Sharif Civil Engineering Journal (2026), **41**(4), 97-107

Sharif University of Technology

Sharif Civil Engineering Journal

https://sjce.journals.sharif.edu



Research Note

Sensitivity Analysis of Energy Dissipation in a Yielding Damper with Cantilever Bars

Saeed Reza Sabbagh Yazdi, Mostafa Rezvani Sharif* and Reza Zakibakhsh Mohammadi

Faculty of Civil Engineering of K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran.
* corresponding author:(rezvanisharif@kntu.ac.ir)

Article Info

Article history:

Received: 30 November 2024

Revised: 10 March 2025

Accepted: 11 March 2025

Keywords:

Energy dissipation,
yielding damper,
cantilever bar damper,
isolated structure.

Abstract

Seismic isolators serve a vital function in mitigating structural damage resulting from lateral loads and in diminishing the forces exerted upon the structure. In structures that are isolated, the displacement may experience a substantial increase, which, in the case of bridges, could potentially result in the collapse of the deck from its supports. In addition, isolator systems may have low energy absorption capacity. Controlling displacement and ensuring adequate energy dissipation in isolated structures under wind and earthquake loads proves the importance of incorporating devices like energy dampers alongside seismic isolators. Yielding dampers are a category of dampers recommended in previous research, which are produced in various types. These dampers utilize the inelastic deformation of ductile metals to dissipate the energy. One effective type of damper for energy dissipation in isolated structures is the bar-shaped damper with cantilever bars. In these dampers, the bars are positioned vertically, so that energy is dissipated regardless of the direction. The energy-absorbing elements in these dampers are the cantilever bars, with one end connected to the substructure and the other to the isolated structure. As relative displacement occurs between the substructure and isolated structure, the bars undergo bending and enter the plastic deformation range, so that dissipating earthquake energy occurs. The behavior of these dampers is influenced by parameters such as bar diameter, bar length, number of bars, and bar yield stress. Hence, determining the effect of each parameter on damper performance is crucial for selecting a suitable damper. In this study, after modeling a bar damper with a cantilever bar in the ABAQUS finite element software, the effect of changes in each of these parameters on the damper's energy dissipation was analyzed. The results demonstrate that energy dissipation in this damper is most sensitive to changes in bar diameter, followed by the number of bars, bar length, and bar yield stress.

Funding: This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

Author Contributions: All authors contributed to the reported work for conceptualization, methodology, validation, writing-review and editing, and supervision.

To Cite this article:
Sabbagh Yazdi, S.R, Rezvani Sharif, M. and Zakibakhsh Mohammadi, R. 2026. Sensitivity analysis of energy dissipation in a yielding damper with cantilever bars, Sharif Civil Engineering Journal, **41**(4), 97-107.
https://doi.org/10.24200/j30.2025.65775.3392

E-ISSN: 2676-4776 © 2026 The Author(s). Sharif Civil Engineering Journal, Published by Sharif University of Technology

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license.

مجله علمی مهندسی عمران شریف

https://sjce.journals.sharif.edu

یادداشت فنی

تحلیل حساسیت اتلاف انرژی در میراگر تسلیم‌شونده با میله‌های کنسولی

سعیدرضا صباغ یزدی، مصطفی رضوانی شریف * و رضا ذکی‌بخش محمدی

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران.

*نویسنده مسئول (rezvanisharif@kntu.ac.ir)

اطلاعات مقاله

تاریخ دریافت : ۱۴۰۳/۰۹/۱۰

تاریخ اصلاحیه : ۱۴۰۳/۱۲/۲۰

تاریخ پذیرش : ۱۴۰۳/۱۲/۲۱

واژگان کلیدی:

اتلاف انرژی،

میراگر تسلیم‌شونده،

میراگر میله‌ای کنسولی،

سازه‌ی جداسازی‌شده.

چکیده

کنترل مقدار جابجایی و ضرورت اتلاف انرژی مناسب در سازه‌های جداسازی‌شده، که تحت اثر باد و زلزله هستند، نمایانگر اهمیت استفاده از تجهیزاتی، نظیر میراگرهای تسلیم‌شونده در کنار جداساز لرزه‌ای است. میراگرهای تسلیم‌شونده‌ی میله‌ای با میله‌های کنسولی، با توجه به نحوه‌ی قرارگیری میله‌ها، توانایی اتلاف انرژی در جهات مختلف را دارند و برای استفاده در کنار جداسازهای لرزه‌ای مؤثر هستند. رفتار میراگرهای مذکور متأثر از مؤلفه‌هایی، نظیر: قطر میله، طول میله، تعداد میله، و تنش تسلیم (مصالح) میله است. در پژوهش حاضر، پس از مدل‌سازی یک میراگر میله‌ای با میله‌ی کنسولی در نرم‌افزار اجزاء محدود آباکوس، اثر ایجاد تغییر در هر یک از مؤلفه‌های اخیر در میزان اتلاف انرژی میراگر بررسی شده است. نتایج پژوهش حاضر نشان داده‌اند که اتلاف انرژی در میراگر میله‌ای کنسولی، بیشترین حساسیت را به ترتیب نسبت به مؤلفه‌های قطر میله، تعداد میله، طول میله، و تنش تسلیم میله دارد.

۱. مقدمه

با توجه به احتمال وقوع حوادثی، نظیر زلزله‌های شدید و در نتیجه بروز خسارت‌های جانی و مالی، لازم است سازه‌ها توانایی مقابله با بارهای جانبی ناشی از حوادث اخیر را داشته باشند. یکی از روش‌هایی که جهت کاهش آثار نیروهای جانبی نظیر زلزله در سازه‌ها به‌کار می‌رود، استفاده از جداساز لرزه‌ای است؛ که مانع از انتقال بخش زیادی از شتاب ناشی از زلزله از زیرسازه به سازه‌ی جداسازی‌شده می‌شود. با این حال، میرایی سیستم‌های جداساز عموماً کم است و استفاده از روش اخیر ممکن است منجر به مشکلاتی نظیر جابجایی بیش از حد در سازه‌ی جداسازی‌شده شود. در سازه‌های ساختمانی جداسازی‌شده، به‌دلیل محدودیت‌هایی، نظیر حفظ فاصله از ساختمان‌های مجاور لازم است مقدار جابجایی سازه محدود شود. در پل‌ها نیز، جابجایی بیش از حد عرشه ممکن است موجب سقوط عرشه از پایه‌های پل شود؛ بنابراین کنترل جابجایی در سازه‌های جداسازی‌شده امری ضروری است.

یکی از روش‌هایی که برای افزایش میزان اتلاف انرژی و محدودکردن مقدار جابجایی در سازه‌های جداسازی‌شده استفاده می‌شود، نصب میراگرهایی نظیر میراگرهای تسلیم‌شونده در کنار جداساز لرزه‌ای است. در این راستا، واثقی[1] (۲۰۱۱)،[1] استفاده از میراگر فلزی جاری‌شونده را به جای بلوک‌های برشی معمولی، جهت کنترل نیروی عرضی ناشی از زلزله در پل‌ها پیشنهاد کرده است. کلید برشی پیشنهادی متشکل از چند صفحه‌ی فولادی X شکل موازی بوده است، که به یک صفحه‌ی فولادی مستطیلی در پایین و به یک عضو فولادی در بالا متصل می‌شدند. در میراگر ذکرشده، جابجایی‌های جانبی روسازه در هنگام زلزله باعث ایجاد بارهای چرخه‌ای در ورق‌های X شکل و استهلاک انرژی زلزله شده است.

دیکلی و میلانی[2] (۲۰۱۵)،[2] میراگر هیسترزیس پیچشی چند جهته (MTHD)[3] را برای حفاظت لرزه‌ای پل‌ها ارائه کرده‌اند. عملکرد میراگر MTHD براساس تسلیم پیچشی هسته‌های استوانه‌ای فولادی بوده است. سیستم مذکور سختی پس الاستیک داشته است، که در محدودکردن جابجایی جانبی عرشه‌ی جداسازی‌شده‌ی لرزه‌ای در نزدیک گسل مؤثر بوده است.

