

S. Kia Darbandsari

Department of Civil
Engineering, South Tehran
Branch, Islamic Azad
University, Tehran, Iran

e-mail:

st_s_kiadarbandsari@azad.ac.ir

M. Firoozi Nezam Abadi

Assistant Professor,
Department of Civil
Engineering and Research
Center for Modeling and
Optimization in Science and
Engineering, South Tehran
Branch, Islamic Azad
University, Tehran, Iran

e-mail:

firrozi@azad.ac.ir

H. Abasi*

Assistant Professor,
Department of Civil
Engineering, South Tehran
Branch, Islamic Azad
University, Tehran, Iran

e-mail:

h_abbasi@azad.ac.ir

F. Yaghoobi Vayghan

Assistant Professor,
Department of Civil
Engineering, Pardis Branch,
Islamic Azad University, New
Pardis City, Iran

e-mail:

yaghoobi@pardisiau.ac.ir

**Numerical Study of Horizontal Friction
Dampers Made of Steel and Brake Pads in
Chevron frame under Cyclic Loads**

Observations of damage to buildings in recent earthquakes indicate that some of the damage was in the area of welded joints. Due to the weakness in the joints, the idea of using a horizontal friction damper using brake pads in bracing openings, especially the chevron frame in steel structures has been proposed Which can be easily replaced after an earthquake.. The purpose of this study is to introduce a new friction damper with low manufacturing and installation costs and high efficiency. This friction device consumes vibrational energy with the help of friction caused by slipping of brake pads on steel surfaces , In this research, the numerical study of the friction damper of the brake pad and also the laboratory study of the materials used in this damper have been done. For this purpose, first a validation based on a laboratory model has been performed in ABAQUS software. In the following, 9 models are numerically studied in ABAQUS software and at the end, the optimal model of selective damping on a braced frame with porch decoration is analyzed. The results show that very high stress concentration occurs in the damping area of the brake pad after the load is applied to the bracing frame and due to the presence of dampers in other elements, including beams and columns, less stress is created than in the case without dampers. Also, among the studied models, the 10 screw model has the highest amount of energy absorption.

Keywords: Damper, Friction Damper, Chevron Frame, Brake Pad, Cyclic Loading.

* Corresponding author

Received 09 November 2021, Revised 26 December 2021, Accepted 27 January 2021.

DOI: 10.22091/cer.2022.7565.1325

مطالعه عددی میراگر اصطکاکی افقی ساخته شده با فولاد و لنت ترمز در قاب مهاربندی با آرایش هشتی تحت بارهای چرخه‌ای

مشاهده آسیب‌های وارد شده به ساختمان‌ها در زلزله‌های اخیر این موضوع را نشان دادند که برخی خرابی‌ها در ناحیه اتصالات جوشی بوده است. به دلیل ضعف در اتصالات، ایده استفاده از میراگر اصطکاکی افقی با بهره‌گیری از لنت ترمز در دهانه‌های مهاربندی به خصوص قاب با آرایش هشتی در سازه‌های فولادی مطرح شده است که پس از زلزله به راحتی قابل تعویض باشد. هدف از این تحقیق، معرفی یک میراگر اصطکاکی جدید با هزینه ساخت و نصب کم و کارایی بالا می‌باشد. این وسیله اصطکاکی، انرژی ارتعاشی را به کمک اصطکاک ناشی از لغزش لنت‌های ترمز روی سطوح فولادی مستهلک می‌کند. در این پژوهش به مطالعه عددی میراگر اصطکاکی لنت ترمز و همچنین مطالعه آزمایشگاهی مصالح مورد استفاده در این میراگر پرداخته شده است. بدین منظور، ابتدا یک صحت‌سنجی بر مبنای یک مدل آزمایشگاهی در نرم‌افزار ABAQUS انجام شده است. در ادامه ۹ مدل مورد بررسی عددی در نرم‌افزار ABAQUS قرار گرفته و در انتها مدل بهینه انتخابی میراگر بر روی یک قاب مهاربندی مورد تحلیل قرار گرفته شده است. نتایج نشان می‌دهند که تمرکز تنش بسیار بالایی در ناحیه میراگر لنت ترمز پس از اعمال بار به قاب رخ می‌دهد و به دلیل وجود میراگر در سایر المان‌ها از جمله تیر و ستون تنش کمتری نسبت به حالت بدون میراگر ایجاد می‌گردد. همچنین میان مدل‌های مورد بررسی مدل ۱۰ پیچ، دارای بیشترین میزان جذب انرژی می‌باشد.

واژگان کلیدی: میراگر، اصطکاکی، مهاربند با آرایش هشتی، لنت ترمز، بارگذاری چرخه‌ای.

سعید کیادربندسری

گروه مهندسی عمران، واحد
تهران جنوب، دانشگاه آزاد
اسلامی، تهران، ایران.

پست الکترونیک:

st_s_kiadarbandsari@azad.ac.ir

مریم فیروزی نظام آبادی

گروه مهندسی عمران و مرکز
تحقیقات مدل‌سازی و
بهینه‌سازی در علوم مهندسی،
واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد
اسلامی، تهران، ایران.

پست الکترونیک:

firrozi@azad.ac.ir

حسن عباسی*

گروه مهندسی عمران، واحد
تهران جنوب، دانشگاه آزاد
اسلامی، تهران، ایران.

پست الکترونیک:

h_abbasi@azad.ac.ir

فریبرز یعقوبی

گروه مهندسی عمران، واحد
پردیس، دانشگاه آزاد اسلامی،
شهر جدید پردیس، ایران.

پست الکترونیک:

yaghoobi@pardisiu.ac.ir

۱- مقدمه

مشخص می‌نماید. در این میان، انتخاب مناسب سیستم مقاوم جانبی با کارایی بالا برای مهندسی یک چالش پر اهمیت خواهد بود. سیستم‌های مهاربندی جانبی جهت ایجاد مقاومت در برابر نیروهای لرزه‌ای در سازه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند، استفاده از مهاربندهای همگرا با آرایش هشتی به عنوان سیستم مقاوم جانبی در سازه‌های فولادی یکی از متداول‌ترین روش‌ها برای تحمل نیروهای ناشی از زلزله می‌باشد. فرآیند طراحی سازه با ترکیبی از

خسارات مالی و جانی ناشی از زلزله اهمیت درک
بهتر رفتار سازه‌ها در برابر زلزله را برای مهندسی سازه

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۸/۰۸/۱۴۰۰، بازنگری ۰۵/۱۰/۱۴۰۰، پذیرش ۰۷/۱۱/۱۴۰۰.

(DOI): 10.22091/cer.2022.7565.1325 شناسه دیجیتال

شود، سطوح به صورت ناگهانی شروع به حرکت می‌کنند. اما پس از حرکت با توجه به جنس سطوح تماس، مقدار نیروی اصطکاک نسبت به شروع حرکت تغییر می‌کند و بسته به دامنه جابه‌جایی نیز این تغییرات متفاوت است. بنابراین اگر بتوان نیروی اصطکاک مشخصی را در یک اتصال یا یک عضو ایجاد کرد، به طوری که مقدار این نیرو قابل کنترل باشد، میراگر مورد نظر تولید شده است. از مصالحی که برای سطوح لغزنده استفاده شده است، می‌توان به لایه‌های لنت ترمز روی فولاد، فولاد روی برنج و فولاد روی فولاد اشاره نمود. انتخاب فلز پایه برای میراگر اصطکاکی بسیار مهم است. مقاومت بالا در مقابل خوردگی، اغلب می‌تواند ضریب اصطکاک فرض شده را برای عمر مورد نظر وسیله کاهش دهد.

علت انتخاب میراگرهای اصطکاکی سادگی مکانیزم ساخت، عدم احتیاج به مصالح خاص و گران‌قیمت و در نهایت قابلیت تولید و آزمایش این وسایل می‌باشد، به طوری که مزیت‌های مذکور سبب شده‌اند که بررسی کارایی میراگرهای اصطکاکی به عنوان گزینه مناسبی جهت شروع تحقیق و مطالعه روش‌های کنترل سازه محسوب گردد. به طور کلی، اصطکاک دو جسم جامد بر روی یکدیگر نقش بسیار مهمی در کنترل جابه‌جایی و اتلاف انرژی بازی می‌کند. برای مثال، در یک مقیاس بسیار کوچک‌تر اصطکاک در ترمز اتومبیل‌ها به عنوان عاملی برای تلف نمودن انرژی جنبشی حرکت نیز استفاده می‌شود. این میراگرها علاوه بر شکل ساده با هزینه‌ای ناچیز قابل تولید و نصب است. علاوه بر آن، این میراگر با استفاده از نیروی پیش‌تنیدگی پیچ‌ها، نیروی اصطکاک قابل کنترلی دارد [۱]. تئوری طراحی لرزه‌ای سازه‌های قابی مجهز به میراگرهای اصطکاکی توسط پال^۱ و همکارانش در سال ۱۹۷۰ آغاز شد. او به فکر ابداع وسیله‌ای جهت مستهلک کردن انرژی ورودی لرزه‌ای به سازه از طریق اصطکاک افتاد. وی این ایده را از مکانیزم

مقاومت، شکل‌پذیری و ظرفیت جذب انرژی امکان‌پذیر و فراهم می‌شود. مادامی که ظرفیت ذاتی و طبیعی اتلاف انرژی توسط یک سازه اندک باشد، یک سطح خاص از تغییرشکل و خسارت سازه‌ای در هنگام رویداد زلزله را باید پذیرفت. اما این دشوار است یا برخی اوقات پرهزینه و غیرممکن است که این چنین خسارات سازه‌ای ناشی از زلزله، تعمیر شود و حتی ممکن است به ویرانی کامل سازه منجر شود. با گسترش سریع روش‌های کنترل لرزه‌ای سازه‌ها به خصوص روش‌های کنترل غیرفعال نیاز به تولید و کاربرد اینگونه وسایل در صنعت ساختمان‌سازی بیشتر از قبل احساس می‌گردد، از سوی دیگر با توجه به عملکرد سیستم‌های کنترل غیرفعال در مستهلک نمودن انرژی لرزه‌ای با بهره‌گیری از تئوری لغزش سطوح بر یکدیگر و استفاده از مکانیزم ترمز برای متوقف کردن اجسام در حال حرکت، نیاز به شناسایی و تولید و طراحی وسایلی می‌باشد که به دلیل داشتن خواص مکانیکی منحصربه‌فرد و همچنین ابعاد هندسی مناسب باعث جذب بالای انرژی لرزه‌ای در سازه‌ها می‌شوند و میرایی سازه را افزایش می‌دهند. این میراگرها علاوه بر شکل ساده با هزینه‌ای ناچیز قابل تولید و نصب است. این نوع میراگرها با استفاده از اصطکاک خشک، جهت افزایش میرایی در سازه استفاده می‌شود. این میراگر در تقاطع مهاربندها در زیر تیر اصلی در قاب مهاربندی با آرایش هشتی نصب می‌گردد و هنگام زلزله انرژی از مهاربند به این میراگر انتقال می‌یابد و این میراگر با مستهلک کردن انرژی هنگام زلزله، انرژی جنبشی را به گرما تبدیل می‌کند. از این میراگر در هنگام بازسازی یا تقویت سازه هم می‌توان استفاده کرد، چون اجزای اصلی سازه تغییر نمی‌کند. میراگر اصطکاکی به ساختمان کمک می‌کند که بتواند به صورت بازگشت‌پذیری ارتعاش کند و انرژی زمین لرزه را مستهلک نماید. اینگونه وسایل اتلاف انرژی با استفاده از اتصالات اصطکاکی همراه با سوراخ‌های لوبیایی شکل طراحی می‌شوند، در صورتی که نیروی اعمال شده به اتصال اصطکاکی از بار لغزش اتصال بزرگتر

