

## Experimental and Numerical Evaluation of a Novel Dual-Slip Friction Damper for Structural Seismic Vibration Control

Majid Davoodi <sup>1</sup>, Javad Vaseghi Amiri <sup>\*2</sup>

1- Ph.D. Student, Civil Eng. Department, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran  
2- Professor, Faculty of Civil Engineering, Babol Noshirvani University of technology, Babol, Iran

### ABSTRACT

*In this study, a novel friction damper with dual slip forces is proposed for the control of structural displacement and drift. The seismic performance of the damper is investigated through both experimental and numerical modeling. The proposed friction damper features several notable characteristics, including easy installation and deployment, a simple vibration control mechanism, optimized weight, and resistance to buckling and distortion. Additionally, it exhibits varying seismic performance based on the pre-tensioning force of the bolts, leading to adjustable slip force and performance levels. To evaluate the hysteresis behavior of the proposed damper, experimental modeling was conducted, and a numerical model of the damper was created and assessed using the OpenSees software. For assessing the damper's effectiveness in controlling structural vibrations, two buildings (4-story and 8-story) were analyzed under three different conditions: without any control system, with a bracing system, and with the proposed friction damper, subjected to seismic loading from five major earthquakes. The results demonstrated that equipping the structure with the proposed damper significantly reduced both displacement and drift compared to the conditions without a control system and with bracing. Based on the findings, the proposed damper showed acceptable performance in controlling structural displacement and drift. Given its variable performance levels, it can be considered a suitable tool for displacement and drift control in structures.*

### ARTICLE INFO

**Receive Date:** 16 July 2024  
**Revise Date:** 11 September 2024  
**Accept Date:** 28 November 2024

### Keywords:

*Dynamic Analysis  
Passive Control  
Seismic Response  
Drift Control  
Novel Friction damper  
Energy Dissipation*

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: [10.22065/jsce.2024.459543.3426](https://doi.org/10.22065/jsce.2024.459543.3426)

\*Corresponding author: Javad Vaseghi Amiri  
Email address: [Vaseghi@nit.ac.ir](mailto:Vaseghi@nit.ac.ir)

## ارزیابی آزمایشگاهی و عددی عملکرد میراگر نوین اصطکاکی با دو سطح لغزش در کنترل ارتعاشات لرزه‌ای سازه

مجید داودی<sup>۱</sup>، جواد واثقی امیری<sup>۲\*</sup>

۱- دانشجوی دکتری سازه، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران

۲- استاد، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران

### چکیده

در این پژوهش یک میراگر اصطکاکی نوین با دو سطح لغزش جهت کنترل جابه‌جایی و دریافت سازه پیشنهاد شده‌است. عملکرد لرزه‌ای میراگر در قالب مدل‌سازی آزمایشگاهی و عددی مورد بررسی قرار گرفته‌است. میراگر اصطکاکی ارائه شده علاوه بر داشتن ویژگی‌های شاخصی همچون: نصب و به‌کارگیری آسان، سازوکار کنترل ارتعاشات ساده، وزن بهینه میراگر، مقاومت میراگر در برابر کمانش و اعوجاج، دارای عملکرد لرزه‌ای متفاوت براساس نیروی پیش‌تنیدگی پیچیده بوده که منجر به ایجاد نیروی لغزش و سطح عملکردی متغیر میراگر شده‌است. در راستای ارزیابی رفتار هیستریزیس میراگر پیشنهادی مدل‌سازی آزمایشگاهی و همچنین مدل عددی میراگر در بستر نرم‌افزار اینسیس انجام شد. به جهت ارزیابی عملکرد میراگر پیشنهادی در کنترل ارتعاشات سازه، دو ساختمان ۴ و ۸ طبقه تحت سه وضعیت مختلف: سازه بدون سیستم کنترل، سازه مجهز به سیستم مهاربند و سازه مجهز به میراگر اصطکاکی تحت بارگذاری لرزه‌ای ۷ زمین لرزه بزرگ مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که تجهیز سازه به میراگر پیشنهادی موجب کاهش قابل توجه جابه‌جایی و دریافت سازه نسبت به شرایط عدم تجهیز به سیستم کنترلی و سیستم مهاربندی شده‌است. براساس نتایج حاصل از پژوهش مشخص گردید که میراگر پیشنهادی عملکرد قابل قبولی در کنترل جابه‌جایی و دریافت سازه داشته و با توجه به سطح عملکردی متغیر میراگر می‌تواند به عنوان یک ابزار مناسب برای کنترل جابه‌جایی و دریافت سازه به‌کارگیری شود.

