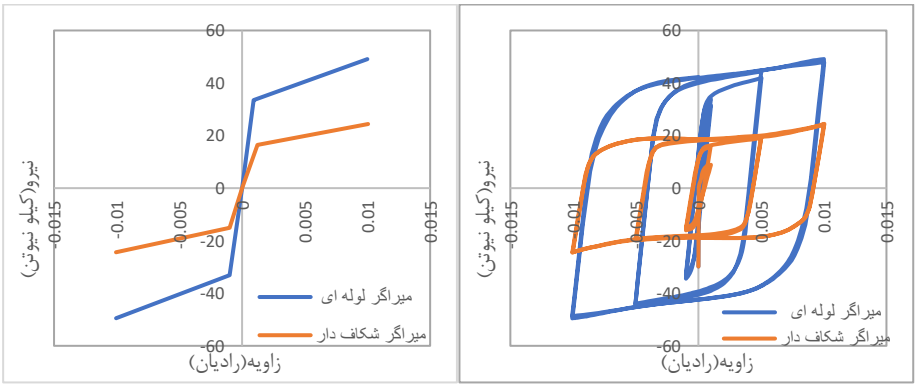
شکل ۹. مقایسه عملکرد سیستم مجهز به میراگر فلزی تسلیمی شکاف‌دار و سیستم مجهز به میراگر میله‌ای با شعاع ۳ تغییر پیکربندی یافته (BAR-CH) الف)بین نمودار های هیسترزیس ب)بین حداکثر نیرو ها.

جدول ۴. مقایسه مشخصات و عملکرد میراگر میله‌ای با شعاع ۳ تغییر پیکربندی یافته (BAR-CH) و میراگر فلزی تسلیمی شکاف‌دار.

نوع میراگر	مقدار مصالح مصرفی (mm^2)	میزان استهلاک انرژی (n.mm)
میله‌ای با شعاع ۳ تغییر پیکربندی یافته	۸۴۸۲	۳۳۴۶۵۱۳
فلزی شکاف‌دار	۱۳۷۰۱	۳۲۵۱۷۴۰

با توجه به جدول ۴، میراگر فلزی تسلیمی با مقاطع دایره‌ای توپر اگر چه با توجه به اطلاعات جدول بیش از ۳۸ درصد کاهش در مصالح مصرفی برای قسمت مستهلک کننده انرژی یعنی میله ها،به نسبت ورق میانی در میراگر فلزی تسلیمی شکاف‌دار داشته است اما در زمینه استهلاک انرژی بیش از ۲ درصد بهبود نسبت به میراگر فلزی تسلیمی شکاف‌دار ثبت کرده است. همچنین از نظر حداکثر نیرو نیز بهتر عمل کرده است.

عملکرد سیستم مهاربندی الاکلنگی مجهز به میراگر فلزی تسلیمی با مقاطع دایره‌ای توخالی با شعاع ۵ (PIPE 5) در شکل ۱۰ و جدول ۵ ارائه شده است.



شکل ۱۰. مقایسه عملکرد سیستم مجهز به میراگر فلزی تسلیمی شکاف‌دار و سیستم مجهز به میراگر لوله‌ای با شعاع ۵ الف)بین نمودار های هیسترزیس ب)بین حداکثر نیرو ها.

جدول ۵. مقایسه مشخصات و عملکرد میراگر لوله‌ای با شعاع ۵ و میراگر فلزی تسلیمی شکاف‌دار.

نوع میراگر	مقدار مصالح مصرفی (mm^2)	میزان استهلاک انرژی ($n.mm$)
لوله‌ای با شعاع ۵	۸۴۸۲	۶۶۶۴۵۸۴
فلزی شکاف‌دار	۱۳۷۰۱	۳۲۵۱۷۴۰

میراگر فلزی تسلیمی با مقاطع لوله‌ای اگر چه بیش از ۳۸ درصد کاهش در مصالح مصرفی برای قسمت مستهلک کننده انرژی یعنی لوله ها، به نسبت میراگر فلزی تسلیمی شکاف‌دار داشته است اما در زمینه استهلاک انرژی بیش از ۱۰۴ درصد بهبود نسبت به میراگر فلزی تسلیمی شکاف‌دار ثبت کرده است. میراگر تسلیمی پیشنهادی با مقاطع توپر توانسته است رفتار خوبی را نسبت به میراگر فلزی تسلیمی شکاف‌دار ثبت نماید. پیکربندی پیشنهادی توانسته است با مصالح برابر، عملکرد میراگر فلزی تسلیمی با مقاطع دایره‌ای توپر را به میزان قابل توجهی افزایش دهد.