^۱-Pall AS

دورانی (RFD^۹) در سال ۲۰۰۰، معرفی شد. این میراگر به منظور بهسازی ساختمان‌های موجود و ساخت ساختمان‌های جدید برمبنای شکل‌پذیری می‌باشد. بنابراین اهمیت بررسی این میراگر در مناطق لرزه‌خیز حائز اهمیت است. تمام آزمایش‌هایی که روی این میراگر انجام شد بیانگر کارایی مناسب میراگر تحت رویداد لرزهای بوده است. از طرفی، پاسخ سازه مجهز به میراگر تحت بارهای جانبی مورد بررسی قرار گرفته و تطابق مناسبی بین نتایج عددی و آزمایشگاهی مشاهده شده است [۸]. در سال ۲۰۰۲، موولا و بل^{۱۰}، میراگر اصطکاکی جدیدی را بر روی مهاربند شورون^{۱۱} قرار دادند که بر پایه حرکت دورانی عمل می‌کرد. مطالعات عددی و آزمایشگاهی دیگری نیز در مورد این نوع میراگر صورت گرفته که همگی به تأثیر این نوع میراگر در رفتار لرزهای سازه‌ها اشاره می‌کنند [۹-۱۱]. به‌طور کلی، به‌کار بردن میراگرهای اصطکاکی جهت کاهش ارتعاشات وارده به سازه نیازمند استفاده از یک قانون کنترل نیمه فعال است. بنابراین در سال ۲۰۰۴، یک روش کنترل مدال نیمه فعال ارائه شد که به واسطه آن می‌توان نیروی گیرش قابل کنترل اصطکاکی مختلف را تعیین کرد [۱۲].

باسکاراو^{۱۲} و همکاران، پاسخ هارمونیک و آنالیز زلزله‌ای سازه‌های مجاور که به وسیله میراگرهای اصطکاکی به هم متصل شده‌اند را مورد بررسی قرار دادند [۱۳]. دی‌لاکروز^{۱۳} و همکاران نیز الگوریتم جدیدی برای شبیه‌سازی پاسخ زلزله‌ای قاب‌های ساختمان N طبقه مجهز به وسایل کنترل غیرفعال را ارائه دادند که روش شتاب‌خطی را نیز اصلاح می‌کند. در این الگوریتم، آنها قاب و میراگرها را به صورت جرم‌های متمرکز دوعبده با دو درجه آزادی در ده طبقه مدل کردند و به این ترتیب برای سازه و میراگر تغییرمکان‌های افقی در نظر گرفتند

ترمز اتومبیل‌های اولیه الهام گرفت تا این که اتصال به اصطلاح پیچ شده لغزش محدود (LBC^۲) توسط پال (۱۹۸۰) ساخته شد [۱]. در سال ۱۹۷۶ نمودار تغییرمکان میراگر اصطکاکی با صفحات سربی توسط رایبسون و گرین بانک^۳ مورد مطالعه قرار گرفت که در نهایت این نتیجه حاصل شد که نمودار هیستریزیس این میراگر به صورت مربعی با جذب انرژی زیاد با اثر خستگی کم می‌باشد ولی در دمای اتاق هم بشدت داغ می‌شود که در سازه باعث کاهش جذب انرژی می‌گردد [۲]. یکی دیگر از انواع این میراگرها که به (SBC^۴) معروف است اولین بار در سال ۱۹۷۶ توسط ونوتی^۵ در دانشگاه ایالت سن‌خوزه تولید شد. نتایج به‌دست آمده از آزمایشات سبب تشویق بیشتر محققین در رابطه با بررسی عملکرد این نوع میراگر گردید [۳]. همچنین در سال ۱۹۸۰ محققان، سیستمی ابداع کردند که در آن بالشتک‌های ترمز به منظور افزایش میزان اتلاف انرژی در قاب‌های مهاربندی استفاده شده بود. که نسخه‌های جدیدتری از این تجهیزات در تعدادی سازه در کشور کانادا به‌کار رفته‌اند [۴]. فیتزجرالد^۶ و همکاران در نهایت، سیستم ساده‌ای موسوم به اتصالات پیچی شیاردار را پیشنهاد کردند که استهلاک انرژی در آن در اثر لغزش بین ورق‌های فولادی ایجاد می‌شود و انرژی ورودی زلزله از طریق اصطکاک بین قطعات اتلاف می‌شود [۵]. لی و ری‌هورن^۷ در سال ۱۹۹۵ عملکرد لرزه‌ای یک مدل سازه را با میراگر اصطکاکی از لحاظ تحلیلی و عددی بررسی کردند [۶]. پژوهشگران در سال ۱۹۹۶ به منظور کاهش پاسخ زلزله‌ای، یک مدل میراگر سیالی MR^۸ که دارای خصوصیات میرایی اصطکاکی است را به دلیل ظرفیت بالای آن در کنترل سازه‌ای طراحی کردند [۷]. همچنین میراگر اصطکاکی

2- Limited Slip Bolted

3- Robinson and Greenbank

4- Slotted Bolted Connection

5- Venuti

6- FitzGerald

7- Li and Reinhorn

8- Magneto-Rheological

9- Rotational Friction Damper

10- Mualla and Belev

11- Chevron

12- Bhaskararao

13- De La Cruz

جهت اتلاف انرژی وابسته به جابه‌جایی، برای محافظت از سازه در برابر نیروهای لرزه‌ای ارائه کردند [۲۱]. در سال ۲۰۲۰ تاکشی سانو^{۲۰} و همکاران یک مطالعه تجربی بر روی میراگر اصطکاکی به همراه صفحات برشی و گل میخ و پیچ مهره‌های دیسکی ارائه دادند [۲۲]. در سال ۲۰۲۱ غفوری‌نژاد و همکاران بر روی قاب مهاربندی زانویی^{۲۱} مجهز به میراگر اصطکاکی مطالعات عددی گسترده‌ای را ارائه کردند [۲۳].

۲- تئوری میراگرهای اصطکاکی

مطالعه علمی اصطکاک خشک، گذشته طولانی دارد که در نتیجه این قوانین، در لحظه شروع یا در طی لغزش رابطه زیر برقرار است:

$$F = \mu \cdot N \quad (1)$$

که در آن F و N به ترتیب معرف نیروهای اصطکاکی و عمودی بوده و μ ضریب اصطکاک است. به عبارت دیگر، با توجه به شکل ۱، هنگامی که یک جسم تحت نیروی جانبی p قرار گیرد با افزایش نیرو از حد نیروی اصطکاک F ، جسم به صورت ناگهان شروع به حرکت می‌کند. حرکت جسم از یک سو و نیروی اصطکاک موجود مابین سطوح تماس از سوی دیگر، باعث تولید انرژی گرمایی در سطح جسم می‌شود. از آنجاکه مکرراً مشاهده شده است که ضریب اصطکاک تا حدی در هنگام شروع لغزش بیش از حالت خلال لغزش است، معمولاً ضریب استاتیکی μ_s و ضریب جنبشی μ_k معرفی می‌شوند. در هر حالت، نیروی اصطکاکی F به صورت مماس در فصل مشترک صفحه در جهت مخالف حرکت می‌نماید. فرمول ذکر شده به تئوری کولمب^{۲۲} هم یاد می‌شود [۲۴]. هرچند باید اشاره شود که فرآیندهای اصطکاکی به ندرت به این سادگی می‌باشند. در عمل، تئوری کولمب تنها به طور تقریبی

[۱۴]. سانگ هیون‌لی^{۱۴} و همکاران در سال ۲۰۰۷، یک روش طراحی زلزله‌ای براساس توزیع نیروی برشی طبقه سازه‌های الاستیک با میراگرهای اصطکاکی ارائه دادند. آنها در ابتدا با استفاده از دو روش نرمال‌سازی نیروی لغزشی میراگرهای اصطکاکی دورانی، اثر نیروی لغزشی و سختی کابل بر روی عملکرد را مورد بررسی قرار دادند و همچنین نسبت سختی بهینه کابل را استخراج کردند، بعلاوه، یک رابطه تجربی را نیز برای تعداد طبقات بهینه‌ای که باید میراگرهای اصطکاکی دورانی در سازه نصب شود ارائه دادند [۱۵]. گل افشانی و قلی‌زاده در سال ۲۰۰۹ به مقاوم‌سازی سکوه‌های ژاکت^{۱۵} فولادی با استفاده از میراگر اصطکاکی دورانی پرداختند [۱۶]. واثقی و همکاران نیز رفتار قاب مهاربندی خارج از مرکز که در محل‌های تلاقی کابل‌ها به میراگر اصطکاکی مجهز است را مورد مطالعه قرار دادند. برای این منظور و با توجه به اهمیت تعیین بار لغزشی میراگر اصطکاکی، آنها شاخص‌های عملکردی را بر مبنای تغییرمکان کف، نیروی برشی پایه و انرژی اتلافی قرار دارند [۱۷]. در سال ۲۰۱۰ پژوهشگران دو روش کنترل‌کننده‌های منطق فازی را برای عملکرد کنترل نیروی پیزوالکتریک^{۱۶} میراگرهای اصطکاکی که جهت جلوگیری از آسیب سازه‌ها در برابر انواع مختلف تحریک‌های زلزله در پایه سازه‌ها نصب می‌شوند را ارائه دادند [۱۸]. حمید رحمانی سامانی و همکاران بر روی یک میراگر اصطکاکی قابل تنظیم جدید کار نمودند که مفهومی از سیستم‌های نیمه فعال محسوب گردیده است [۱۹]. در سال ۲۰۱۸ کاپریلی و موسینی^{۱۷} بر روی یک قاب مهاربندی واگرا در آزمایشگاه سازه تحقیق نمودند و به بررسی رفتار این قاب پس از نصب میراگر قائم در محل تقاطع با مهاربندها پرداختند [۲۰]. نعیم^{۱۸} و همکاران دستگاه جدیدی به نام MSD^{۱۹} را

¹⁴- Sang-Hyun Lee

¹⁵- Jacket platforms

¹⁶- Piezoelectric

¹⁷- Caprili and Mussini

¹⁸- Naem

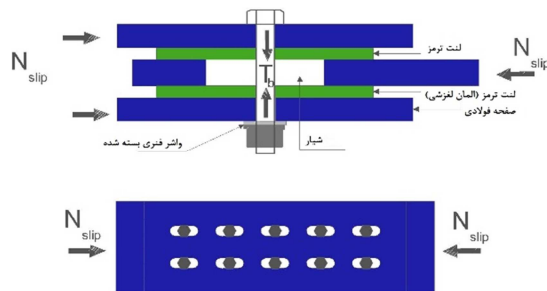
¹⁹- Multi-slit damper

²⁰- Takeshi Sano

²¹- Knee bracing frame

²²- Coulomb's theory

- ۲- ثابت نگه داشتن ضریب لغزش بین صفحات لغزش (انتخاب صحیح المان لغزش)،
- ۳- اجتناب از شکست ترد اجزای اتصال زمانی که به آستانه لغزش می‌رسند (انتخاب مصالح مناسب برای پیچ‌ها) (شکل ۲).