ژیانگ و لی[4] (۲۰۱۶)،[3] عملکرد لرزه‌ای سه وسیله‌ی کنترل جابجایی پل (کلید برشی بتنی، میراگر فلزی تسلیم‌شونده، و میراگر اصطکاکی) را بررسی کرده و دریافته‌اند که اگر از هیچ وسیله‌ای برای کنترل حرکت‌های پل استفاده نشود، لغزش بین شاه‌تیر و تکیه‌گاه لاستیکی صورت می‌گیرد و تکیه‌گاه لاستیکی مانند جداساز برای پایه‌ی پل عمل می‌کند؛ اما این مسئله در تغییرشکل‌های بزرگ ممکن است منجر به سقوط عرشه‌ی پل شود. همچنین مشخص شده است که میراگرهای تسلیم‌شونده به‌علت سخت‌شوندگی کرنشی، منجر به جابجایی پسماند کوچک‌تر در تکیه‌گاه‌های لاستیکی نسبت به سایر روش‌ها

[1] Vasseghi
[2] Dicleli & Milani
[3] Multi-directional Torsional Hysteretic Damper
[4] Xiang & Li

استناد به این مقاله:

صباغ یزدی، سعیدرضا، رضوانی شریف، مصطفی و ذکی‌بخش محمدی، رضا، ۱۴۰۴. تحلیل حساسیت اتلاف انرژی در میراگر تسلیم‌شونده با میله‌های کنسولی . مهندسی عمران شریف، ۴۱(۴)، صص.۹۷-۱۰۷. https://doi.org/10.24200/j30.2025.65775.3392

حق مولف © نویسندگان

ناشر: دانشگاه صنعتی شریف

شاپا الکترونیکی: ۲۶۷۶-۴۷۷۶

می‌شوند. استفاده از میراگرهای تسلیم‌شونده و میراگرهای اصطکاکی به همراه تکیه‌گاه‌های لاستیکی باعث بهبود عملکرد لرزه‌ای پل شده است.

شن[1] و همکاران (۲۰۱۷)،[۴] میراگر فولادی عرضی (TSD)[2] را جهت استفاده کنار تکیه‌گاه لغزشی در پل‌ها با دهانه‌ی بلند ارائه کرده‌اند؛ که متشکل از چند صفحه‌ی فولادی مثلثی با نیمکره‌های فولادی در بالای ورق بوده است. نیمکره‌ها، علاوه‌بر فراهم‌کردن امکان حرکت آزاد پل در جهت طولی سبب شده‌اند که حرکت پل در جهت عرضی در مسیر قابل‌اعتماد صورت گیرد. در سیستم ذکرشده، بیشتر انرژی توسط ورق‌های TSD مستهلک می‌شود و سهم تکیه‌گاه‌های لاستیکی ناچیز است. ژو[3] و همکاران (۲۰۱۹)،[۵] جهت بررسی کارایی میراگر TSD بر روی پل کابلی با دهانه‌ی بلند تحت اثر زلزله‌های نزدیک و دور از گسل، آزمایش‌هایی را روی یک پل کابلی با دهانه‌ی ۱ کیلومتر و با مقیاس ۱:۳۵ با استفاده از میزلرزه انجام داده و دریافته‌اند که استفاده از میراگر TSD، تقاضای جابجایی عرضی و انحنا در امتداد ستون‌های برج را کاهش می‌دهد.

حائری و همکاران (۲۰۱۹)،[۶] یک جداساز ترکیبی متشکل از تکیه‌گاه الاستومری و قطعات لغزنده و میراگرهای تسلیم‌شونده را ارائه کرده‌اند؛ که در آن، قسمت جاری‌شونده از ورق‌های X شکل تشکیل شده است. نیروی اصطکاک ناشی از لغزش صفحات فولادی در سیستم مذکور، میرایی را در کرنش‌های برشی کم و متوسط فراهم کرده است، در حالی که ورق‌های میراگر تسلیم‌شونده (ADAS)[4] به‌عنوان یک سیستم جاذب انرژی در کرنش‌های برشی بالا در نظر گرفته شده‌اند.

در میراگرهای تسلیم‌شونده، قابلیت تعویض‌پذیری عضو جاذب انرژی پس از تجربه‌ی زلزله حائز اهمت بسیاری است. لذا لازم است عضو جاذب انرژی به نحوی انتخاب شود که به‌راحتی بتوان آن را تعویض کرد. اعضاء میله‌ای با توجه به شکل ساده و قابلیت تعویض‌پذیری خود در بسیاری از پژوهش‌ها به‌عنوان عضو جاذب انرژی در نظر گرفته شده‌اند. براساس نحوه‌ی عملکرد و شکل تحلیلی میراگرهای تسلیم‌شونده، آن‌ها را می‌توان به این صورت تقسیم‌بندی کرد: ۱) میله‌های یک سر گیردار- یک سر گیردار لغزنده؛ ۲) میله‌های دو سر گیردار؛ ۳) میله‌های دو سر مفصل؛ ۴) میله‌های کنسولی.

در میراگرهای با میله به‌صورت یک سر گیردا – یک سر گیردار لغزنده، با توجه به دیاگرام لنگر خمشی، مقدار لنگر در دو سر میله، به میزان بیشینه است؛ بنابراین، در میله‌هایی که در آن‌ها از روش اخیر جهت استهلاک انرژی استفاده می‌شود، محدوده‌ی دو انتهای میله وارد محدوده‌ی تغییرشکل‌های پلاستیک می‌شوند و انرژی ورودی را مستهلک می‌کنند. در این راستا، فهیم‌پور و عباس‌نیا[5] (۲۰۰۸)،[۷] تأثیر قرارگیری میله در محل اتصال مهاربند به ورق اتصال گوشه را به‌عنوان عضو شکل‌پذیر بررسی کرده‌اند. بنی‌شیخ‌الاسلام[6] و همکاران (۲۰۱۶)،[۸] نیز استفاده از میله‌های مذکور را در محل اتصال تیر به ستون به‌عنوان عضو جاذب انرژی بررسی کرده‌اند.

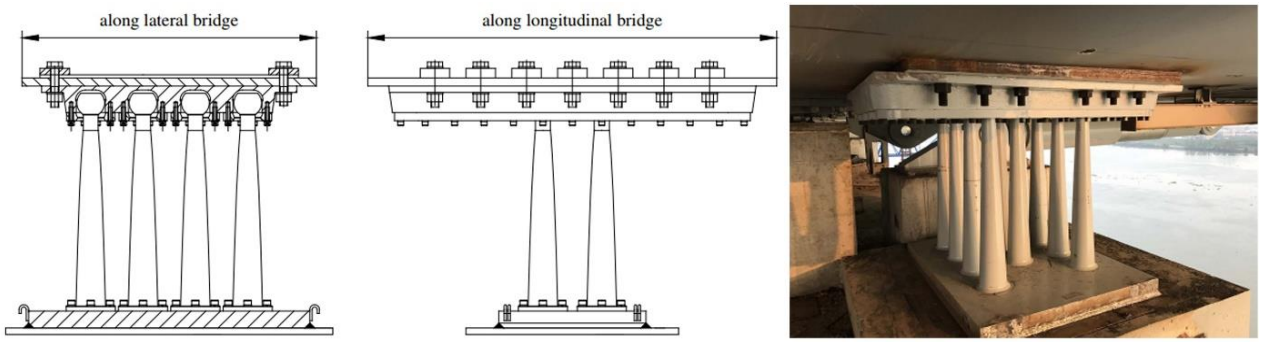
در میراگرهای با میله‌ی دو سر گیردار تحت جابجایی وسط دهانه، براساس دیاگرام لنگر خمشی میله، مقدار لنگر در دو سر میله و وسط دهانه به میزان بیشینه است؛ بنابراین، میله‌های دو سر گیردار، در محدوده‌ی وسط دهانه و دو انتهای خود وارد محدوده‌ی تغییرشکل‌های پلاستیک می‌شوند و انرژی را تلف می‌کنند. در این راستا، گلزن[7] و همکاران (۲۰۱۷)،[۹] از میراگر هیسترزیس تشکیل‌شده از میله‌های فولادی به‌صورت افقی، به‌عنوان میراگر کمکی برای جداسازهای الاستومری در پل‌ها استفاده و یک روش ساده‌شده برای طراحی آن‌ها ارائه کرده‌اند. آغلار[8] و همکاران (۲۰۱۸)،[۱۰ و ۱۱] از میله و لوله به‌صورت دو سر گیردار به‌عنوان عضو جاذب انرژی در مهاربندهای همگرا استفاده کرده‌اند.