کلمات کلیدی: آنالیز دینامیکی، کنترل غیرفعال، پاسخ لرزه‌ای، کنترل دریافت، میراگر نوین اصطکاکی، استهلاک انرژی.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	شناسه دیجیتال:	دریافت	بازنگری	پذیرش	انتشار آنلاین	چاپ
	<a href="https://doi.org/10.22065/jsce.2024.459543.3426">10.22065/jsce.2024.459543.3426</a>	۱۴۰۳/۰۴/۲۷	۱۴۰۳/۰۶/۲۱	۱۴۰۳/۰۹/۰۸	۱۴۰۳/۰۹/۰۸	۱۴۰۴/۰۳/۳۱
		*نویسنده مسئول:		جواد واثقی امیری		
		پست الکترونیکی:		Vaseghi@nit.ac.ir		

## ۱- مقدمه

یکی از چالش‌های همیشگی مهندسين عمران طراحی سازه‌هایی ایمن با سطح کارایی بالا در برابر بارگذاری‌های جانبی (بار باد و بار زلزله) بوده‌است. با توجه به قرار گرفتن بخش عظیمی از سازه‌ها در مناطق با لرزه‌خیزی بالا، طراحی و پیاده‌سازی سازه‌هایی مقاوم در برابر بارهای لرزه‌ای از اهمیت به‌سزایی برخوردار بوده‌است [۱]. از راهکارهای مناسب جهت مقاوم‌سازی سازه‌ها در برابر بارگذاری‌های جانبی، به‌کارگیری روش‌های کنترل ارتعاشات سازه بوده‌است، در این روش‌ها با استفاده از سازوکار مشخصی اقدام به پایداری سازه در برابر بارهای لرزه‌ای، کاهش پاسخ‌ها و کاهش دریافت (جابه‌جایی نسبی طبقات) می‌گردد. در این راستا تلاش‌های زیادی برای کاهش نیاز لرزه‌ای سازه‌ها از طریق جایگزین کردن مفهوم استهلاک انرژی به‌جای افزایش مقاومت سازه انجام شده است [۲]. در روش‌های سنتی مقاوم سازی برای سیستم‌های مهاربندی براساس مستهلک شدن انرژی از طریق تغییرشکل مفاصل پلاستیک بوده که این امر سبب خسارات سازه‌ای فراوان شده و در اکثر مواقع به هزینه‌های زیادی برای بازسازی نیازمندند. استفاده از مکانیزم‌های کنترل ارتعاشات سازه رویکردی نوین در طراحی سازه‌ها می‌باشد و می‌تواند تاثیر بارهای محیطی را کاهش داده و رفتار لرزه‌ای سازه را به میزان قابل‌توجهی افزایش دهد [۳]. به‌طور کلی، سیستم‌های اتلاف انرژی به انواع مختلفی از جمله کنترل فعال [۴]، کنترل نیمه فعال [۵]، کنترل ترکیبی [۶] و کنترل غیرفعال طبقه‌بندی می‌شوند [۷، ۸].