شکل ۲- مکانیزم لغزش صفحات بر روی یکدیگر

۲-۲- محاسبه نیروی لغزشی در اتصال پیچی شیاردار اصطکاکی

در اتصالات پیچی شیاردار اصطکاکی چون دو سطح لغزش وجود دارد، خواهیم داشت:

$$F = 2T_b N \mu \quad (2)$$

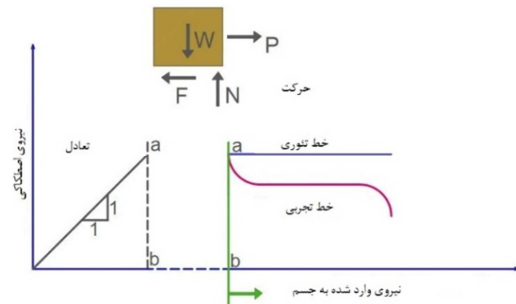
که در آن، N تعداد پیچ‌ها، T_b نیروی کششی در یک پیچ و μ ضریب اصطکاک می‌باشد. با توجه به رابطه (۲)، می‌توان دریافت که با تغییر تعداد پیچ‌ها محدوده وسیعی از نیروهای لغزش را در اختیار خواهیم داشت.

۳- معرفی میراگر

۳-۱- اجزای میراگر

میراگر اصطکاکی پیشنهادی، از دو صفحه لنت ترمز به همراه صفحات فولادی تشکیل شده است که استفاده از لنت ترمز در این تحقیق و همچنین شکل و فرم هندسی و منحصر به فرد میراگر اصطکاکی جنبه نوآوری تحقیق به شمار رفته و به دلیل داشتن خواص مکانیکی مناسب از جمله ضریب اصطکاک ۰/۴۱، باعث افزایش بهره‌وری و جذب انرژی بالاتری در قاب مهاربندی مجهز به میراگر شده است [۲۵]. همچنین شکل هندسی به همراه ابعاد پیشنهادی برای میراگر اصطکاکی در جهت بهینه شدن و

واقعی است، به عنوان مثال، ضریب اصطکاک μ در هر لحظه نه تنها به ماده لغزشی بستگی دارد بلکه به شرایط حاضر در فصل مشترک دو سطح نیز وابسته است.



شکل ۱- رابطه نیروی اصطکاکی با نیروی عمود بر سطح [۲۴]

آزمایش‌های انجام شده نشان می‌دهد ضریب اصطکاک به عواملی از جمله فشار تماس، سرعت لغزش، دما، تعداد چرخه‌های بارگذاری و غیره بستگی دارد، ولی با وجود همه این مشکلات، رابطه (۱) بهترین تئوری موجود برای میراگرهای اصطکاکی می‌باشد.

۲-۱- اتصالات پیچی شیاردار اصطکاکی

اتصالات پیچی شیاردار اصطکاکی در قاب‌های مهاربندی هم‌مرکز به صورت لغزشی خطی و لغزشی چرخشی می‌باشد و در قاب‌های گیردار از این اتصالات در اتصال تیر به ستون به صورت لغزشی چرخشی نیز استفاده می‌کنند. این اتصالات توانایی فراهم کردن تعداد سیکل‌های اتلاف انرژی با خرابی کم و یا بدون خرابی سازه‌ای را دارند. در این اتصالات اصطکاک لازم برای ایجاد اتلاف انرژی از طریق نیروی پیش کش پیچ‌ها تأمین می‌شود. یک اتصال پیچی لغزشی که به عنوان یک المان اتلاف‌کننده انرژی در یک سازه مورد استفاده قرار می‌گیرد، باید سیکل‌های جابه‌جایی تکرارشونده بدون کاهش مقاومت، پایداری یا توانایی اتلاف انرژی باشد. فاکتورهای مهم که در کارایی رضایت‌بخش اتصالات لغزشی پیچی تأثیر دارند عبارتند از:

- ۱- ثابت نگه داشتن فشار اتصال بین صفحات لغزش (استفاده از واشر فنی و تخت)،

مدل کامل شده میراگر شامل تیر فولادی، پیچ‌های اتصال و صفحات لنت ترمز مشاهده می‌شود. همچنین شکل ۵ نحوه قرارگیری میراگر در داخل قاب مهاربندی را نشان می‌دهد.

۲-۲-۳- مشخصات مصالح در مدل‌سازی

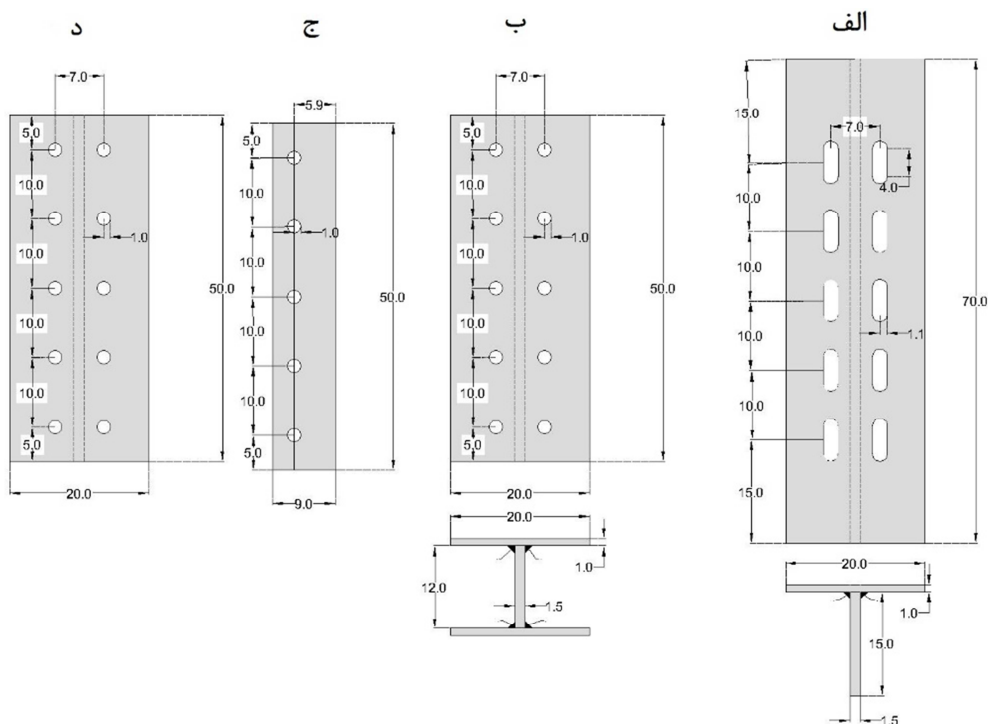
برای مدل‌سازی صحیح میراگر بایستی تمامی مصالح به‌کار برده شده در مدل‌سازی را به صورت جداگانه معرفی نمود. برای کلیه مقاطع فولادی شامل تیرها از مشخصات مربوط به فولاد ST-37 و برای پیچ‌های اتصالات از پیچ پر مقاومت استاندارد ASTM-A325 G5 استفاده شده است. مقادیر ارائه شده در جدول ۱ خصوصیات فولاد، مدول الاستیسیته و ضریب پواسون را نشان می‌دهد. برای معرفی رفتار تنش کرنش فولاد در نرم‌افزار از داده‌های مربوط به تست کشش استفاده شده است. تست استاندارد کشش فولاد بر طبق استاندارد ASTM E8/E8M-21 می‌باشد که جلوتر به صورت کامل به آن اشاره شده است.

افزایش بازدهی این سیستم کنترل غیرفعال، کمک شایانی نموده است.