در میراگرهای با میله به‌صورت دو سر مفصل، براساس دیاگرام لنگر خمشی، مقدار لنگر در وسط میله به میزان بیشینه و در دو سر آن صفر است. لذا، در روش اخیر، میله‌های مخروطی جهت ثابت نگه‌داشتن انحنا و استفاده‌ی بیشینه از مصالح به‌کار برده می‌شود. در این راستا، لیو[9] و همکاران (۲۰۲۳)،[۱۲] سیستم عملکرد یکپارچه‌ی تکیه‌گاه و میراگر استوانه‌ای فولادی (FICSDB)[10] را ارائه کرده‌اند؛ که ویژگی‌های خاصی مانند جداسازی لرزه‌ای، اتلاف انرژی، و محدودیت جابجایی را در خود جای داده است. در سیستم ذکرشده، استهلاک انرژی توسط میله‌های مخروطی دو سر مفصل انجام می‌گیرد.

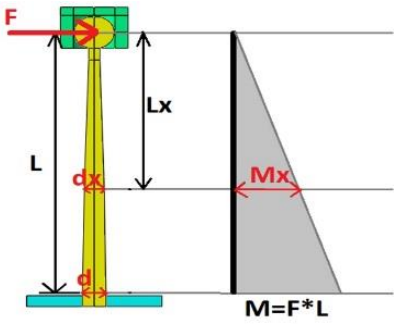
در میراگرهای با میله‌های کنسولی، براساس شکل تحلیلی و دیاگرام لنگر خمشی، مقدار لنگر در انتهای گیردار میله، به میزان بیشینه و در سر آزاد میله صفر بوده است. لذا در روش اخیر از میله‌های مخروطی، جهت ثابت نگه‌داشتن انحنا و ظرفیت کل عضو استفاده می‌شود. در این راستا، چیاروتو[11] و همکاران (۲۰۰۴)،[۱۳] از میله‌های مخروطی کنسولی در کنار جداساز لرزه‌ای در پل استفاده کرده‌اند. زلاتکو[12] و همکاران (۲۰۲۲)،[۱۴] نیز میراگر لرزه‌ای چندسطحی چندجهته را معرفی کرده‌اند؛ که از یک بیس‌پلیت متصل به فونداسیون، دو گروه اعضاء عمودی با مقطع دایره‌ای به‌صورت مخروطی، و یک صفحه‌ی فعال‌کننده‌ی میانی متصل به سازه‌ی جداسازی‌شده تشکیل شده است. در هنگام زلزله، صفحه‌ی فعال‌کننده‌ی فولادی میانی به همراه سازه‌ی اصلی حرکت می‌کند و باعث خمش اجزاء عمودی می‌شود؛ و تغییرشکل پلاستیک اعضاء مذکور موجب استهلاک انرژی می‌شود. هو[13] و همکاران (۲۰۲۳)،[۱۵] برای کاهش ارتعاش طولی پل‌های معلق راه‌آهن، یک سیستم میراگر ترکیبی ویسکوز- فولادی (CVSDS)[14] ارائه کرده‌اند؛ که در آن، قسمت ویسکوز در هنگام تغییر دما، ترمز قطار، و زلزله‌های خفیف و قسمت فولادی در زلزله‌های شدید عمل می‌کند. همچنین، در سیستم CVSDS از میله‌های کنسولی به‌عنوان عضو جاذب انرژی استفاده شده است.

میراگرهای میله‌ای با میله‌های کنسولی با توجه به نحوه‌ی قرارگیری میله‌ها در آن‌ها، قابلیت اتلاف انرژی زلزله در جهت‌های مختلف را دارند. مؤلفه‌های مختلفی می‌توانند در عملکرد میراگرهای اخیر و میزان اتلاف انرژی توسط آن‌ها

[1] Shen
[2] Transverse Steel Damper
[3] Zhou
[4] Added Damping And Stiffnes
[5] Fahimpour & Abbasnia
[6] Banisheikholeslami
[7] Golzan
[8] Aghlara
[9] Liu
[10] Functionally Integrated Cylindrical Steel Damper Bearing
[11] Chiarotto
[12] Zlatkov
[13] Hu
[14] Combined Viscous-Steel Damping System



شکل ۱. میراگر تسلیم‌شونده با میله‌های کنسولی.[۱۶]



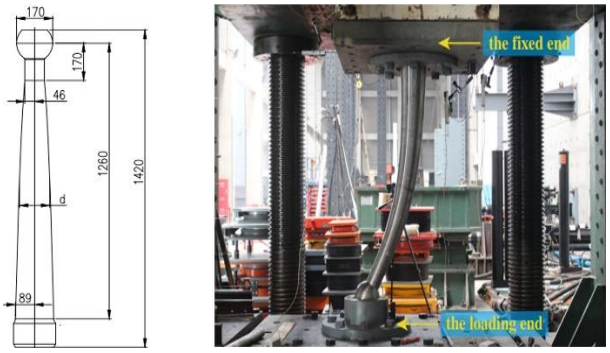
شکل ۲. دیاگرام لنگر خمشی در طول میله.

مؤثر باشند. لذا تحلیل حساسیت بر روی مؤلفه‌های مختلف در انتخاب میله‌های مناسب، اهمیت زیادی دارد. در پژوهش حاضر تلاش شده است با انجام تحلیل حساسیت بر روی مؤلفه‌های مؤثر در رفتار میراگرهای میله‌ای با میله‌های کنسولی با استفاده از نرم‌افزار آباکوس، وابستگی اتلاف انرژی به هر مؤلفه آشکار شود. در واقع، هدف از انجام پژوهش حاضر، شناخت بیشتر رفتار میراگرهای میله‌ای با میله‌های کنسولی و آشکارسازی میزان وابستگی اتلاف انرژی نسبت به مؤلفه‌های متغیر و کمک به طراحان جهت انتخاب راحت‌تر هر مؤلفه بوده است.

۲. معرفی میراگر مورد پژوهش

مطابق شکل ۱، در میراگرهای با میله‌های کنسولی، میله‌ها به‌صورت عمودی در کنار جداساز لرزه‌ای قرار می‌گیرند. لذا میله‌های کنسولی بدون توجه به جهت ارتعاش می‌توانند انرژی‌های ورودی ناشی از زلزله را مستهلک کنند. در میراگرهای با میله‌های کنسولی، قسمت پایین میله‌ها به زیرسازه و قسمت بالای آن‌ها به‌وسیله‌ی یک تکیه‌گاه مفصلی به سازه‌ی جداسازی‌شده متصل می‌شود. به این ترتیب با ایجاد جابجایی نسبی بین سازه‌ی جداسازی‌شده و زیرسازه‌ی میله‌ها تحت خمش قرار می‌گیرد و با ورود به محدوده‌ی تغییرشکل‌های غیرالاستیک، انرژی زلزله را مستهلک می‌کنند.

میراگرهای میله‌ای با میله‌های کنسولی، انرژی زلزله را از طریق مکانیزم خمشی مستهلک می‌کنند. مطابق شکل ۲، در آن‌ها مقدار لنگر خمشی در انتهای گیردار میله به میزان بیشینه و در انتهای آزاد آن صفر است؛ بنابراین جهت استفاده‌ی بهینه از میله و ایجاد تسلیم هم‌زمان در سراسر آن، از میله با مقطع متغیر (میله‌ی مخروطی) استفاده شده است. نحوه‌ی کاهش قطر میله به نحوی انتخاب شده است که انحنا در طول میله ثابت باشد؛ به این ترتیب، کل میله به‌صورت هم‌زمان به تنش تسلیم می‌رسد.



شکل ۳. میراگر میله‌ای کنسولی تحت آزمایش چرخه‌ای.

۳. راستی‌آزمایی مدل‌سازی

به‌منظور تأیید نحوه‌ی مدل‌سازی و توانایی مدل‌های عددی در نمایش رفتار میراگر، لازم است ابتدا مدل‌های عددی با نمونه‌های آزمایشگاهی راستی‌آزمایی شوند. برای این منظور، از پژوهش آزمایشگاهی انجام‌شده توسط گائو و وانگ[۱۵] (۲۰۲۰)،[۱۶] استفاده شده است.