عملکرد مدل‌های سیستم مهاربندی الاکلنگی مجهز به میراگرهای مختلف نسبت به مدل مجهز به میراگر فلزی تسلیمی شکاف‌دار در جدول ۶ آورده شده است.

جدول ۶. مقایسه عملکرد مدل‌های سیستم مهاربندی الاکلنگی مجهز به میراگرهای مختلف نسبت به مدل مجهز به میراگر فلزی تسلیمی شکاف‌دار.

نوع میراگر	درصد مصالح مصرفی نسبت به میراگر شکاف‌دار	درصد انرژی مستهلک شده نسبت به میراگر شکاف‌دار
ADAS 9L	۳۳۵,۴۳	۹۹,۶۵
ADAS 7L	۲۶۰,۸۹	۷,۷۸
میراگر فلزی تسلیمی با مقاطع دایره‌ای توپر	۶۱,۹۱	۱۰۲,۹۱
میراگر فلزی تسلیمی با مقاطع دایره‌ای توخالی با شعاع ۵	۶۱,۹۱	۲۰۴,۹۵

زمانی که سیستم مهاربند الاکلنگی به میراگر ADAS-7L مجهز شده است از لحاظ حداکثر نیروهای تحمل شده تفاوت چندانی با سیستم مجهز به میراگر فلزی تسلیمی شکاف‌دار بوده است ندا شته است؛ اما از لحاظ استهلاک انرژی نسبت به سیستم اولیه کاهش بیش از ۲۰ در صدی دا شته است. این عملکرد در حالی اتفاق افتاده است که نسبت مصالح مصرفی در قسمت مستهلک کننده انرژی نسبت به سیستم اولیه بیش از دو برابر بوده اســت. در مورد میراگر ADAS-9L می توان این نکته را بیان کرد که افزایش در نیرو های تحمل شــده نسبت به حالت اولیه مشاهده شده است، اما مقدار استهلاک انرژی با سیستم اولیه تقریبا برابر بوده است در حالی که نسبت مصالح مصرفی در قسمت مستهلک کننده انرژی نسبت به سیستم اولیه بیش از سه برابر بوده است. در مجموع میراگرهای ADAS علی رغم مصرف بیشتر مصالح در قسمت مستهلک کننده انرژی، رفتار مناسبی در استهلاک انرژی نشان نداده اند. در حالتی که میراگر میله‌ای در سیستم به کار گرفته شده است مقداری افزایش نیرو های تحمل شده در گوشه ها مشاهده می‌شود اما این افزایش در همه گوشه ها و همه قسمت‌ها نبوده است.

مقدار استهلاک انرژی در این میراگر تقریبا ۳ در صد نسبت به سیستم اولیه افزایش داشته است در حالی که مقدار مصالح مصرفی در قسمت مستهلک کننده انرژی نسبت به مدل اولیه کاهش تقریبا ۳۸ درصدی داشته است. زمانی که میراگر لوله‌ای در سیستم به کار گرفته شده است، مقدار نیرو های تحمل شده توسط سیستم و گستردگی حلقه های هیسترزیس به وضوح افزایش یافته است. همچنین مقدار استهلاک انرژی نسبت به سیستم اولیه تقریبا ۱۰۵ درصد افزایش یافته است، در حالی که مقدار مصالح مصرفی در قسمت مستهلک کننده انرژی برابر با مدل میله‌ای و تقریبا ۳۸ درصد کم تر از مدل اولیه بوده است. ازمجموع این موارد می توان تخمین زد که میراگر لوله‌ای می تواند رفتار مناسبی در سیستم مهاربندی الاکلنگی و سیستم‌های سازه ای مشابه داشته باشد.