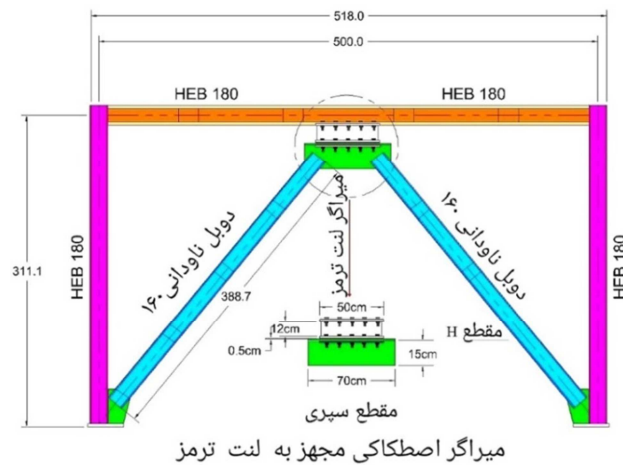
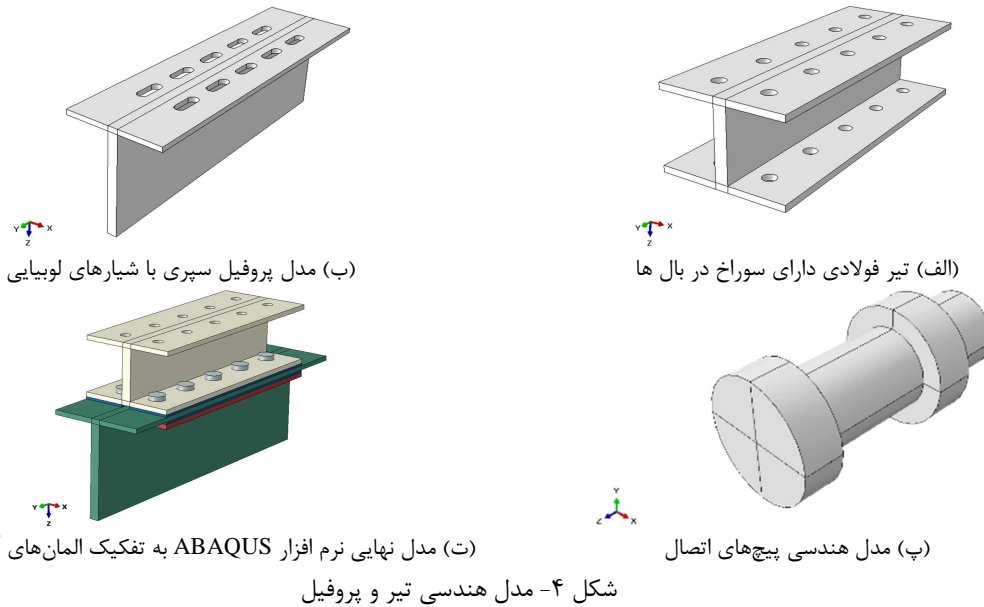
۲-۳- مدل‌سازی عددی و صحت‌سنجی

۱-۲-۳- معرفی مختصر برنامه ABAQUS

برای انجام تحقیق در ابتدا از روش عددی اجزای محدود با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS استفاده گردیده است و در ادامه به بررسی مدل‌های مجهز به میراگر اصطکاکی به همراه لنت ترمز پرداخته شده است. برای مدل‌سازی هندسی میراگر اصطکاکی با لنت ترمز در ابتدا بایستی تمامی قطعات مربوط به اتصال شامل تیرها، ستون، شابلون اتصال، قطعه اتصال و پیچ‌های نشیمن را به‌طور جداگانه مدل‌سازی نمود. برای مدل‌سازی تیر فولادی، صفحات لنت ترمز و همچنین پیچ‌های اتصالات، از المان C3D8 استفاده شده است. اشکال ۳ تا ۵ مدل هندسی مربوط به اجزای میراگر به همراه اتصالات را نشان می‌دهد. همچنین در شکل ۴، مدل هندسی تیر فولادی با سوراخ‌هایی در بال‌های آن و پروفیل سپری با شیارهای لوبیایی شکل نشان داده شده است. در شکل ۴- ت نیز



شکل ۳- قطعه (الف) مقطع T سپری، (ب) مقطع H تیرورق، (ج) صفحه آریست و صفحه فولادی در قسمت تحتانی و (د) صفحه آریست در قسمت فوقانی



جدول ۱- مشخصات مکانیکی فولاد مصرفی

Elasticity modulus (MPa)	Yield stress (MPa)	Ultimate stress (MPa)	Density (kg/m ³)	Poisson ratio
۲۰۰	۴۱۱	۴۸۸	۷۸۵۰	۰/۳

در این رابطه، M_v لنگر پیچشی وارده، d_b قطر پیچ و k ضریبی است که روی دسته آچار درج شده است و T_b نیز مقدار نیروی پیش‌تنیدگی می‌باشد.

۳-۲-۳- صحت‌سنجی آزمایشگاهی

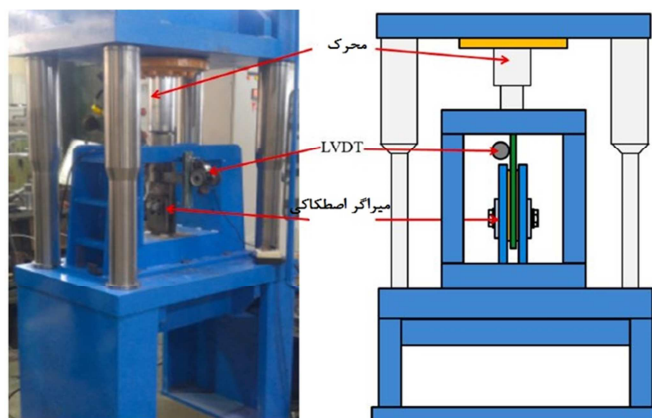
در ادامه، چون بحث مدل‌سازی در نرم‌افزار اجزای محدود مطرح می‌گردد به جهت نیاز به مشخصات مصالح در نرم‌افزار، اقدام به انجام تست کشش مستقیم مطابق شکل ۶ بر روی فولاد و لنت ترمز در آزمایشگاه سازه

با استفاده از رابطه (۳) و همچنین جدول شماره ۱۰-۴-۲ در مبحث دهم مقررات ملی ساختمان [۲۶] میزان پیش‌تنیدگی پیچ‌ها براساس طول پیچ (۳/۹ سانتیمتر) و قطر پیچ (۲ سانتیمتر) در نتیجه ۱/۳ دور پیچانده می‌شود. بنابراین پیش‌تنیدگی پیچ‌ها معادل ۹ تن نیرو برآورد می‌گردد.

$$T_b = M_v / kd_b \quad (۳)$$

استفاده گردیده است.

ASTM E8 برای کشش فلزات از استاندارد



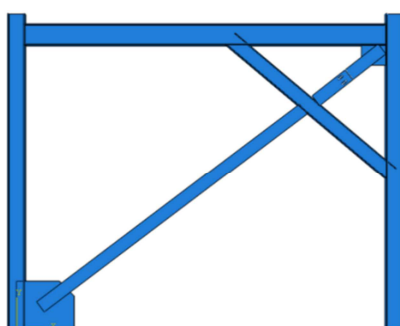
شکل ۶- دستگاه آزمون تست کشش مستقیم



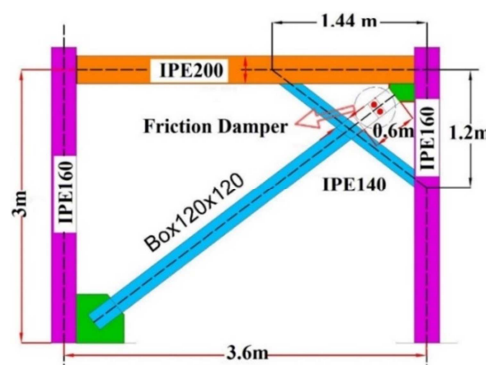
شکل ۷- مدل آزمایشگاهی تحت بارگذاری چرخه‌ای میراگر

اصطکاکی [۲۳]

تطبيق بسیار مناسبی میان نمودارهای چرخه‌ای در شکل ۹ مشاهده می‌شود. بنابراین در ادامه به مطالعه پارامتریک پرداخته می‌شود.



(ب)



(الف)

شکل ۸- (الف) مدل‌سازی میراگر اصطکاکی در نرم افزار و (ب) نمایی از قاب مهاربندی زانویی مجهز به میراگر اصطکاکی [۲۳]

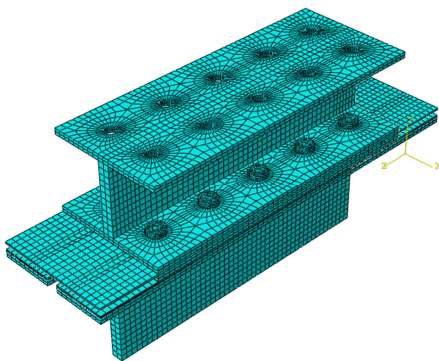
مش‌بندی مدل می‌باشد. بنابراین ابتدا المان‌های مورد استفاده در مدل را مشخص کرده و یک مش‌بندی اولیه صورت می‌پذیرد. سپس مدل میراگر تحت بارگذاری مورد

۳-۳- مش‌بندی و بهینه‌سازی آن

یکی از مراحل اساسی در انجام تحلیل مش‌بندی مناسب اعضای مختلف میراگر و همچنین بهینه‌یابی اندازه

تغییرمکان با در نظر گرفتن تغییرات اندازه مش منحنی همگرایی رسم می‌گردد (شکل ۱۰).

در زمینه المان‌بندی به دلیل اصطکاک سطوح روی یکدیگر دقت شده است تا المان‌بندی از نوع C3D8R باشد. برای به دست آوردن نتایج مناسب از تحلیل تنش مدل در محل‌هایی که اتصالات به یکدیگر می‌رسند، مش‌بندی ریزتر از سایر نقاط در نظر گرفته می‌شود. مش‌بندی پیچ‌ها، تیر فولادی، صفحات فولادی و آزرست عموماً با استفاده از المان هشت‌گره‌ای C3D8 انجام گردیده است. در بعضی از نقاط به دلیل هندسه خاص استفاده از این المان امکان‌پذیر نبوده و به جای آن از المان ده‌گره‌ای C3D10 استفاده شده است.



شکل ۱۰- (ب) مش ۰/۰۱ متری

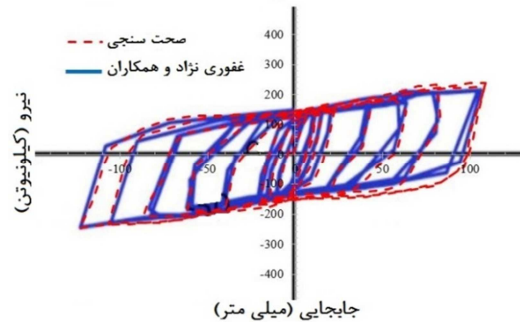
شکل ۱۰- مش‌بندی کامل میراگر به همراه اتصالات کلی در نرم افزار ABAQUS

افزون پوش‌آور برای میراگر اصطکاکی در نرم‌افزار ABAQUS صورت پذیرفته است [۲۷]. سپس جابه‌جایی حد تسلیم و حد نهایی مطابق شکل ۱۲ محاسبه گردیده و پس از آن براساس رابطه (۴) شکل‌پذیری معادل ۶/۳۷ محاسبه شده و برحسب آن پروتکل بارگذاری مناسب انتخاب و اعمال گردیده است.

$$\mu_{max} = \frac{\Delta_u}{\Delta_y} \quad (4)$$

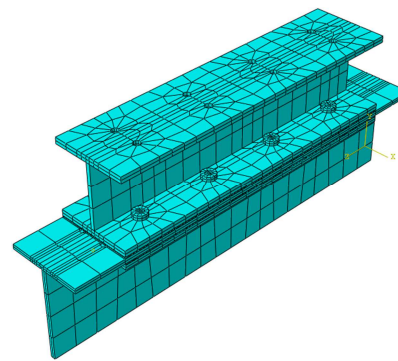
در رابطه فوق، Δ_u برابر با جابه‌جایی حد نهایی، Δ_y برابر با جابه‌جایی حد تسلیم و μ_{max} شکل‌پذیری می‌باشد.