امروزه سیستم‌های اتلاف انرژی غیرفعال به طور گسترده برای بهبود پاسخ لرزه‌ای سازه مورد استفاده قرار می‌گیرند. میراگرهای غیرفعال با جذب بخش قابل‌توجهی از انرژی ورودی، عملکرد قابل‌قبولی در کنترل ارتعاشات سازه داشته [۱۱]، که عملکرد این سیستم کنترلی در مطالعات مختلف [۱۴-۱۱] مورد ارزیابی قرار گرفته‌است. در یک طبقه‌بندی کلی میراگرهای غیرفعال شامل انواع مختلفی از جمله: میراگرهای فلزی<sup>۱</sup>، اصطکاک<sup>۲</sup>، ویسکوالاستیک<sup>۳</sup>، ویسکوز<sup>۴</sup>، جرمی تنظیم شونده<sup>۵</sup> و مایع تنظیم شونده<sup>۶</sup> بوده‌اند. در این میان، میراگرهای اصطکاک<sup>۲</sup> به عنوان ابزار کنترلی مقرون به صرفه، با ویژگی‌هایی همچون: برپاسازی و تنظیم آسان مورد توجه طراحان سازه قرار گرفته است [۱۱]. این میراگرها به طور قابل توجهی عملکرد لرزه‌ای سازه را از طریق شکل‌گیری رفتار هیستریزیس پایدار با ظرفیت اتلاف انرژی قابل‌قبول افزایش می‌دهند. از دیگر مزایای میراگرهای اصطکاک<sup>۲</sup> می‌توان به مکانیسم اتلاف انرژی ساده، ساخت ارزان و بهره‌برداری آسان اشاره کرد [۱۵]. رفتار میراگرهای اصطکاک<sup>۲</sup> و مکانیزم استهلاک انرژی در این میراگر به طور کلی بر اساس اصطکاک بین دو سطح تحت تنش<sup>۷</sup> (پیش‌تنیده) تعریف می‌شود. براین اساس با اعمال نیرو (تحریک لرزه‌ای) به میراگر، سطوح آماده لغزش شده و انرژی لرزه‌ای براساس اصطکاک بین دو سطح لغزش مستهلک می‌گردد. ایده استفاده از میراگرهای اصطکاک<sup>۲</sup> در سازه‌های ساختمانی برای اولین بار توسط (Pall, 1979) مطرح شد [۱۶] و تا به امروز انواع مختلفی از میراگر اصطکاک<sup>۲</sup> همچون: میراگر اصطکاک<sup>۲</sup> اتصال مفصلی [۱۷]، میراگرهای اصطکاک<sup>۲</sup> خود متمرکز (SCED<sup>۸</sup>) [۱۸]، فنرهای اصطکاک<sup>۲</sup> [۱۹-۲۱]، میراگرهای اصطکاک<sup>۲</sup> چرخشی [۲۲]، اتصالات اصطکاک<sup>۲</sup> لغزشی (SFJ<sup>۹</sup>)، سیستم‌های میرایی اصطکاک<sup>۲</sup> هیبریدی توسط محققین مختلف ارائه شده‌است. با توجه به عملکرد قابل‌قبول میراگرهای اصطکاک<sup>۲</sup> در کنترل ارتعاشات سازه، تا به امروز مطالعات نسبتاً جامعی توسط محققین بر عملکرد و توسعه آن انجام شده‌است. در این راستا پال<sup>۱۰</sup> و همکاران در سال ۱۹۸۰ اولین کاربرد میراگرهای اصطکاک<sup>۲</sup> را با بهره‌گیری از اتصال پیچ و مهره‌ای با لغزش محدود (LSB<sup>۱۱</sup>) را برای کنترل سازه‌های پانل بزرگ تحت بارگذاری دینامیکی معرفی کرد. در این میراگر انرژی ورودی توسط اتصالات اصطکاک<sup>۲</sup> زمانی که صفحات بتنی نسبت به یکدیگر تحت بارگذاری جانبی می‌لغزند، مستهلک می‌شود [۲۳]. فیتزگرالده<sup>۱۲</sup> و همکاران در سال ۱۹۸۹ اتصال پیچ و