نتایج

در این تحقیق یک میراگر جدید جهت استفاده در سیستم‌های مهاربند الاکلنگی پیشنهاد شده است. هدف اصلی از پیشنهاد سیستم الاکلنگی جدید، ارتقا ظرفیت لرزه‌ای سازه‌ها در زلزله‌های متوسط و شدید است. در سیستم پیشنهادی از دو نوع میراگر تسلیمی لوله‌ای و میله‌ای جدید استفاده شده است. رفتار لرزه‌ای سیستم پیشنهادی با سیستم‌های موجود مقایسه گردید.

پس از بررسی‌های انجام‌گرفته، این نتایج حاصل گردید که میراگرهای میله‌ای و لوله‌ای هر دو دارای ۳۸٪ مصالح مصرفی کمتر نسبت به میراگر شکاف‌دار بوده اند. میراگرهای پیشنهادی هر دو قابلیت استهلاک انرژی بیشتری نسبت به میراگر شکاف‌دار داشته اند. قابلیت استهلاک انرژی میراگر میله‌ای ۱۰۵٪ بیشتر از میراگر شکاف‌دار بوده است. رفتار چرخه ای مهاربند الاکلنگی با استفاده از میراگرهای پیشنهادی، عملکرد بهتری نسبت به میراگرهای موجود دارد.

فهرست منابع

[1]. Takewaki, I., Fujita, K., Yamamoto, K., & Takabatake, H. (2011). Smart passive damper control for greater building earthquake resilience in sustainable cities. *Sustainable Cities and Society, 1*(1), 3-15. https://doi.org/10.1016/j.scs.2010.08.002.

[2]. Saaed, T. E., Nikolakopoulos, G., Jonasson, J.-E., & Hedlund, H. (2015). A state-of-the-art review of structural control systems. *Journal of Vibration and Control, 21*(5), 919-937.https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/1077546313478294.

[3]. Khalili, M., Sivandi-Pour, A., & Farsangi, E. N. (2021). Experimental and numerical investigations of a new hysteretic damper for seismic resilient steel moment connections. *Journal of Building Engineering, 43*, 102811. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102811.

[4]. Gómez-Aguilar, J. F., Yépez-Martínez, H., Calderón-Ramón, C., Cruz-Orduña, I., Escobar-Jiménez, R. F., & Olivares-Peregrino, V. H. (2015). Modeling of a mass-spring-damper system by fractional derivatives with and without a singular kernel. *Entropy, 17*(9), 6289-6303. https://doi.org/10.3390/e17096289.

[5]. Goodarzi, M. J., & Moradi, M. (2023). Investigating the Effect of Random Variables on the Changes of IDA Curves in the Dual System of Steel Frames and Divergent Bracing. *20*(3), 571-593. https://doi.org/10.48301/kssa.2023.387489.2464.

[6]. Rasouli, S., & Latifi, M. k. (2022). Numerical Study of the Combination of Steel Shear Wall with Eccentric Bracing Under Cyclic Loads. *Karafan Quarterly Scientific Journal*, *19*(3). https://doi.org/10.48301/kssa.2022.299081.1689.(In Persian)

[7]. Tagawa, H., & Gao, J. (2012). Evaluation of vibration control system with U-dampers based on quasi-linear motion mechanism. *Journal of Constructional Steel Research*, *70*, 213-225. https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2011.09.004.

[8]. Kang, J. D., & Tagawa, H. (2013). Seismic response of steel structures with seesaw systems using viscoelastic dampers. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, *42*(5), 779-794. https://doi.org/10.1002/eqe.2244.

[9]. Kang, J.-D., & Tagawa, H. (2013). Seismic performance of steel structures with seesaw energy dissipation system using fluid viscous dampers. *Engineering Structures*, *56*, 431-442. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2013.05.015.

[10].Tagawa, H., Yamanishi, T., Takaki, A., & Chan, R. W. (2016). Cyclic behavior of seesaw energy dissipation system with steel slit dampers. *Journal of Constructional Steel Research*, *117*, 24-34. https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2015.09.014.