نظر تحلیل شده و نتایج آنالیز تنش و تغییرمکان یک نقطه خاص روی مدل استخراج می‌گردد.



شکل ۹- تطابق مناسب بین نمودار صحت‌سنجی ABAQUS با مقاله غفوری و همکاران [۲۳]

در مراحل بعد اندازه مش ریزتر شده و مجدداً تحلیل مدل انجام شده و نتایج آن ثبت می‌گردد. در نهایت با استفاده از نتایج تحلیل تنش و اندازه‌گیری

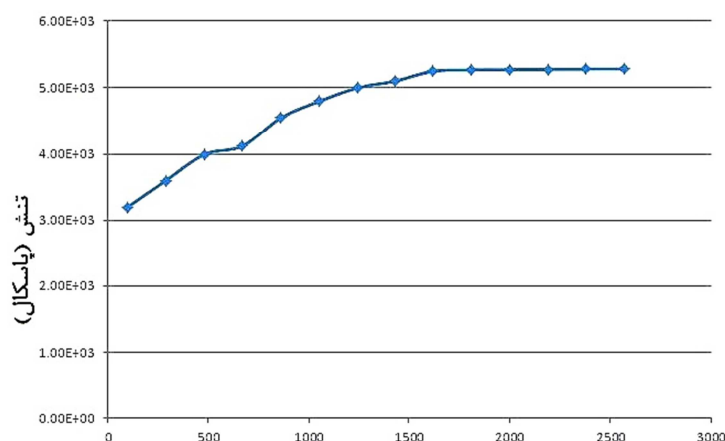


شکل ۱۰- (الف) مش ۰/۰۵ متری

همانطور که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود نوع المان‌بندی و ابعاد آن بگونه‌ای تنظیم شده است تا تطابق بسیار مناسبی از نظر اندازه مش‌ها در المان‌هایی نظیر آزرست و صفحات فولادی که با یکدیگر تماس دارند، برقرار شود زیرا در اثر اصطکاک سطوح اشاره شده میراگر عمل می‌نماید.

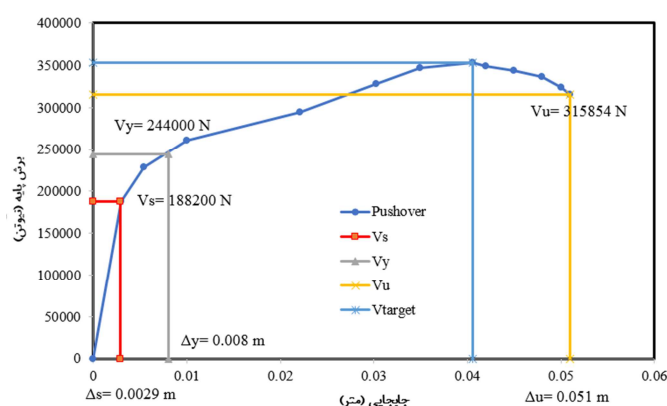
۳-۴- پروتکل‌های بارگذاری مورد استفاده

پیش از انتخاب پروتکل بارگذاری مناسب، نخست تحلیل استاتیکی غیرخطی با الگویی از روش تحلیل بار



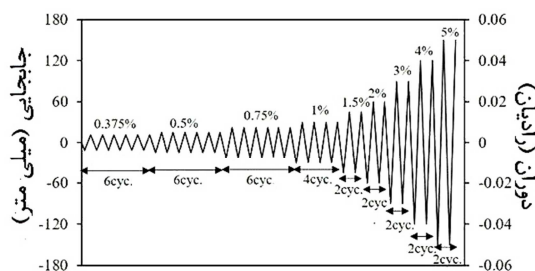
تعداد المان‌ها در مش بندی

شکل ۱۱- نمودار مش‌بندی بهینه



شکل ۱۲- نمودار بار افزون میراگر اصطکاکی لنت ترمز

می‌دهد.



گام بارگذاری

شکل ۱۳- پروتکل بارگذاری SAC [۲۸]

۴- مطالعه پارامتری

۴-۱- تعداد مدل‌ها و تغییر متغیرهای تحقیق

با در نظر گرفتن متغیرهای تحقیق حاضر و در جهت رسیدن به یک دسته ابعاد قابل قبول و بهینه برای میراگر اصطکاکی پیشنهادی لازم است که مدل‌هایی با تعداد پیچ‌ها و ضخامت آزبست مختلف طراحی شوند.

پروتکل‌های بارگذاری SAC در بسیاری از آیین‌نامه‌ها از جمله AISC/ANSI358-10 سال‌هاست که به عنوان پروتکل‌های بارگذاری استاندارد در تست‌های مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرد [۲۸]. پروتکل بارگذاری SAC به دلیل ارائه الگوی بارگذاری ساده‌تر، برای تست میراگرها و سازه‌های فلزی عموماً کاربرد بیشتری دارد. در این پروتکل، چون سرعت بارگذاری و سیکل‌های رفت و برگشتی آن در ابتدا بسیار آهسته‌تر از سایر پروتکل‌ها است، میزان جذب انرژی بهتری در میراگر دیده می‌شود. پروتکل بارگذاری SAC به دو صورت دوران و تغییرمکان مقیاس شده و ملاک در این پژوهش بحث تغییرمکان بوده است. از ویژگی‌های بسیار مهم پروتکل بارگذاری SAC شبیه‌سازی مناسب اثرات زلزله بر روی اتصالات فولادی و میراگرها می‌باشد. شکل ۱۳ پروتکل بارگذاری SAC مورد استفاده در تحلیل میراگر را نشان

برای مثال مدل B-6-A-2.5 به معنای میراگر لنت ترمز با ۶ عدد سوراخ و پیچ به ضخامت ۲/۵ میلی‌متر می‌باشد. علت استفاده از ضخامت ۲/۵ و ۵ میلی‌متر در دسترس بودن چنین ضخامت‌هایی در بازار ایران می‌باشد که این امر هزینه تهیه لنت ترمز را کاهش می‌دهد و همچنین با توجه به تحلیل‌هایی که پیش از مطالعات عددی صورت پذیرفته در خصوص خواص مکانیکی صفحات لنت ترمز ضخامت‌های کمتر از ۲/۵ میلی‌متر از استحکام برشی کمتری برخوردار بوده و ضخامت‌های بیشتر از ۵ میلی‌متر نیز عملاً تأثیر بسزایی در بهبود شرایط اصطکاکی و افزایش کارایی این نوع میراگر ندارد.

برای این منظور از سه آرایش متفاوت برای پیچ‌ها و دو ضخامت مختلف برای آزیست استفاده گردیده است. جدول ۲ مشخصات نمونه‌های مدل‌سازی شده جهت تعیین مدل بهینه را نشان می‌دهد. همچنین جدول ۳ مشخصات نمونه‌های مدل‌سازی شده با تعداد صفحات و آرایش متفاوت صفحات و پیچ‌ها را مشخص می‌کند. نحوه نامگذاری مدل‌ها در جدول ۲ به این صورت می‌باشد که حرف لاتین B نماد حرف نخست کلمه Brake pad به معنای لنت ترمز می‌باشد، عدد بعدی بیانگر تعداد پیچ به کار رفته و حرف سوم A نوع آزیست به جهت ضخامت را مشخص می‌کند که عدد پایانی بیانگر ضخامت صفحه آزیست به کار رفته در این مدل می‌باشد.

جدول ۲- مشخصات نمونه‌های مدل‌سازی شده جهت تعیین مدل بهینه

نام مدل	تعداد پیچ	ضخامت آزیست (mm)
B-6-A-2.5	۶	۲/۵
B-10-A-2.5	۱۰	۲/۵
B-14-A-2.5	۱۴	۲/۵
B-6-A-5	۶	۵
B-10-A-5	۱۰	۵
B-14-A-5	۱۴	۵

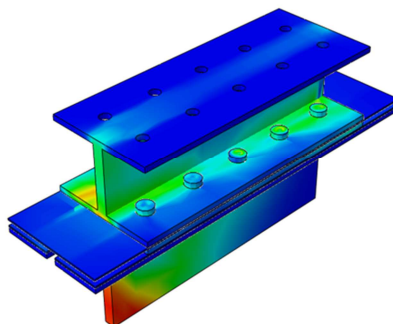
جدول ۳- مشخصات نمونه‌های مدل‌سازی شده با تعداد صفحات و آرایش متفاوت صفحات و پیچ‌ها

نام مدل	تعداد لایه‌های آزیست	ضخامت آزیست (mm)	تعداد پیچ	تعداد صفحات فلزی
B-10-A2.5-3	۳	۲/۵	۱۰	۲
B-10-A2.5-4	۴	۲/۵	۱۰	۲
B-10-A2.5-2	۲	۲/۵	۱۰	۱

۴-۲- نتایج تحلیل مدل میراگر

شکل ۱۴، خروجی تنش مایزر در مدل را نشان می‌دهد. یکی از موارد مهم در بحث خروجی‌های حاصله کرنش رخ داده در میراگر می‌باشد که در گام آخر بارگذاری همانطور که در اشکال ۱۵- ب و پ دیده می‌شود تمرکز تنش در آزیست‌های بالا و پایین بوده است و در شکل ۱۵- الف نیز نمای برش خورده از خروجی کرنش را نشان می‌دهد که توزیع کرنش در آزیست‌ها بسیار یکنواخت بوده است.

S, Mises
(Avg: 75%)

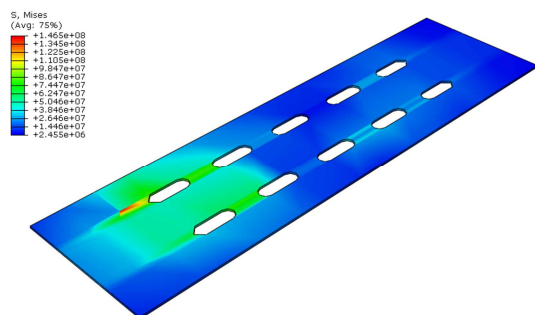


شکل ۱۴- خروجی تنش مایزر حاصله از تحلیل در

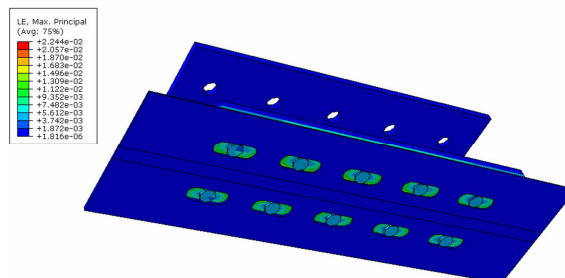
نرم‌افزار ABAQUS

در مرحله الاستیک قرار دارد. چون در لحظه آخر جابه‌جایی به سمت صفر و در جهت چپ حرکت داشته است تنش در سمت چپ لنت بیشتر ایجاد شده است.