<sup>1</sup> metallic

<sup>2</sup> frictional

<sup>3</sup> viscoelastic

<sup>4</sup> viscous

<sup>5</sup> tuned mass

<sup>6</sup> tuned liquid

<sup>7</sup> pre-stressed surfaces

<sup>8</sup> self-centering energy dissipative device

<sup>9</sup> Slip Friction Joints

<sup>10</sup> Pall

<sup>11</sup> limited slip bolted

<sup>12</sup> FitzGerald

مهره‌های شکافدار (SBC<sup>13</sup>) را پیشنهاد کرد که در قاب‌های مهاربندی متحدالمرکز اجرا می‌شود، این سیستم انرژی را از طریق اصطکاک تولید شده توسط صفحات کشویی فولادی تلف می‌کند [۲۴]. موالا و بلو<sup>۱۴</sup> در سال ۲۰۰۲ یک دمپر اصطکاکی پیچ و مهره ای دوار پیشنهاد کردند که از صفحات فولادی دایره‌ای با بالشتک‌های اصطکاکی تشکیل شده است [۲۵]. چو و وون<sup>۱۵</sup> در سال ۲۰۰۴ یک مدل عددی از یک میراگر اصطکاکی نوع دیوار<sup>۱۶</sup> ارائه کردند که در سازه‌های قاب بتن مسلح (RC) اجرا شد. این دمپر از یک لغزنده تفلون و یک دیوار RC تشکیل شده است و به عنوان یک دیوار به جای یک عضو از نوع مهاربندی مدل‌سازی شده است [۲۶]. سامانی<sup>۱۷</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۵ ایده میراگرهای اصطکاکی نیمه‌فعال را با معرفی میراگر اصطکاکی قابل تنظیم (AFD<sup>۱۸</sup>) به کارگرفت که پاسخ لرزه‌ای سازه را با تنظیم نیروی گیره دمپرها با استفاده از فشار هیدرولیک کنترل می‌کند [۲۷]. مارتینز و کورادلی<sup>۱۹</sup> در سال ۲۰۱۷ میراگر اصطکاکی چندگانه (MFD<sup>۲۰</sup>) را ارائه کردند که بر روی ستون‌ها نصب می‌شود و یک دستگاه پیش‌بارگذاری نیروی طبیعی مورد نیاز برای ایجاد اصطکاک را فراهم می‌کند [۲۸]. ونگ<sup>۲۱</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۷ میراگر اصطکاکی با سطح قوس (AFD<sup>۲۲</sup>) را پیشنهاد کرد که در آن نیروی اصطکاک با پیش‌فشرده‌سازی الاستومر پلی یورتان (PUE<sup>۲۳</sup>) که با جابجایی به دلیل سطوح اصطکاکی منحنی آن تغییر می‌کند، تامین می‌شود [۲۹].

در ادامه تحقیقات انجام شده، کاربرد مبتنی بر عملکرد میراگرهای اصطکاکی نیز در سال‌های اخیر توجه محققان را به خود جلب کرده است [۳۰-۳۵] که در آن از سیستم‌های کنترل چند سطحی متشکل از میراگرهای اصطکاکی برای اتلاف انرژی برای سطوح مختلف شدت زلزله استفاده می‌شود. به طور کلی یکی از ضعف‌های اصلی میراگرهای اصطکاکی عملکرد ثابت سیستم کنترلی تحت بارگذاری‌های لرزه‌ای با شدت متغییر بوده است. در این راستا میراگرهای اصطکاکی با سطح عملکرد متغییر به عنوان یکی از راه‌کارهای قابل قبول در استهلاک انرژی لرزه‌ای مدنظر قرار گرفته است. از طرف دیگر ظرفیت اتلاف انرژی یک سازه مجهز به میراگرهای اصطکاکی به نیروی لغزش دمپر بستگی دارد. بنابراین، توسعه یک رویکرد عملی برای تعیین نیروی لغزش بهینه بسیار مهم است. تایاری<sup>۲۴</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۹ یک روش طراحی مبتنی بر احتمال برای میراگرهای اصطکاکی در قاب‌های فولادی چند طبقه پیشنهاد داد. در این پژوهش هر دو نیروی لغزش دستگاه و نسبت سختی سیستم به عنوان دو پارامتر موثر بر رفتار میراگر اصطکاکی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که بیشترین احتمال آسیب در سازه تحت شرایط نیروی لغزش بالاتر و نسبت سختی کمتر رخ داده است، جایی که شکست کماتش نامطلوب قبل از فعال‌سازی کامل میراگر اصطکاکی حاکم خواهد بود [۲۶]. قربانی<sup>۲۵</sup> و همکاران در سال ۲۰۲۰ در مطالعات خود یک میراگر اصطکاکی با دو سطح عملکردی را برای کنترل پاسخ لرزه‌ای سازه تحت تحریک‌های زلزله متوسط و شدید ارائه داد. در این پژوهش که تنها به مدل‌سازی عددی رفتار میراگر اکتفا شده است، از دو نیروی لغزشی متفاوت برای دستیابی به سطح عملکرد متغییر میراگر اصطکاکی نسبت به تحریک لرزه‌ای استفاده شد. نتایج نشان داد که میراگر ارائه شده با تعیین مقادیر بهینه نیروهای لغزش دارای عملکرد قابل قبولی در کنترل ارتعاشات سازه تحت بارگذاری لرزه‌ای بوده است [۱۵]. هووا<sup>۲۶</sup> و همکاران در سال ۲۰۲۱ در مطالعات خود میراگر تنظیم شونده اصطکاکی هیسترتیک (HFTID<sup>۲۷</sup>) را برای کنترل لرزه‌ای سازه مورد مطالعه قرار داد. این میراگر متشکل از یک دمپر اینرسی تنظیم شده (TID<sup>۲۸</sup>) به موازات یک المان اصطکاک فنری هیستریز شده است. نتایج بیانگر اثربخشی و عملی بودن HFTID در کاهش پاسخ لرزه‌ای و بهبود رفتار دینامیکی سازه تحت تحریک لرزه‌ای بوده است [۱۰]. اسفا<sup>۲۹</sup> و همکاران در سال ۲۰۲۲ یک دمپر جدید اصطکاکی مبتنی بر آلیاژ حافظه شکل ترکیبی (SMA<sup>۳۰</sup>) ارائه داد. دمپر هیبریدی که دمپر اصطکاکی سوپرالاستیک (SFD<sup>۳۱</sup>) نام دارد، از مقاومت کششی بالا و