مطابق شکل ۳، در آزمایش انجام‌شده از یک میله به شعاع بیشینه‌ی ۸۹ میلی‌متر و طول ۱۴۲۰ میلی‌متر، به‌عنوان عضو جاذب انرژی استفاده شده است. نیروی طراحی برای آزمایش اخیر، ۲۵۰ کیلونیوتن و جابجایی هدف، ۳۰۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. میله‌ی مذکور با استفاده از یک صفحه در بالا و یک صفحه در پایین آن و با استفاده از پیچ‌ومهره‌ی پُرمقاومت به دستگاه آزمایش متصل شده است. در طول آزمایش، قسمت بالایی میله، ثابت و پایین آن تحت بارگذاری قرار گرفته است. میراگر ذکرشده ابتدا تحت بارگذاری چرخه‌ای با ۵ سیکل تحت ۰/۲۵ برابر جابجایی هدف، ۵ سیکل تحت ۰/۵ برابر جابجایی هدف، و ۱۰ سیکل تحت جابجایی هدف و با متوسط نرخ بارگذاری ۲ میلی‌متر بر ثانیه قرار گرفته است. پس از پایان آزمایش، مشاهده شد که هیچ شکستگی یا ترکی در میله و سایر اجزاء اتصال رخ نداده است.

جهت بررسی بیشتر رفتار میراگر میله‌ای کنسولی، دو آزمایش دیگر با سرعت‌های مختلف و با دامنه‌ی ۳۰۰ میلی‌متر تا لحظه‌ی شکست میله انجام شده و نتایج آزمایش نشان داده است که میراگرها تحت دو نوع بارگذاری با سرعت‌های مختلف توانسته‌اند ۴۱ و ۵۲ سیکل با دامنه‌ی ۳۰۰ میلی‌متر را علاوه‌بر بارگذاری قبلی تحمل کنند.

جهت انجام راستی‌آزمایی، ابتدا یک میله‌ی مشابه آزمایش در نرم‌افزار آباکوس مدل‌سازی شده است. مصالح میله، مطابق نوشتار گائو و وانگ (۲۰۲۰)،[۱۶]

[15] Gao & Wang

Steel345 در نظر گرفته شده است. برای مدل‌سازی مصالح از مدل دوخطی با سخت‌شوندگی ترکیبی[16] (ترکیبی از سخت‌شوندگی ایزوتروپیک و سینماتیک) استفاده شده است. به‌علت ذکرنکردن اطلاعات مربوط به مصالح، با توجه به استاندارد EAD (۲۰۱۵)،[17] و ضخامت میله، تنش تسلیم میله، تنش و کرنش گسیختگی به ترتیب ۲۷۵ مگاپاسکال، ۵۵۰ مگاپاسکال، و ۰/۱۸ در نظر گرفته شده‌اند. برای درنظرگرفتن آثار سخت‌شوندگی از سخت‌شوندگی چرخه‌ای[17] استفاده شده است. ضرایب سخت‌شوندگی مصالح با استفاده از آزمون و خطا در جدول ۱ ارائه شده‌اند.

پس از مدل‌سازی و اعمال بارگذاری، منحنی هیسترزیس در شکل ۴ مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، منحنی هیسترزیس انطباق خوبی با منحنی حاصل از بررسی تجربی و نیز بررسی عددی گائو و وانگ (۲۰۲۰)،[16] دارد؛ بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که مدل‌سازی انجام‌شده می‌تواند جهت بررسی رفتار میراگر مناسب باشد.

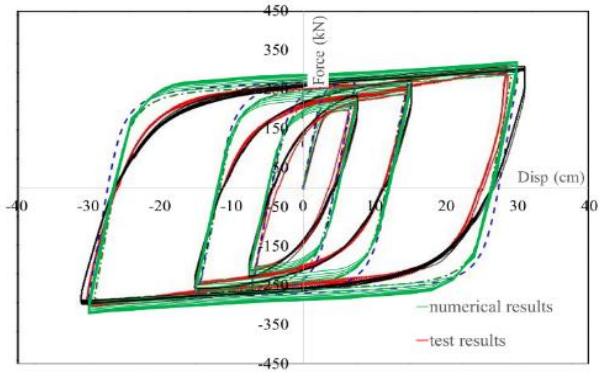
مقادیر کرنش برای نمونه‌های آزمایشگاهی در مرجع اخیر،[16] ذکر نشده است؛ با این حال مقادیر کرنش پلاستیک معادل (PEEQ)[18] برای مدل تحت بارگذاری اول و مدل تحت بارگذاری تا لحظه‌ی گسیختگی، در مدل راستی‌آزمایی به ترتیب ۱/۴ و ۷/۳۷ به‌دست آمده است.

۴. مطالعه‌ی عددی

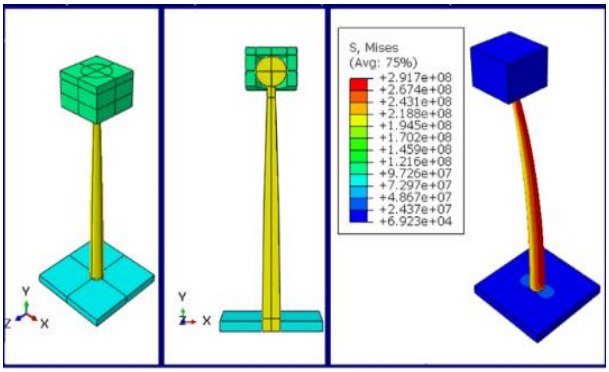
جهت بررسی عملکرد میراگر میله‌ای با میله‌های کنسولی، ۱۴ مدل مختلف در نرم‌افزار آباکوس مدل‌سازی شده‌اند. برای تشخیص اثر تغییر مؤلفه‌های مختلف در رفتار میراگر، ابتدا یک میله به طول ۱ متر، قطر ۷ سانتی‌متر (قطر قسمت انتهای گیردار میله)، و تنش تسلیم ۲۱۵ مگاپاسکال (فولاد S235) مطابق شکل ۵ مدل‌سازی شده است، سپس مؤلفه‌های مختلف مطابق جدول ۲ افزایش یافته و تأثیر عوامل مختلف در میزان اتلاف انرژی، میرایی ویسکوز معادل یا میرایی مؤثر (ζ_{eq})، و سختی مؤثر (K_{eff}) مقایسه شده‌اند.

جدول ۱. ضرایب سخت‌شوندگی در نظر گرفته‌شده در مدل‌سازی عددی مدل راستی‌آزمایی.

Equivalent stress (MPa)	Q-infinity	Hardening parameter b
275	140	5



شکل ۴. مقایسه‌ی منحنی هیسترزیس راستی‌آزمایی و مدل آزمایشگاهی.



شکل ۵. نحوه‌ی مدل‌سازی میله‌ی کنسولی در نرم‌افزار آباکوس.

جدول ۲. ابعاد مدل‌ها.

Model number	*Variable*	*Diameter (cm)*	*Length (cm)*	*Yield stress (MPa)*	*Number*	*Variable Change(%)*
1	Base model	7	100	215	1	-
2	Diameter (d)	7.98	100	215	1	14%
3		8.75	100	215	1	25%
4		10.5	100	215	1	50%
5		12.25	100	215	1	75%
6		14	100	215	1	100%
7	Length (L)	7	114	215	1	14%
8		7	125	215	1	25%
9		7	150	215	1	50%
10		7	175	215	1	75%
11		7	200	215	1	100%
12	Yield stress (fy)	7	100	245.1	1	14%
13		7	100	322.5	1	50%
14	Number (n)	7	100	215	2	100%

[16] combined
[17] cyclic hardening
[18] Equivalent plastic strain

جدول ۳. مشخصات مصالح فولاد S235.