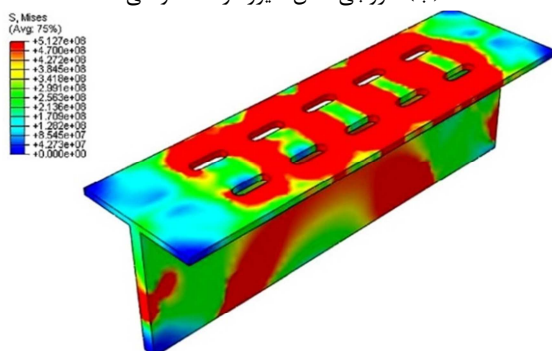
همچنین در ناحیه میانی میراگر نیز یک تمرکز تنش رخ داده است. تنش مایز در محل جان مقطع سپری در شکل ۱۵- ت به علت اینکه محل اعمال بار است، تنش زیادی روی سپری اعمال شده است، اما تنش



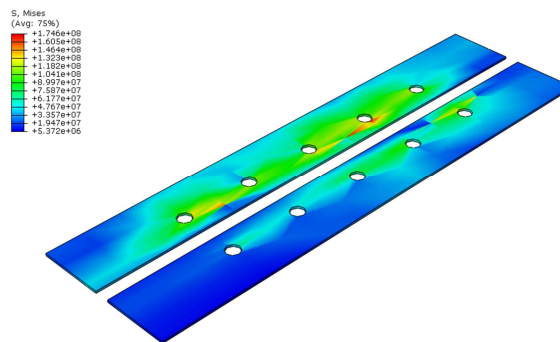
(ب) خروجی تنش مایز در لنت فوقانی



(الف) خروجی کرنش الاستیک در لنت فوقانی



(ت) تنش مایز در المان سپری شکل



(پ) تنش مایز در لنت تحتانی

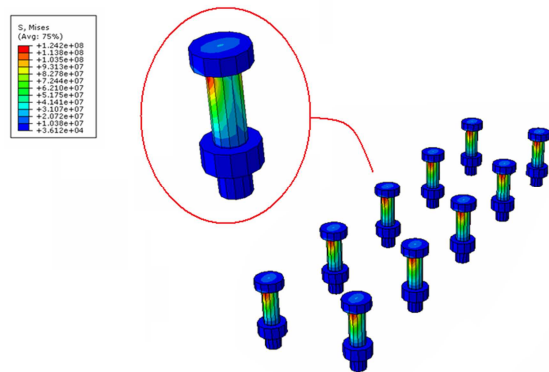
شکل ۱۵- خروجی‌های تنش و کرنش در میراگر

ت ایجاد تمرکز تنش می‌نماید که این روند قابل پیش بینی بوده است، زمانی که نیرو یا جابه‌جایی زیادی اعمال شود، پس از اجزای اتصال شامل پیچ و مهره و غیره، اولین مقطعی که خراب می‌شود قطعه T شکل می‌باشد.

باتوجه به نحوه ساخت و نصب این میراگر اصطکاکی و با در نظر گرفتن این نکته که کلیه اتصالات در این مجموعه از نوع پیچ و مهره‌ای بوده و قابلیت تعویض مقطع فراهم می‌باشد، بنابراین اجزای آسیب‌دیده پس از زلزله به راحتی قابل جایگزینی خواهند بود. همچنین زمانی که میراگر در قاب مورد تحلیل قرار

زمانی که میراگر اصطکاکی لنت ترمز بدون حضور قاب و به تنهایی در نرم‌افزار اجزای محدود تحلیل می‌گردد، بار به صورت مستقیم به جان سپری اعمال گردیده و در حقیقت سایر المان‌ها بدون حرکت باقی مانده و تنها مقطع سپری میان دو لنت فوقانی و تحتانی و همچنین تسمه فولادی، حرکت نموده و ایجاد اصطکاک می‌نماید. بنابراین کرنش پلاستیک معادل در قطعه T شکل رخ داده است. میراگر اصطکاکی در ابتدا، به دلیل مکانیزم حرکتی مقطع سپری در راستای طول سوراخ‌های لوبیایی و همچنین اطراف محل اتصال مطابق شکل ۱۵-

است. همان طوری که در شکل ۱۶ مشخص است، حداکثر تنش در پیچ‌های اتصال و در محل اتصال بال به جان تیر آشکال ایجاد شده است. ایجاد تنش در پیچ‌ها به دلیل عملکرد اصطکاکی میراگر و درگیر شدن پیچ‌ها در سوراخ لوبیایی می‌باشد. ایجاد تنش حداکثر در تیر آشکال نیز به دلیل تمرکز تنش در محل اتصال بال و جان تیر می‌باشد که بایستی با تنش حداکثر مجاز کنترل گردد. مقدار تنش حداکثر ایجاد شده در پیچ‌ها و اتصال جان به بال حدود ۸۶/۳۹ مگاپاسکال می‌باشد که در محدوده تنش مجاز قرار دارد.



شکل ۱۶- توزیع تنش مایز در پیچ‌ها در مدل B-10-A-2.5

۵- مقایسه نتایج تحلیل مدل‌های مختلف

به منظور مقایسه مدل‌های ساخته شده و مشخص کردن مدل یا مدل‌های بهینه لازم است منحنی پوش^{۲۸} حداکثر ظرفیت سیکل‌های نمودارهای چرخه‌ای^{۲۹} ترسیم و با همدیگر مقایسه گردد. این منحنی‌ها می‌توانند از نقطه نظر ظرفیت بارگذاری، شکل‌پذیری و انرژی مستهلک شده مورد مقایسه قرار گیرند. شکل ۱۷ مقایسه منحنی‌های چرخه‌ای تمامی مدل‌های مورد بررسی را نشان می‌دهد. به دلیل ماهیت اصطکاکی و منحصر به فرد لنت ترمز در کنار فولاد، مشاهده می‌شود که این خصوصیت ذاتی لنت ترمز موجب گردیده که توزیع کرنش الاستیک یکنواختی مطابق شکل ۱۵- الف بر روی آن رخ

می‌گیرد به دلیل اعمال مستقیم بار به تیردهانه مهاربندی، روند ایجاد تنش‌ها در قطعه میراگر و اجزای آن کمی متفاوت تر خواهد بود. در نیرو یا جابه‌جایی‌های کم، بیشتر نیرو را قاب جذب می‌نماید ولی زمانی که جابه‌جایی قاب تحت اثر زلزله زیاد شود و این جابه‌جایی از حد الاستیک میراگر عبور نماید در این صورت خرابی در میراگر آغاز می‌شود که تا قبل از این جابه‌جایی مکانیزم رفتاری الاستیک و رفتار خطی خواهد بود و قاب و میراگر و مجموعه کامل آنها در زلزله‌های کم و متوسط تجربه خرابی زیادی را نخواهند داشت.

همانگونه که می‌دانیم مدل‌های کلاسیک پلاستیسیته شامل معیار ترسکا^{۲۳}، موهرکلمب^{۲۴}، دراگر پراگر^{۲۵} و فون مایز^{۲۶} می‌باشند. به دلیل اینکه فرم هندسی معیار فون مایز در فضای سه بعدی به صورت استوانه‌ای شکل بوده و سه معیار دیگر را پوشش می‌دهد، بنابراین استفاده از این معیار در تحلیل‌های اجزای محدود نسبت به سایر مدل‌ها کاربرد بیشتری داشته و به عنوان یکی از معیارهای مناسب برای کنترل تنش‌های وارده بر مدل‌های اجزای محدود، مورد استفاده قرار می‌گیرد. در مورد المان‌هایی که تحت تنش‌های ترکیبی نرمال و برشی قرار دارند می‌توان با استفاده از معیار تنش فون مایز بررسی کرد که آیا جسم به نقطه تسلیم رسیده است یا خیر. در المان مورد نظر تنش‌های اصلی براساس دایره موهر^{۲۷} محاسبه می‌شود. اگر این تنش‌های اصلی را در رابطه کنترلی فون مایز قرار دهیم در صورتی که مقدار تنش فون مایز به دست آمده، از مقدار تنش تسلیم ماده کمتر باشد یعنی شکست رخ نمی‌دهد. ولی اگر این تنش از تنش تسلیم ماده بیشتر باشد، مفهومش رسیدن المان به نقطه تسلیم است. بنابراین برای کنترل تنش حداکثر ایجاد شده در مدل از خروجی این تنش استفاده شده

²³-Tresca Criterion

²⁴-Mohr Coulomb

²⁵-Drucker Prager

²⁶-Von Mises

²⁷-Mohr's circle

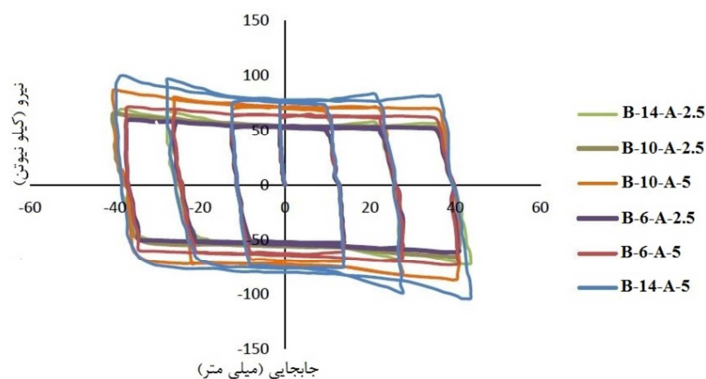
²⁸-Backbone

²⁹-Hysteresis

مشاهده نگردد و میراگر بتواند تغییرمکان‌های بزرگ را تحمل نماید.

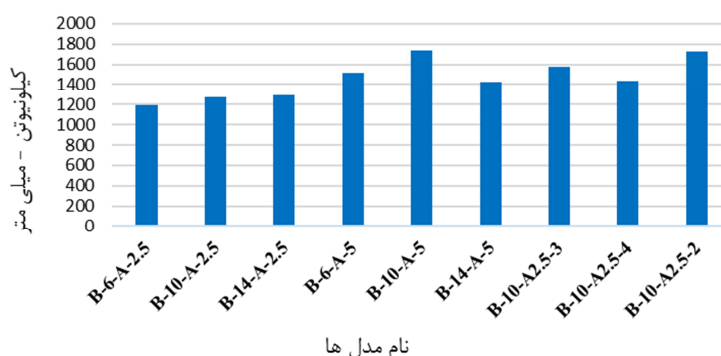
شکل ۱۸ سطح زیر نمودارهای پوش حاصله در مدل‌های ارائه شده با تعداد و آرایش متفاوت صفحات آزرست و فولاد و پیچ‌ها را مشخص می‌کند.