<sup>13</sup> slotted bolted connection

<sup>14</sup> Mualla and Belev

<sup>15</sup> Cho and Kwon

<sup>16</sup> wall-type friction damper

<sup>17</sup> Samani

<sup>18</sup> adjustable frictional damper

<sup>19</sup> Martínez and Curadelli

<sup>20</sup> multiple friction damper

<sup>21</sup> Wang

<sup>22</sup> arc-surfaced frictional damper

<sup>23</sup> polyurethane elastomer

<sup>24</sup> Taiyari

<sup>25</sup> Ghorbani

<sup>26</sup> Hua

<sup>27</sup> hysteretic friction tuned inerter damper

<sup>28</sup> tuned inerter damper

<sup>29</sup> Asfaw

<sup>30</sup> shape memory alloy

قابلیت خود محوری عالی کابل‌های SMA و اتلاف انرژی مکانیزم میرایی اصطکاکی بهره می‌برد. نتایج نشان داد که دمپر پیشنهادی رفتار هیستریزیک پایدار با حساسیت ناچیز به نرخ بارگذاری و دما از خود نشان می‌دهد [۳۷]. مقدم ۳۲ و همکاران در سال ۲۰۲۲ در مطالعات خود ارزیابی بر بهینه‌سازی عملکرد لرزه‌ای قاب‌های فولادی مجهز به میراگرهای اصطکاکی در سطوح عملکردی مختلف پرداخت. در این پژوهش از رویکرد جدید تکنیک بهینه‌سازی تطبیقی (AOT<sup>33</sup>) استفاده شد. اساس این روش دستیابی به توزیع یکنواخت آسیب (UDD<sup>34</sup>) در سازه برای بهره‌برداری از حداکثر ظرفیت اتلاف انرژی میراگرهاست. نتایج نشان داد که روش AOT می‌تواند منجر به طراحی بهینه میراگر اصطکاکی با هزینه‌های محاسباتی کمتر (تا ۹۸٪) در مقایسه با تکنیک‌های مرسوم شود [۱۱]. در مطالعاتی دیگر جیو<sup>35</sup> و همکاران در سال ۲۰۲۲ یک میراگر اصطکاکی خطی ابتکاری (LFD<sup>36</sup>) برای کاهش آسیب‌های لرزه‌ای پل‌هایی با عرشه تیر پیوسته تحت حرکات لرزه‌ای پیشنهاد شد. نتایج حاصل از این پژوهش که به روش عددی و در بستر نرم‌افزار OPENSEES انجام شد، نشان داد که میراگر (LFD) می‌تواند به طور موثر جابجایی‌های نسبی پل را کنترل کند [۱]. در پژوهش آرتار و کرباس<sup>37</sup> در سال ۲۰۲۲ طراحی اندازه بهینه سازه‌های اسکلت فلزی مجهز به میراگرهای اصطکاکی (FDS) به منظور جلوگیری از تأثیر آسیب‌پذیر زلزله مورد ارزیابی قرار گرفت. فرایند بهینه‌سازی با بهره‌گیری از الگوریتم GWO در راستای به حداکثر رساندن استهلاک انرژی انجام شد. نتایج نشان دهنده اثربخشی و کنترل ارتعاشات سازه براساس پارامترهای بهینه ارائه شده بود [۲]. تاتار<sup>38</sup> و همکاران در سال ۲۰۲۳ به ارزیابی عملکرد میراگرهای هیبریدی اصطکاکی تاب‌آور لرزه‌ای پرداخت (میراگرهای هیبریدی اصطکاکی ویژگی‌های اتلاف انرژی و خودمحوری را ارائه می‌دهند). نتایج این پژوهش بیانگر دستورالعمل و اصول مدلسازی عددی میراگر هیبریدی در راستای ارزیابی عملکرد آن بوده است [۳۸].