[11]. Fanaie, N., Aghajani, S., & Afsar Dizaj, E. (2016). Strengthening of moment-resisting frame using cable–cylinder bracing. *Advances in structural engineering*, *19*(11), 1736-1754. https://doi.org/10.1177/1369433216649382.

[12]. Mehrabi, M., Ibrahim, Z., Ghodsi, S., & Suhatril, M. (2019). Seismic characteristics of X-cable braced frames bundled with a pre-compressed spring. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, *116*, 732-746. https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2018.10.014.

[13]. Gao, N., Jeon, J.-S., Hodgson, D. E., & DesRoches, R. (2016). An innovative seismic bracing system based on a superelastic shape memory alloy ring. *Smart materials and structures*, *25*(5), 055030. https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0964-1726/25/5/055030/meta.

[14]. Speicher, M. S., DesRoches, R., & Leon, R. T. (2017). Investigation of an articulated quadrilateral bracing system utilizing shape memory alloys. *Journal of Constructional Steel Research*, *130*, 65-78. https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2016.11.022.

[15]. Kang, J.-D., & Mori, Y. (2017). Simplified estimation method of inelastic seismic demands of buildings with seesaw system using fluid viscous dampers. *Engineering Structures*, *138*, 120-130. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.01.050.

[16]. Naeem, A., & Kim, J. (2018). Seismic retrofit of a framed structure using damped cable systems. *Steel Compos. Struct*, *29*(3), 287-299. https://doi.org/10.12989/SCS.2018.29.3.287.

[17]. Naeem, A., & Kim, J. (2018). Seismic performance evaluation of a spring viscous damper cable system. *Engineering Structures*, *176*, 455-467. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.09.055.

[18]. Zhang, A.-l., Liu, X.-c., Wang, Y., Shang, Z.-x., Yu, C., & Bai, Z.-x. (2020). Seismic behavior of an X-deployed cable-braced bolt-assembly steel frame. *Journal of Constructional Steel Research*, *170*, 106132. https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2020.106132.

[19]. Katsimpini, P. S., Askouni, P. K., Papagiannopoulos, G. A., & Karabalis, D. L. (2020). Seismic drift response of seesaw-braced and buckling-restrained braced steel structures: a comparison study. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, *129*, 105925. https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2019.105925.

[20]. Song, Y.-s., Guo, T., Wang, J.-s., Xuan, W.-h., & Chen, Y.-z. (2020). Seismic fragility evaluation of SCCB-enhanced RC frame structures. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, *34*(4), 04020051. https://doi.org/10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0001450.

[21]. Hashemi, A., Bagheri, H., Zarnani, P., & Quenneville, P. (2021). Seismic performance of friction-damped steel frames integrated with resilient tension-only braces. *Journal of Constructional Steel Research*, *176*, 106381. https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2020.10638.

[22]. Moradi, R., & Khalilzadeh Vahidi, E. (2021). Moradi, R., & Khalilzadeh Vahidi, E. (2021). General Study of New Ideas and Practical of Friction Dampers for Passive Vibration Control of Structures. *Karafan Quarterly Scientific Journal*, *17*(4). https://doi.org/10.48301/kssa.2021.126575.(In Persian)

[23]. Sorace, S., & Terenzi, G. (2012). The damped cable system for seismic protection of frame structures—Part I: General concepts, testing and modeling. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, *41*(5), 915-928. https://doi.org/10.1002/eqe.1166.

[24]. Martelli, A., Arato, G., Bertocchi, A., Forni, M., Indirli, M., Poggianti, A., Spadoni, B., Venturi, G., Bongiovanni, G., & Clemente, P. (2001). The contribution of ENEA to the development of innovative techniques for improving the seismic protection of civil and industrial structures. Proceedings of the 5th World Congress on Joints, Bearings and Seismic Systems for Concrete Structures, Rome, Italy, https://www.academia.edu/download/41918539/The_contribution_of_ENEA_to_the_developm20160202-17309-pi8l9t.pdf.

[25]. Ru, Y., He, L., & Jiang, H. (2022). Study on a new type of beam-column joint equipped with inclined tapered steel plates. *Journal of Building Engineering*, *45*, 103581. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103581.