σ_y (MPa)	σ_u (MPa)	ε_u	Equivalent stress (MPa)	Q-infinity	Hardening parameter b
215	435	0.25	215	80	**5**

میرایی مؤثر، رفتار یک سیستم غیرخطی را با یک سیستم خطی با میرایی ویسکوز معادل‌سازی می‌کند. رایج‌ترین روش برای تعریف میرایی ویسکوز معادل، معادل‌سازی انرژی تلف‌شده در یک چرخه‌ی ارتعاش سازه‌ی واقعی و یک سیستم ویسکوز معادل است. نسبت میرایی ویسکوز معادل (ζ_{eq}) مطابق رابطه‌ی ۱ به‌دست می‌آید:[۱۸]

$$\xi_{ed} = \frac{1}{4\pi}\frac{E_D}{E_{S0}} \quad (1)$$

که در آن، E_D انرژی مستهلک‌شده در یک حلقه‌ی کامل بارگذاری و E_{S0} انرژی ذخیره‌شده توسط یک فنر الاستیک با بیشینه ی نیرو و جابجایی حلقه‌ی موردنظر است. مقدار E_{S0} مطابق رابطه‌ی ۲ به دست می‌آید:

$$E_{S0} = \frac{Ku_0^{\,2}}{2} = \frac{1}{2}K_{eff}\left(\frac{\left|\delta^{+}_{i,\max}\right| + \left|\delta^{-}_{i,\max}\right|}{2}\right)^2 \quad (2)$$

که در آن، K_{eff} سختی مؤثر است و مقدار آن از رابطه‌ی ۳ به‌دست می‌آید.

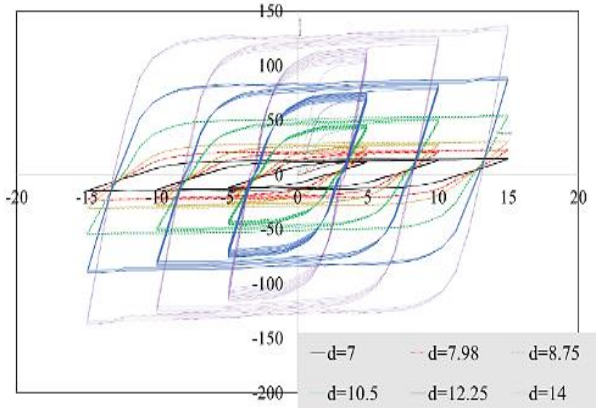
$$K^{i}_{eff} = \frac{\left|P^{+}_{i,\max}\right| + \left|P^{-}_{i,\max}\right|}{\left|\delta^{+}_{i,\max}\right| + \left|\delta^{-}_{i,\max}\right|} \quad (3)$$

همان‌طور که پیش‌تر ذکر شده است، جهت مدل‌سازی از نرم‌افزار آباکوس استفاده شده است. مدل‌سازی قسمت‌های مختلف با استفاده از المان solid و شبکه‌بندی اعضا، با استفاده از المان هشت‌گره‌یی با انتگرال‌گیری کاهش‌یافته (C3D8R) انجام شده است. برای مدل‌سازی مصالح میله‌ها از مدل دوخطی و سخت‌شوندگی ترکیبی (ترکیبی از سخت‌شوندگی ایزوتروپیک و سینماتیک) استفاده و مشخصات مصالح و مؤلفه‌های مربوط به سخت‌شوندگی در جدول ۳ ارائه شده است.

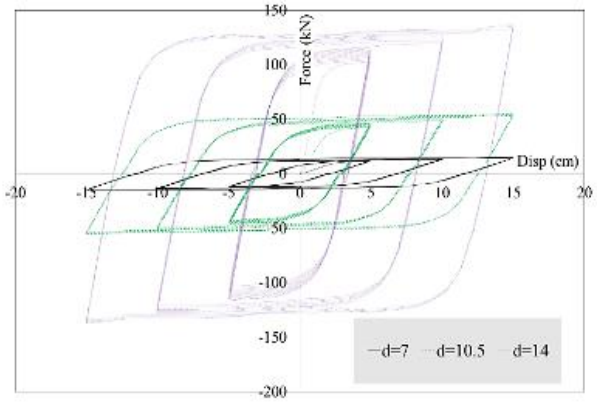
برای تحلیل مدل‌های ساخته‌شده، از شیوه‌نامه بارگذاری ASCE7-22[۱۹]،[۱۹] استفاده شده است؛ که مطابق آن، هر میراگر باید تحت بارگذاری چرخه‌ای، با ۱۰ سیکل کامل تحت ۰/۳۳ برابر جابجایی ناشی از بیشترین زلزله‌ی موردانتظار (MCE)، ۵ سیکل کامل تحت ۰/۶۷ برابر جابجایی ناشی از بیشترین زلزله‌ی موردانتظار، و ۳ سیکل کامل تحت ۱ برابر جابجایی ناشی از بیشترین زلزله‌ی موردانتظار قرار گیرد. میراگرهای بررسی‌شده با فرض جابجایی هدف برابر ۱۵ سانتی‌متر تحلیل شده‌اند. در ادامه، تأثیر تغییر در مؤلفه‌های مختلف بررسی شده است.

۴.۱. تأثیر قطر میله

قطر قسمت انتهایی میله در مدل مبنا برابر ۷ سانتی‌متر بوده و برای بررسی تأثیر تغییر قطر در میزان اتلاف انرژی، از مدل‌هایی با قطرهای ۷/۹۸، ۸/۷۵، ۱۰/۵، ۱۲/۲۵، و ۱۴ سانتی‌متر (به ترتیب با ۱۴، ۲۵، ۵۰، ۷۵، و ۱۰۰ درصد افزایش در قطر میله) استفاده شده است. منحنی بارگذاری چرخه‌ای مدل‌ها در شکل ۶ ملاحظه می‌شود. جهت مشاهده‌ی بهتر تأثیر قطر در منحنی هیسترزیس، منحنی‌های مربوط به مدل‌های ۱، ۴، و ۶ به ترتیب با قطرهای ۷، ۱۰/۵، و ۱۴ سانتی‌متر در شکل ۷ مشاهده می‌شوند. با توجه به روابط ۴ و ۵،



شکل ۶. منحنی‌های هیسترزیس برای قطرهای مختلف (d).



شکل ۷. منحنی‌های هیسترزیس برای قطرهای ۷، ۱۰/۵، و ۱۴ سانتی‌متر.

سختی میله‌ی کنسولی متناسب با ممان اینرسی و درنتیجه توان چهارم قطر است. با افزایش قطر میله، سختی میله افزایش زیادی داشته و در نتیجه میزان اتلاف انرژی توسط میله افزایش یافته است. از طرفی، با توجه به رابطه‌ی ۶، نیروی تسلیم با مساحت (توان دوم قطر) رابطه‌ی مستقیم دارد. به این ترتیب، با افزایش قطر میله، مقدار مصالح مشارکت‌کننده در اتلاف انرژی افزایش یافته و به همین دلیل، میزان اتلاف انرژی افزایش محسوسی داشته است. مقدار افزایش انرژی تلف‌شده برای مدل‌های ۱ الی ۶ در جدول ۴ ارائه شده است؛ که مطابق آن، استفاده از میله با قطر ۱۴ سانتی‌متر (افزایش ۱۰۰ درصدی در قطر میله نسبت به مدل مبنا) موجب افزایش ۱۰۸۲٪ در میزان انرژی تلف‌شده است.

$$K = \frac{3EI}{L^3} \quad (4)$$

$$I = \frac{\pi d^4}{64} \quad (5)$$

$$F_y = \sigma_y A \quad (6)$$

که در آن‌ها، E مدول الاستیسیته میله، I ممان اینرسی میله، L طول میله، d قطر میله، A مساحت مقطع میله، σ_y تنش تسلیم میله، و F_y نیروی موردنیاز جهت تسلیم میله هستند.

علاوه‌بر انرژی تلف‌شده، مقادیر سختی مؤثر، میرایی مؤثر، و کرنش پلاستیک معادل برای مدل‌های مختلف نیز در جدول ۴ ارائه شده است؛ که مطابق آن،

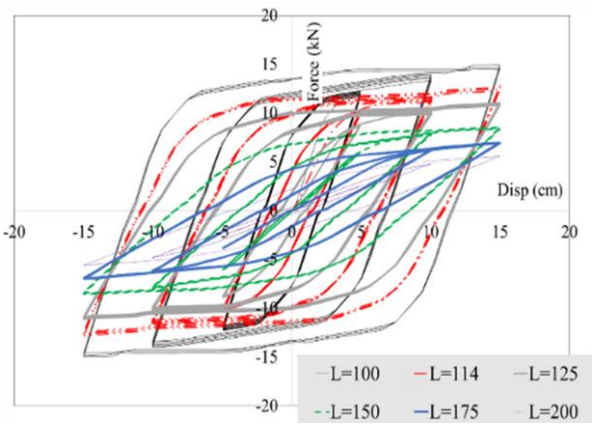
[19] American Society of Civil Engineers

جدول ۴. تغییرات معیارهای ارزیابی نسبت به تغییر قطر میله.