با ارزیابی مطالعات انجام شده بر میراگرهای اصطکاکی مشخص می‌گردد که این سیستم کنترلی دارای عملکرد قابل قبولی در کنترل ارتعاشات سازه بوده و به عنوان یک راه‌حل موثر مورد توجه محققین قرار گرفته است. از سوی دیگر، مفهوم طراحی لرزه‌ای میراگر اصطکاکی مبتنی بر عملکرد سازه برای سطوح مختلف شدت حرکت زمین تأکید دارد. با این حال، از آنجایی که میراگرهای اصطکاکی معمولی که قبلاً توسعه یافته‌اند، بیشتر با یک سطح عملکرد (یک نیروی لغزش) کار می‌کنند، در هر دو حرکت زمین متوسط و شدید، عملکرد مطلوبی نخواهند داشت. در این شرایط اگر نیروی لغزش برای تحریکات شدید تعیین شود، لغزش قابل توجهی را نمی‌توان در هنگام زلزله‌های متوسط انتظار داشت. از سوی دیگر، با طراحی نیروی لغزش میراگر برای زلزله‌های متوسط، انرژی تلف شده قابل توجه خواهد بود، هرچند میزان لغزش ممکن است قابل توجه باشد. با توجه به موارد مذکور مشخص می‌گردد که توسعه میراگرهای اصطکاکی با چند سطح عملکردی و ارزیابی رفتار کنترل ارتعاشات میراگر در سطح عملی با قابلیت نصب و به‌کارگیری در سازه با توجه به ماهیت تصادفی بارگذاری لرزه‌ای، به عنوان یکی از خلاهای مطالعاتی در این حیطه محسوب می‌گردد. براین اساس در این پژوهش به هدف ارائه میراگر اصطکاکی نوینی با دو سطح لغزش مطالعات آزمایشگاهی و عددی انجام شده و پس از ارائه خصوصیات و تحلیل رفتار میراگر اصطکاکی پیشنهادی، عملکرد آن در کنترل جابه‌جایی و دریافت سازه مورد ارزیابی قرار گرفته است. همچنین سعی براین بوده تا در میراگر ارائه شده ضعف‌های میراگرهای اصطکاکی قبلی که در مطالعات پیشین مورد ارزیابی قرار گرفت، برطرف شود.