دهد و در ادامه منحنی چرخه‌ای حاصله دچار زوال سختی و مقاومت در این دامنه جابه‌جایی نگردد. همچنین طراحی صحیح لنت‌های ترمز نیز کمک می‌کند تا حلقه‌های نمودارهای چرخه‌ای به‌دست آمده دارای شکلی یکنواخت و منظم بوده و پس از اعمال سیکل‌های متمادی نیز کوچک‌ترین افت و کاهش در نیروی لغزش آنها



شکل ۱۷- مقایسه منحنی‌های چرخه‌ای تمامی مدل‌های مورد بررسی

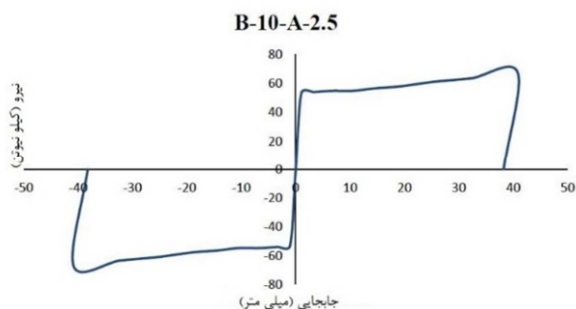
سطح زیر نمودار پوش



شکل ۱۸- مقایسه سطح انرژی مستهلک شده توسط هر میراگر

زلزله توسط اصطکاک توانسته عملکرد مناسبی داشته باشد که این خصوصیت موجب می‌گردد این نوع میراگر در هر سطح زلزله‌ای قابل استفاده باشد.

میراگر اصطکاکی لنت ترمز در تغییرمکان‌های کوچک تقریباً الاستیک عمل نموده، یعنی برای زلزله‌های خفیف می‌تواند جذب انرژی را به همراه برگشت‌پذیری سریع داشته باشد. در تغییرمکان‌های حدنهایی نیز جذب انرژی آن افزایش پیدا نموده، بدین معنی که برای زلزله‌های شدید می‌تواند به خوبی وارد عمل شده و حسب تغییرمکان‌های وارده، جذب انرژی بسیار بیشتری را داشته باشد. برای نمونه شکل ۱۹، در میراگر مدل B-10-A-2.5 میزان ۲۱ درصد افزایش نیرو در جابه‌جایی‌های انتهایی ایجاد شده است. در حقیقت میراگر اصطکاکی در تغییرمکان‌های کوچک و بزرگ با جذب انرژی ناشی از



شکل ۱۹- خروجی منحنی پوش مدل B-10-A-2.5.

ترمز در ارتفاع‌های بالاتر به دلیل جابه‌جایی بیشتر عملکرد مناسب این نوع سیستم کنترل غیرفعال را بهتر به اثبات می‌رساند. همچنین اختلاف قابل توجهی در بخش سطح زیر نمودار در شکل ۱۸ و نیروی برش پایه در جدول ۴ مشاهده می‌شود که تمام پارامترهای سازه‌ای مورد اشاره منجر به افزایش میزان کارایی سیستم کنترل غیرفعال میراگر اصطکاکی لت ترمز در ساختمان‌های متعارف خواهند شد.

همانگونه که در جدول ۴ ملاحظه می‌شود ضریب رفتار و شکل‌پذیری و اضافه مقاومت در قاب مهاربندی مجهز به میراگر بیشتر از قاب مهاربندی با آرایش هشتی می‌باشد، که این اختلاف در قاب یک طبقه دارای یک دهانه کمتر بوده و با افزایش تعداد طبقات کارایی این سیستم بهتر نمایان می‌گردد. برای نمونه پارامتر شکل‌پذیری در سازه وابسته به جابه‌جایی‌های حد نهایی و تسلیم می‌باشد، بنابراین استفاده از میراگر اصطکاکی لت

جدول ۴- مقایسه پارامترهای سازه‌ای در حالت قاب بدون میراگر و قاب مجهز به میراگر

ضرایب لرزه‌ای					
درصد اختلاف (%)	واحدها	قاب مجهز به میراگر	قاب بدون میراگر	پارامترها	
۱۱/۶	KN	۱۲۱	۱۰۷	V_s	برش پایه متناظر با تشکیل اولین مفصل پلاستیک
۹/۱	m	۰/۰۱۱	۰/۰۱	Δ_s	تغییر مکان متناظر با V_s
۲/۷	KN/m	۱۱۰۰۰	۱۰۷۰۰	K_E	سختی اولیه منحنی پوش‌آور
۱۳/۸	KN	۲۸۳	۲۴۴	V_0	برش پایه ماکزیمم
۱۷/۱	m	۰/۱۷۵	۰/۱۴۵	Δ_m	تغییر مکان متناظر با V_0
۱۳/۸	KN/m	۲۱۲/۲۵	۱۸۳	$0.75V_0$	۷۵ درصد برش پایه ماکزیمم
۱۴/۳	m	۰/۰۲۱	۰/۰۱۸	Δ_1	تغییر مکان متناظر با $0.75V_0$
۱۴/۳	m	۰/۰۲۸	۰/۰۲۴	Δ_y	تغییر مکان متناظر با V_y
۰/۶	KN/m	۷۵۸۰/۳۵	۷۶۲۵	K_0	سختی الاستیک
۲۸/۸	m ²	۴۵/۵۶	۳۲/۴۵	A_2	سطح زیر نمودار دوخطی
۲۲/۲	m	۰/۰۹	۰/۰۷	Δ_E	تغییر مکان متناظر با V_E
۱۶/۸	kN	۱۰۰۱/۱۹	۸۳۳/۳۵	V_E	نیروی برش پایه سازه در هنگام رفتار الاستیک
-	-	۲/۳۳	۲/۲۸	R_s	ضریب اضافه مقاومت
-	-	۳/۵۳	۳/۴۱	R_μ	ضریب شکل‌پذیری
-	-	۸/۲۷	۷/۷۸	R	ضریب رفتار
-	-	۶/۲۵	۶/۰۴	μ	شکل‌پذیری

اتصال و مهاربند دیده می‌شود که موجب ایجاد خسارت در این نواحی و در نتیجه منجر به اختلال در کاربری مهاربند می‌گردد.

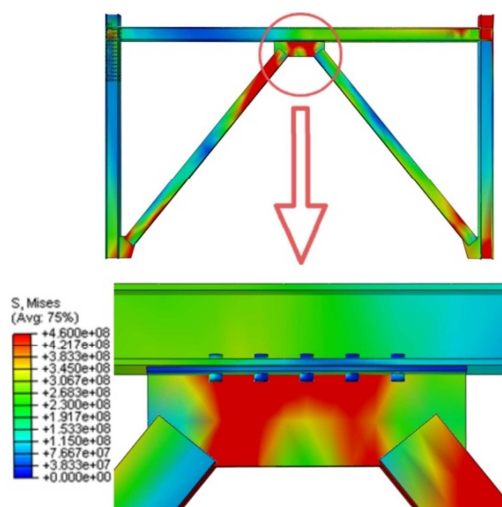
در شکل ۲۱- الف و ب مقایسه بین منحنی‌های چرخه‌ای قاب و پوش قاب در حالت با میراگر و بدون میراگر نشان داده شده است. همانطور که در این اشکال مشاهده می‌گردد، ظرفیت قاب مورد مطالعه با حضور

در شکل ۲۰- الف ملاحظه می‌شود توزیع تنش فون مایز در ناحیه اتصالات منجر به خسارت نشده، تنش‌های حاصله به دلیل حضور میراگر کاهش پیدا نموده است و عملکرد مناسب میراگر اصطکاکی در قاب مشاهده می‌شود. همچنین شکل ۲۰- ب توزیع تنش در قاب مهاربندی با آرایش هشتی را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل مشخص شده است تنش حداکثر در صفحه

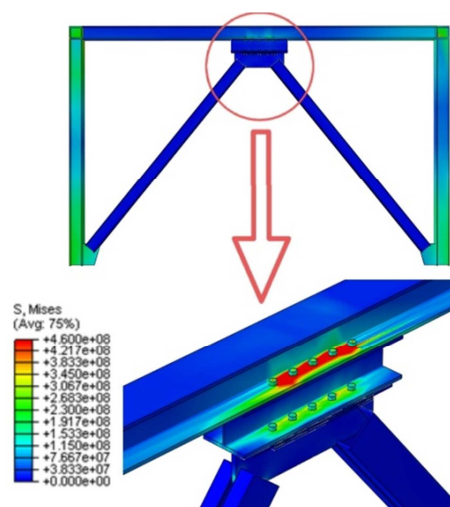
آرایش هشتی را مشخص می‌کند.

میراگر افزایشی حدود ۲۷ درصد از خود نشان می‌دهد که

این امر نقش مؤثر این میراگر در قاب‌های مهاربندی با

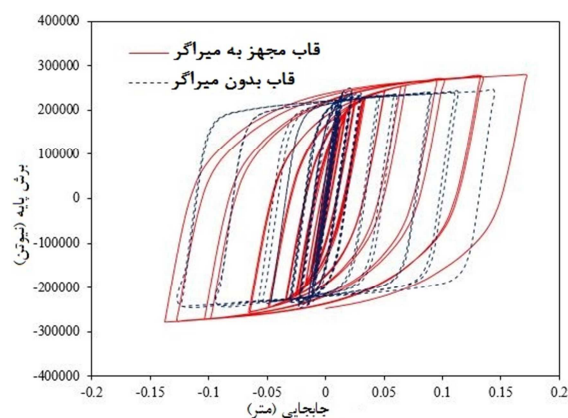


(ب) توزیع تنش در قاب مهاربندی با آرایش هشتی

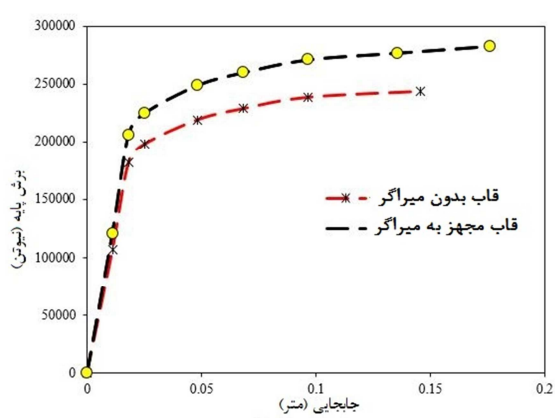


(الف) توزیع تنش در قاب مجهز به میراگر اصطکاکی لنت ترمز

شکل ۲۰- توزیع تنش در مدل



(ب)



(الف)

شکل ۲۱- مقایسه منحنی‌های (الف) چرخه‌ای قاب و (ب) پوش قاب در حالت با میراگر و بدون میراگر

۱- مدل‌های شماره B-6-A-5 و B-10-A-5 و B-14-A-5

و B-6-A-2.5 عینا مشابه با مدل‌های B-14-A-2.5 و B-10-A-2.5

می‌باشند با این تفاوت که ضخامت لایه آزیست در آنها به دو برابر

افزایش پیدا کرده است، یعنی از ۲/۵ میلیمتر به

۵ میلیمتر رسیده است. این افزایش ضخامت

منجر به افزایش ظرفیت جذب انرژی شده است

اما این افزایش جذب انرژی چندان قابل توجه

نیست و این نشان می‌دهد که عملا افزایش

ضخامت آزیست تأثیر چندان زیادی در بهبود

رفتار میراگر نداشته است.