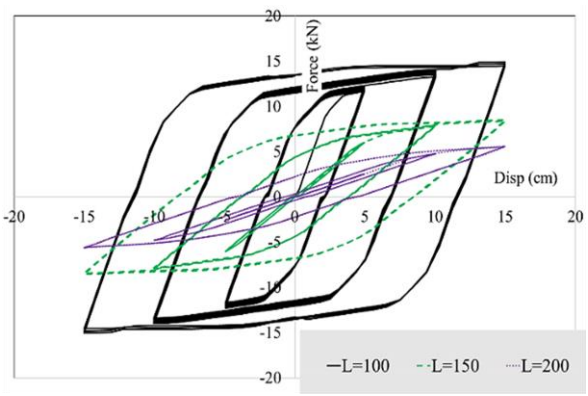
Model number	Diameter(cm)	Δd(%)	E(kJ)	ΔE(%)	K_{eff}	ΔK_{eff} (%)	ξ_{eff} (%)	$\Delta\xi_{eff}$ (%)	PEEQ
1	7	-	43.93	-	1	-	45.5	-	0.27
2	7.98	14%	73.53	67	1.55	55	47.7	5	0.36
3	8.75	25%	102	132	2.07	107	48.4	6	0.37
4	10.5	50%	193.24	340	3.68	268	50	10	0.47
5	12.25	75%	329.88	651	5.99	500	51.2	13	0.58
6	14	100%	519.38	1082	9.11	812	52.2	15	0.67

جدول ۵. تغییرات معیارهای ارزیابی نسبت به تغییر طول میله.

Model number	Length(cm)	ΔL (%)	E (kJ)	ΔE (%)	K_{eff}	ΔK_{eff} (%)	ξ_{eff} (%)	$\Delta\xi_{eff}$ (%)	PEEQ
1	100	-	43.93	-	1	-	45.5	-	0.27
7	114	14%	32.4	-26%	0.86	-14%	41.8	-8%	0.21
8	125	25%	24.63	-44%	0.74	-26%	39.6	-13%	0.15
9	150	50%	12.74	-71%	0.57	-43%	32.4	-29%	0.08
10	175	75%	6.53	-85%	0.47	-53%	23	-49%	0.06
11	200	100%	3.06	-93%	0.37	-63%	16.1	-65%	0.04



شکل ۸. منحنی‌های هیسترزیس برای طول‌های مختلف (L).



شکل ۹. منحنی‌های هیسترزیس برای طول‌های ۱۰۰، ۱۵۰، و۲۰۰ سانتی‌متر.

افزایش ضخامت میله موجب افزایش سختی و میرایی مؤثر شده است. همچنین افزایش کرنش پلاستیک معادل (PEEQ)، نشانگر این مطلب است که با افزایش ضخامت میله، پلاستیسیته‌ی بیشتری در میله اتفاق می‌افتد.

۴.۲. تأثیر طول میله

طول میله در مدل مبنا برابر ۱۰۰ سانتی‌متر بوده است، مدل‌هایی با طول‌های ۱۱۴، ۱۲۵، ۱۵۰، ۱۷۵، و ۲۰۰ سانتی‌متر (به ترتیب با ۱۴، ۲۵، ۵۰، ۷۵، و ۱۰۰ درصد افزایش در طول میله) برای تشخیص اثر طول میله در میزان اتلاف انرژی انتخاب شده‌اند. منحنی بارگذاری چرخه‌ای مدل‌ها در شکل ۸ مشاهده می‌شود. جهت نمایش بهتر تأثیر طول در میزان اتلاف انرژی، منحنی‌های مربوط به مدل‌های ۱، ۹، و ۱۱ به ترتیب با طول‌های ۱۰۰، ۱۵۰، و ۲۰۰ سانتی‌متر در شکل ۹ ملاحظه می‌شود.

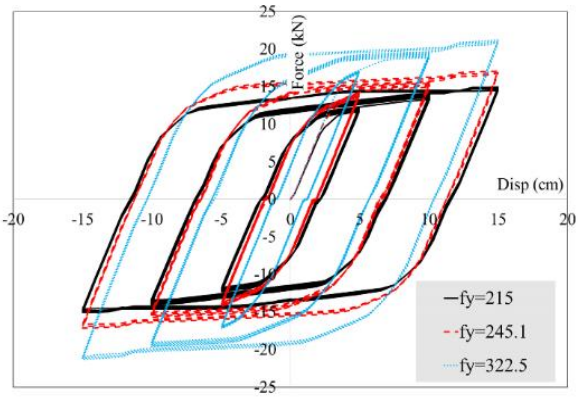
با توجه به رابطه‌ی ۴، سختی میله‌ی کنسولی با توان سوم طول، رابطه‌ی عکس دارد. همان‌طور که در شکل‌های ۸ و ۹ ملاحظه می‌شود، افزایش طول میله، موجب کاهش شدید در سختی میله شده و در طول‌های زیاد سبب شده است که میله در جابجایی‌های بزرگ و در نتیجه با تأخیر تسلیم شود. مقدار اتلاف انرژی، کرنش پلاستیک معادل، سختی، و میرایی مؤثر برای طول‌های مختلف در جدول ۵ ارائه شده‌اند؛ که مطابق آن، افزایش ۱۰۰ درصدی در طول میله و استفاده از میله به طول ۲۰۰ سانتی‌متر به جای میله‌ی ۱۰۰ سانتی‌متری

جدول ۶. تغییرات معیارهای ارزیابی نسبت به تغییر تنش تسلیم (مصالح) میله.

Model number	fy (MPa)	Δfy (%)	E(kJ)	ΔE(%)	K_{eff}	ΔK_{eff} (%)	ξ_{eff} (%)	$\Delta\xi_{eff}$ (%)	PEEQ
1	215	-	43.93	-	1	-	45.5	-	0.27
12	245.1	14%	47.29	8%	1.14	14%	44	-3%	0.29
13	322.5	50%	49.63	13%	1.41	42%	40.5	-11%	0.25

جدول ۷. تغییرات معیارهای ارزیابی نسبت به تغییر تعداد میله.

Model number	n (MPa)	Δn (%)	E(kJ)	ΔE(%)	K_{eff}	ΔK_{eff} (%)	ξ_{eff} (%)	$\Delta\xi_{eff}$ (%)	PEEQ
1	1	-	43.93	-	1	-	45.5	-	0.27
14	2	100%	91.53	108%	2.1	105%	46	1%	0.3



شکل ۱۰. منحنی‌های هیسترزیس برای تنش تسلیم‌های مختلف (f_y).

موجب کاهش ۹۳ درصدی در میزان اتلاف انرژی و کاهش ۶۵ درصدی در میرایی مؤثر شده است. با مقایسه‌ی مقادیر کرنش پلاستیک معادل مشاهده می‌شود که افزایش طول میله موجب کاهش ورود مصالح به ناحیه‌ی پلاستیک شده است.

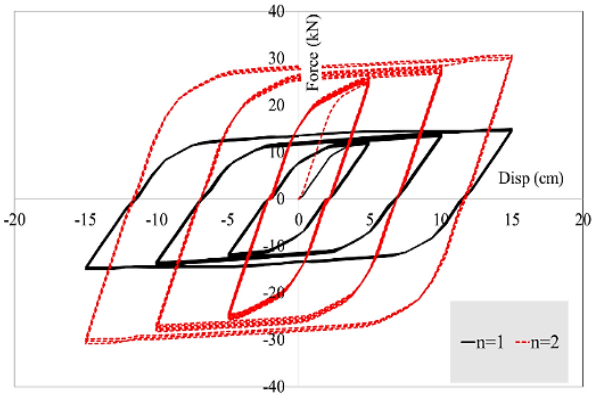
۴.۳. تأثیر تنش تسلیم (مصالح) میله

در بخش کنونی، تأثیر ایجاد تغییر در تنش تسلیم میله (مصالح میله) در میزان اتلاف انرژی بررسی شده است. مصالح میله در مدل مبنا S235 با تنش تسلیم ۲۱۵ مگاپاسکال بوده و جهت بررسی اثر تنش تسلیم میله، از مدل‌های با مصالح S275 و S355 به ترتیب با تنش تسلیم‌های ۲۴۵/۱ و ۳۲۲/۵ مگاپاسکال (۱۴ و ۵۰ درصد افزایش تنش تسلیم) استفاده شده است. پس از تحلیل مدل‌ها، منحنی‌های به‌دست‌آمده‌ی هیسترزیس در شکل ۱۰ مشاهده می‌شوند.