۶- نتیجه‌گیری

در این پژوهش المان میراگر اصطکاکی لنت ترمز

توسعه پیدا کرده است که یک رفتار هیستریزس پایدار در

کشش و فشار دارد. همچنین به مطالعه عددی میراگر و

مطالعه آزمایشگاهی مصالح مرتبط با میراگر اصطکاکی

لنت ترمز پرداخته شده است. نه مدل مورد بررسی در

نرم‌افزار ABAQUS و یک مدل نیز مورد مدل‌سازی بر

روی قاب شورون قرار گرفته‌اند. نتایج زیر از این تحقیق

حاصل می‌گردد:

چندبرابری پیدا می‌نماید و در برگشت مجدداً جذب انرژی داشته و زمانی که تغییر مکان‌ها زیاد می‌شود مجدداً افزایش چندبرابری جذب انرژی دیده می‌شود. همچنین در طول تحلیل، میراگر تخریب نشده است و عمده تمرکز تنش و جذب انرژی توسط آزیست‌ها انجام شده است.

۸- جدول ۴ نشان می‌دهد که تمامی پارامترهای لرزه‌ای اعم از ضرایب شکل‌پذیر، اضافه مقاومت، سختی و ضریب رفتار همگی در حالت قاب مجهز به میراگر بهبود چشمگیری پیدا نموده‌اند.

۹- از مهمترین ویژگی‌های این میراگر این است که سختی الاستیک نسبتاً کمی دارد ولی سختی پلاستیک آن به نسبت قابل ملاحظه‌ای بزرگ‌تر از سختی الاستیک است و این یک مزیت مهم در میراگر محسوب می‌شود و آن این است که در هر سطح زلزله‌ای قابل استفاده بوده و جذب انرژی لرزه‌ای را انجام می‌دهد.

۱۰- خروجی‌های توزیع کرنش در آزیست‌ها نشان می‌دهد که توزیع کرنش در تمامی سطح آزیست یکسان بوده و جذب انرژی یکنواختی در حرکت رفت‌وبرگشتی رخ داده است و بدلیل توزیع مناسب نیرو می‌تواند رفتار بسیار بهتری را نسبت به سایر میراگرها داشته باشد.

۲- خروجی تحلیل قاب نشان می‌دهد که عمده تمرکز تنش در ناحیه میراگر اصطکاکی لنت ترمز بوده است و حضور میراگر مانع از ایجاد تمرکز تنش در ناحیه اتصالات قاب شده است که این امر میزان آسیب‌دیدگی قاب را در حین زلزله کاهش می‌دهد.

۳- بررسی بین مدل‌های مختلف نشان می‌دهد مدلی که دارای ۱۰ پیچ می‌باشد دارای بیشترین میزان مستهلک‌سازی انرژی بوده و جذب انرژی بسیار بیشتری نسبت به سایر مدل‌های مورد بررسی دارد.

۴- نتایج تحلیل‌ها نشان می‌دهد که اضافه کردن تعداد صفحات بدلیل مکانیزم خاص، تأثیر زیادی در افزایش جذب انرژی ندارد.

۵- همچنین افزودن ضخامت صفحات آزیست نیز تأثیر زیادی در افزایش جذب انرژی ندارد.

۶- افزودن میراگر اصطکاکی به قاب منجر به افزایش جذب انرژی و عدم تمرکز نیرو در مهاربندها شده و مانع کمانش مهاربند در فشار شده است که ۳۱ درصد جذب انرژی در قاب مجهز به میراگر افزایش پیدا کرده است.

۷- جذب انرژی در حرکات رفت‌وبرگشتی شکل پرچمی نمودار حاصله نشان می‌دهد که میراگر با افزایش تغییر مکان ظرفیت جذب انرژی

مراجع

- [1] Pall, R., Gauthier, G., & Pall, A. (2000). "Friction-dampers for Seismic Upgrade of Quebec Police Headquarters, Montreal", *Proceeding on the 12th World Conference on Earthquake Engineering*.
- [2] Robinson, W., & Greenbank, L. (1976). "An extrusion energy absorber suitable for the protection of structures during an earthquake", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 4(3), 251-259.
- [3] Venuti, W. J. (1976). "Energy absorption of high strength bolted connections, Test Report", *Struct Steel Educ Council*.
- [4] Pall, A. S., & Marsh, C. (1982). "Response of friction damped braced frames", *Journal of Structural Engineering*, 108(9), 1313-1323.
- [5] Fitzgerald, T. F., Anagnos, T., Goodson, M., & Zsutty, T. (1989). "Slotted Bolted Connections in Aseismic Design for Concentrically Braced Connections", *Earthquake spectra*, 5(2), 383-391.
- [6] Li, C., & Reinhorn, A. M. (1995). *Experimental and analytical investigation of seismic retrofit of structures with supplemental damping: Part II-Friction devices*, Technical report NCEER-95-0009. Buffalo (NY): State University of New York at Buffalo.
- [7] Dyke, S. J., Spencer Jr, B. F., Sain, M. K., & Carlson, J. D. (1996). "Modeling and control of magnetorheological dampers for seismic response reduction", *Smart Materials and Structures*, 5(5), 565-575.

- [8] Mualla, I. H. (2000). "Parameters influencing the behavior of a new friction damper device", In *Smart Structures and Materials 2000: Smart Systems for Bridges, Structures, and Highways*, 3988, 64-74.
- [9] Mualla, I. H. & Belev, B. (2002). "Performance of steel frames with a new friction damper device under earthquake excitation", *Engineering Structures*, 24(3), 365-371.
- [10] Mualla, I. H., Nielsen, L. O., Belev, B., Liao, W. I., Loh, C. H., & Agrawal, A. (2002). "Numerical predictions of shaking table tests on a full scale friction-damped structure", In *12th European Conference on Earthquake Engineering*, London.
- [11] Nielsen, L. O., & Mualla, I. H. (2002) *A friction damping system low order behavior and design*, Report BYG-DTU, R-0302002, ISSN 1601-2917, ISBN 87-7877-090-4.
- [12] Lu, L. Y. (2004). "Semi-active modal control for seismic structures with variable friction dampers", *Engineering structures*, 26(4), 437-454.
- [13] Bhaskararao, A. V., & Jangid, R. S. (2006). "Harmonic response of adjacent structures connected with a friction damper", *Journal of Sound and Vibration*, 292(3-5), 710-725.
- [14] De la Cruz, S. T., López-Almansa, F., & Oller, S. (2007). "Numerical simulation of the seismic behavior of building structures equipped with friction energy dissipaters", *Computers and Structures*, 85(1-2), 30-42.
- [15] Lee, S. H., Park, J. H., Lee, S. K., & Min, K. W. (2008). "Allocation and slip load of friction dampers for a seismically excited building structure based on storey shear force distribution", *Engineering Structures*, 30(4), 930-940.
- [16] Golafshani, A. A., & Gholizad, A. (2009). "Friction damper for vibration control in offshore steel jacket platforms", *Journal of Constructional Steel Research*, 65(1), 180-187.
- [17] Vaseghi, J. Navaei, S., Navayinia, B., & Roshantabari, F. (2009). "A parametric assessment of friction damper in eccentric braced frame", *International Journal of Civil and Environmental Engineering*, 3(10), 361-365.
- [18] Ozbulut, O. E., & Hurlbaas, S. (2010). "Fuzzy control of piezoelectric friction dampers for seismic protection of smart base isolated buildings", *Bulletin of Earthquake Engineering*, 8(6), 1435-1455.
- [19] Mirzaeefard, H., Mirtaheri, M., & Rahmani Samani, H. (2013). "Seismic evaluation of structures equipped with cylindrical friction dampers", *7th National Congress of Civil Engineering*, Shahid Nikbakht Faculty of Engineering.
- [20] Caprili, S., Mussini, N., & Salvatore, W. (2018). "Experimental and numerical assessment of EBF structures with shear links", *Steel Compos. Struct*, 28(2), 123-138.
- [21] Naem, A., & Kim, J. (2019). "Seismic performance evaluation of a multi-slit damper", *Engineering Structures*, 189, 332-346.
- [22] Sano, T., Shirai, K., Suzui, Y., & Utsumi, Y. (2020). "Dynamic loading tests and seismic response analysis of a stud-type damper composed of multiple friction units with disc springs", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 49(13), 1259-1280.
- [23] Ghafouri-Nejad, A., Alirezaei, M., Mirhosseini, S. M., & Zeighami, E. (2021). "Parametric study on seismic response of the knee braced frame with friction damper", In *Structures*, 32, 2073-2087.
- [24] Khaleghian, F., & Tehranizade, M. (2009). "Design of a new type of friction damper with brake pads", *Journal of Seismology and Earthquake Engineering*, 9(4), 171-182.
- [25] Orłowicz, A. W., Mroz, M., Wnuk, G., Markowska, O., Homik, W., & Kolbusz, B. (2016). "Coefficient of Friction of a Brake Disc-Brake Pad Friction Couple", *Archives of Foundry Engineering*, 16, 196-200.
- [26] Ministry of Roads and Urban Development of Iran. (2013). *Iran National Building Code*, Topic 10. Tehran.
- [27] Hosseini, P., Hosseini, M., & Omranizadeh, S. M. (2019). "The effect of height of structure on the accuracy of non-linear static analysis methods in steel structures with lead rubber bearing (LRB) base isolators", *Journal of Civil and Environmental Researches*, 5(1), 35-49.
- [28] AISC/ANSI358-10. (2010). *Prequalified Connections for Special and Intermediate Steel Moment Frames for Seismic Applications*. In. Chicago.