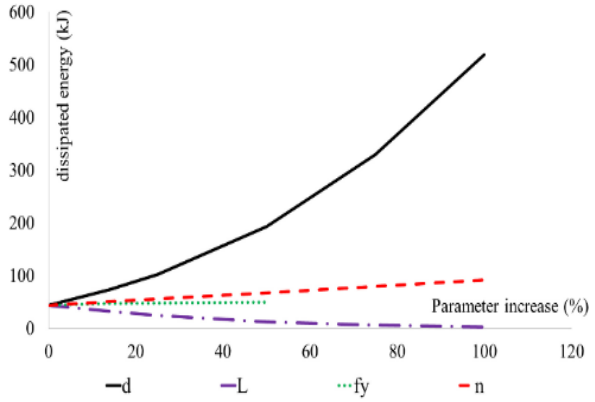
مطابق شکل ۱۰ و رابطه‌ی ۶ مشاهده می‌شود که با افزایش تنش تسلیم میله، نیروی تسلیم نیز بیشتر و منحنی‌های هیسترزیس بزرگ‌تر شده‌اند؛ لذا، میزان اتلاف انرژی در میله‌ها بیشتر شده است. مقدار اتلاف انرژی برای مدل‌های مختلف در جدول ۶ ارائه شده است؛ که مطابق آن افزایش ۱۴ و ۵۰ درصدی در تنش تسلیم میله‌ها، به ترتیب موجب افزایش ۸ و ۱۳ درصدی در میزان اتلاف انرژی شده است. با وجود این، مقایسه‌ی میرایی مؤثر نشان می‌دهد که با افزایش تنش تسلیم، مقدار میرایی مؤثر، کاهش ۳ و ۱۱ درصدی داشته است.

۴.۴. تأثیر تعداد میله

در بخش حاضر، تأثیر افزایش تعداد میله در میزان اتلاف انرژی بررسی شده است. برای این منظور، از یک مدل با دو میله با مشخصات مطابق مدل مبنا



شکل ۱۱. منحنی‌های هیسترزیس برای تعداد میله (n).

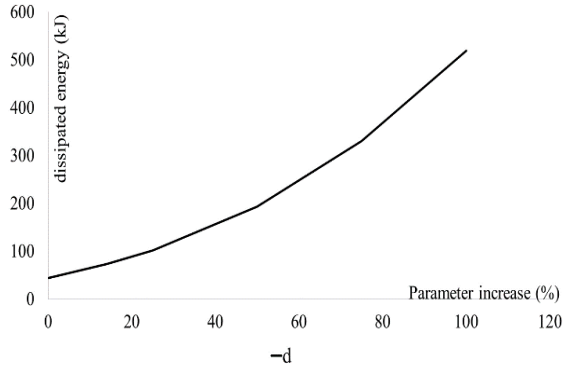


شکل ۱۲. تغییرات انرژی تلف‌شده نسبت به درصد تغییرات مؤلفه‌های مختلف.

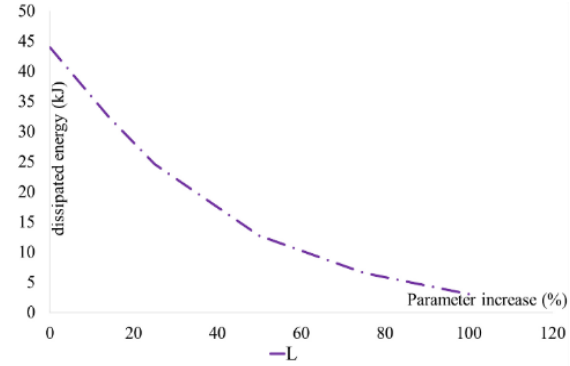
استفاده شده است. منحنی‌های هیسترزیس و مقادیر اتلاف انرژی برای مدل‌های مذکور در شکل ۱۱ و جدول ۷ ارائه شده‌اند. همان‌طور که در جدول ۷ مشاهده می‌شود، با ۲ برابرشدن تعداد میله (افزایش ۱۰۰ درصدی در تعداد میله)، انرژی تلف‌شده ۱۰۸٪ افزایش یافته است. اختلاف ۸ درصدی در اتلاف انرژی نسبت به تعداد میله، به دلیل تغییر شرایط مرزی و افزایش سختی تکیه‌گاه میله‌ها بوده است.

۵. بررسی و مقایسه‌ی نتایج

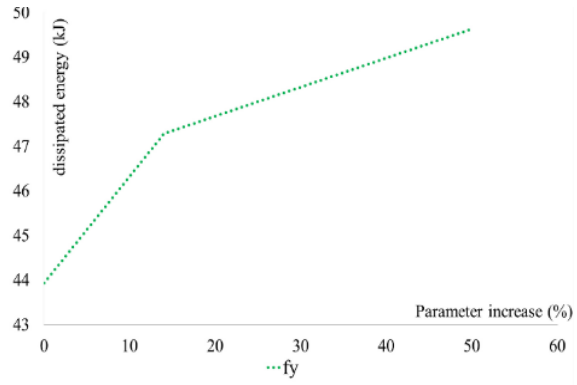
در بخش‌های قبل، اثر تغییر در مقدار هر مؤلفه در میزان اتلاف انرژی به صورت جداگانه بررسی شده است. خلاصه‌ای از نتایج بخش‌های قبل در جدول ۸ ارائه شده است؛ که مطابق آن و شکل‌های ۱۲ الی ۱۶، مشخص است که با افزایش قطر، تنش تسلیم، و تعداد میله، انرژی تلف‌شده افزایش یافته و با افزایش طول



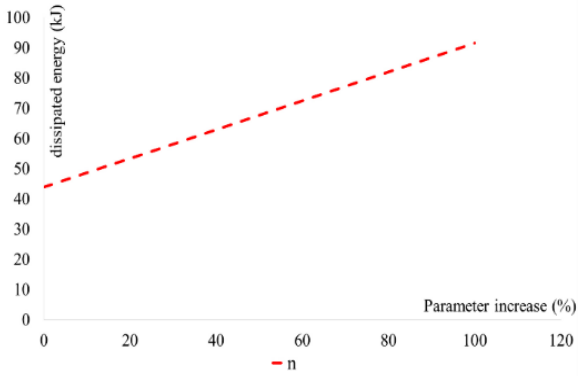
شکل ۱۳. تغییرات انرژی تلف‌شده نسبت به درصد تغییرات قطر میله.



شکل ۱۴. تغییرات انرژی تلف‌شده نسبت به درصد تغییرات طول میله.



شکل ۱۵. تغییرات انرژی تلف‌شده نسبت به درصد تغییرات تنش تسلیم میله.



شکل ۱۶. تغییرات انرژی تلف‌شده نسبت به درصد تغییرات تعداد میله.

میله، انرژی تلف‌شده کم شده است. همچنین به ترتیب بیشترین حساسیت انرژی تلف‌شده نسبت به مؤلفه‌های مختلف، عبارت از: قطر میله، تعداد میله، طول میله، و در انتها تنش تسلیم (جنس میله) بوده است. به‌طور مثال، با افزایش ۵۰ درصدی قطر میله، انرژی تلف‌شده ۳۴۰٪ افزایش یافته است؛ در

جدول ۸. تغییرات انرژی تلف‌شده نسبت به تغییر مؤلفه‌های مختلف.

Model number	*Variable*	*Variable Change(%)*	*E(kJ)*	*ΔE(%)*
1	Base model	-	43.93	-
2	d=7.98	14%	73.53	67%
3	d=8.75	25%	102	132%
4	d=10.5	50%	193.24	340%
5	d=12.25	75%	329.88	651%
6	d=14	100%	519.38	1082%
7	L=114	14%	32.4	-26%
8	L=125	25%	24.63	-44%
9	L=150	50%	12.74	-71%
10	L=175	75%	6.53	-85%
11	L=200	100%	3.06	-93%
12	f_y=245.1	14%	245.1	8%
13	f_y=322.5	50%	322.5	13%
14	n=2	100%	215	108%

صورتی که با افزایش ۵۰ درصدی طول و تنش تسلیم میله، انرژی تلف‌شده به ترتیب ۷۱- و ۱۳ درصد تغییر کرده است. همچنین با افزایش ۱۰۰ درصدی قطر میله، انرژی تلف‌شده، ۱۰۸۲٪ افزایش یافته است، در صورتی که با افزایش ۱۰۰ درصدی طول و تعداد میله، مقدار انرژی تلف‌شده به ترتیب ۹۳- و ۱۰۸ درصد تغییر کرده است.

۶. نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، اثر ایجاد تغییر در مؤلفه‌های مختلف میراگرهای میله‌ای کنسولی در میزان اتلاف انرژی، سختی مؤثر، میرایی مؤثر، و کرنش پلاستیک معادل بررسی شده است. مؤلفه‌هایی که در پژوهش حاضر بررسی شده‌اند، عبارت‌اند از: قطر میله، طول میله، تنش تسلیم میله، و تعداد میله. جهت بررسی از نرم‌افزار اجزاء محدودی آباکوس استفاده شده است. جهت انجام تحلیل، مدل‌ها تحت بارگذاری چرخه‌ای مطابق استاندارد بارگذاری ASCE7-22 قرار گرفته‌اند. برای انجام تحلیل حساسیت میراگر مذکور، ۱۴ مدل مختلف در نظر گرفته شده است.

نتایج بررسی‌ها نشان داده است که با افزایش مؤلفه‌های قطر، تعداد، و تنش تسلیم میله، میزان اتلاف انرژی افزایش و با افزایش طول میله، انرژی تلف‌شده کاهش یافته است. همچنین مشاهده شده است که اتلاف انرژی در میراگر میله‌ای کنسولی، بیشترین حساسیت را به ترتیب نسبت به قطر میله، تعداد میله، طول میله، و تنش تسلیم میله داشته است. از طرفی، افزایش قطر میله به‌علت سخت‌ترشدن میله و نیز به‌علت افزایش مصالح تسلیم‌شونده‌ی میله، بیشترین تأثیر را در میزان اتلاف انرژی داشته است. افزایش طول میله نیز به‌علت کاهش سختی، موجب کاهش میزان جذب انرژی شده است. مؤلفه‌ی تعداد میله نیز با میزان جذب انرژی رابطه‌ی مستقیم داشته است. همچنین با

افزایش میزان تنش تسلیم، به‌علت افزایش نیروی تسلیم میله، میزان جذب انرژی افزایش یافته است؛ به‌طوری که با افزایش ۵۰ درصدی در مؤلفه‌های قطر، طول، و تنش تسلیم میله مشاهده شده است که انرژی تلف‌شده به ترتیب ۳۴۰، ۷۱- و ۱۳ تغییر کرده است.

بررسی‌های مربوط به میرایی مؤثر نشان داده است که افزایش قطر میله موجب افزایش میرایی مؤثر و افزایش طول و تنش تسلیم میله موجب کاهش آن شده‌اند. افزایش تعداد میله نیز تأثیری در میزان میرایی مؤثر نداشته است. با توجه به عدم مدل‌سازی آسیب در مدل‌های عددی پژوهش حاضر، پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده جهت بررسی دقیق‌تر رفتار میراگر، آسیب فولاد مدل شود و بارگذاری تا لحظه‌ی شکست ادامه یابد.

References- منابع

1. Vasseghi, A., 2011. Energy dissipating shear key for precast concrete girder bridges. *Scientia Iranica, 18* (3), pp. 296-303. https://doi.org/10.1016/j.scient.2011.05.036
2. Dicleli, M. and Salem Milani, A., 2015. An innovative hysteretic damper with adaptive post-elastic stiffness for seismic protection of bridges. *Bridge Structures, 11* (4), pp. 131-140. https://doi.org/10.3233/BRS-140074
3. Xiang, N. and Li, J., 2016. Seismic performance of highway bridges with different transverse unseating-prevention devices. *Journal of Bridge Engineering, 21* (9), p.04016045. https://doi.org/10.1061/(ASCE)BE.19435592.0000909
4. Shen, X., Wang, X., Ye, Q. and Ye, A., 2017. Seismic performance of transverse steel damper seismic system for long span bridges. *Engineering Structures, 141*, pp. 14-28. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.03.014
5. Zhou, L., Wang, X. and Ye, A., 2019. Shake table test on transverse steel damper seismic system for long span cable-stayed bridges. *Engineering Structures, 179*, pp. 106-119. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.10.073
6. Haeri, A. H., Badamchi, K. and Tajmir Riahi, H., 2019. Proposing a new hybrid friction–yielding–elastomeric bearing. *Journal of Vibration and Control, 25* (9), pp. 1558-1571. https://doi.org/10.1177/1077546319829535
7. Fahimpour, V. and Abbasnia, R., 2008. Investigating the effect of energy dissipative element on the ductility of concentric braces. *Iranian Rehabilitation National Conference*. https://civilica.com/doc/46451 [In Persian].
8. Banisheikholeslami, A., Behnamfar, F. and Ghandil, M., 2016. A beam-to-column connection with visco-elastic and hysteretic dampers for seismic damage control. *Journal of Constructional Steel Research, 117*, pp. 185-195. https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2015.10.016
9. Golzan, S. B., Langlois, S. and Legeron, F. P., 2017. Implementation of a simplified method in design of hysteretic dampers for isolated highway bridges. *Journal of Bridge Engineering, 22* (3), p. 04016127. https://doi.org/10.1061/(ASCE)BE.19435592.0001012
10. Aghlara, R. and Tahir, M. M., 2018. A passive metallic damper with replaceable steel bar components for earthquake protection of structures. *Engineering structures, 159*, pp. 185-197. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.12.049
11. Aghlara, R., Tahir, M. M. and 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
12. Liu, M., Gao, H., Wang, J., Huang, Y. and Dong, Z., 2023. Study on seismic performance of functionally integrated cylindrical steel damper bearing with energy dissipation and spacing. *In Structures 56*, p.104963. https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.104963
13. Chiarotto, D., Tomaselli, F., Baldo, P., Castellano, M. G. and Infanti, S., 2004. Seismic protection of Tuy Medio railway viaducts: design and shaking table tests of the seismic devices. *In Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering*, pp. 1-14.
14. Zlatkov, D., Ristić, D., Zorić, A., Ristić, J., Mladenović, B., Petrović, Ž. and Trajković-Milenković, M., 2022. Experimental and numerical study of energy dissipation components of a new metallic damper device. *Journal of Vibration Engineering & Technologies, 10*(5), pp. 1809-1829. https://doi.org/10.1007/s42417-022-00485-0
15. Hu, S., Meng, D., Hu, R. and Yang, M., 2023. A combined viscous-steel damping system (CVSDS) for longitudinal vibration mitigation of a long-span

railway suspension bridge. *Journal of Earthquake Engineering*, *27*(5), pp. 1261-1280. https://doi.org/10.1080/13632469.2022.2074915

16. Gao, H. and Wang, J., 2020. Research on differences between cylindrical and E-shaped dampers for the bidirectional seismic control. *Journal of Bridge Engineering*, *25* (4), p. 04020008. https://doi.org/10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0001534

17. European Assessment Document (EAD 200017-00-0302), 2015. Hot Rolled Products and Structural Components Made Of Steel Grades Q235B, Q235D, Q345B AND Q345D, *European Assessment Document.*

18. Chopra, A.K., 2020. Dynamics of structures: theory and applications to earthquake engineering, ed. 5. *university of california at Berkeley.*

19. American Society of Civil Engineers, 2022. Minimum design loads and associated criteria for buildings and other structure, *American Society of Civil Engineers.* https://doi.org/10.1061/9780784415788

این صفحه عمداً خالی گذاشته شده است.