## ۲- مواد و روش انجام تحقیق

### ۲-۱ طراحی پیکربندی میراگر

مکانیزم اصلی کنترل لرزه‌ای سازه توسط میراگرهای اصطکاکی، اتلاف انرژی عملی بر اساس اصطکاک بین اعضای میراگر بوده است. به بیان دیگر اصطکاک به عنوان یک عامل اساسی در فرایند جذب و استحصال انرژی در این میراگرها مدنظر بوده است. تا به

<sup>31</sup> Superelastic Friction Damper

<sup>32</sup> Moghaddam

<sup>33</sup> adaptive optimisation technique

<sup>34</sup> uniform distribution of damage

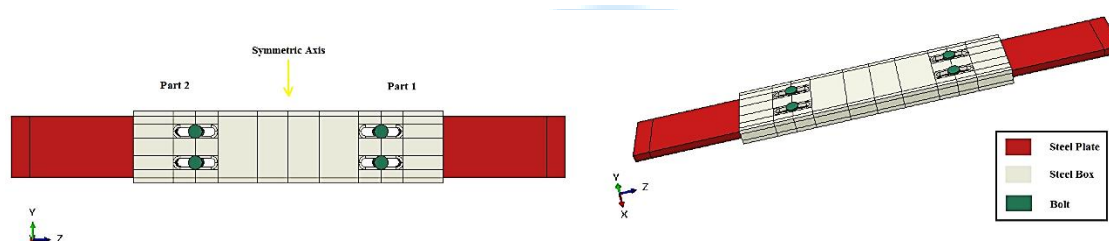
<sup>35</sup> Guo

<sup>36</sup> linear friction damper

<sup>37</sup> Artar & Carbas

<sup>38</sup> Tatar

امروز انواع مختلفی از میراگرهای اصطکاکی برای کنترل لرزه‌ای سازه ارائه شده‌است. سازوکار اصلی تمامی آنها براساس اتلاف انرژی توسط پدیده اصطکاک بوده و نکته حائز اهمیت در این میراگرها، سختی ثابت میراگر در برابر بارگذاری‌های مختلف بوده‌است. میراگر اصطکاکی با دو سطح لغزش نوعی از این میراگرها بوده که با افزایش نیروهای وارده بر سازه میزان جابه‌جایی میراگر افزایش می‌یابد و سیستم کنترلی براساس دو سطح لغزش (سطح لغزش اولیه برای بارگذاری‌های کوچک و سطح لغزش ثانویه برای بارگذاری‌های بزرگ) پیاده‌سازی می‌شود. این مهم سبب می‌گردد تا ناحیه اول موجب افزایش دوره تناوب ارتعاش سازه می‌شود و در نتیجه نیروهای لرزه‌ای را کاهش می‌دهد و ناحیه دوم باعث محدود شدن تغییر مکان‌های حدی برای مقادیر بالای کنش‌های لرزه‌ای می‌شوند. بنابراین در بحث طراحی میراگر اصطکاکی با دو سطح لغزش اصلیت‌ترین موضوع رویه پیاده سازی سطوح مختلف لغزش میراگر در حین بارگذاری لرزه‌ای بوده‌است. از طرف دیگر حفظ ویژگی‌های منحصربه‌فرد میراگر اصطکاکی همچون: نصب و به‌کارگیری آسان، سهولت در تعویض میراگر پس از رخداد زمین لرزه در صورت آسیب و سازوکار کنترل ارتعاشات ساده از یک طرف و وزن بهینه میراگر، مقاومت مصالح میراگر در برابر کمانش و اعوجاج از طرف دیگر به عنوان معیارهای اصلی طراحی میراگر در این پژوهش مدنظر قرار گرفته‌است. در شکل (۱) پیکربندی میراگر به صورت شماتیک ارائه شده‌است.



شکل ۱: شماتیک میراگر اصطکاکی با دو سطح لغزش

میراگر پیشنهادی مشتمل بر یک قوطی فلزی جهت حرکت صفحات اصطکاکی در داخل آن و دو صفحه متحرک بوده که با بهره‌گیری از سوراخ‌های لوبیایی با پیچ بر روی هم ثابت شده‌اند. با اعمال بارگذاری لرزه‌ای به میراگر براساس اصطکاک بین صفحه و جداره داخلی قوطی، انرژی لرزه‌ای مستهلک می‌گردد. این میراگر دارای تقارن محوری جهت حفظ خودکنترلی بوده و از دو بخش اصلی تشکیل شده‌است. با توجه به شکل (۱) بخش اول و بخش دوم میراگر از نقطه نظر ابعاد، مصالح و سایر جزئیات کاملاً یکسان بوده و تنها تفاوت در میزان نیروی پیش‌تنیدگی پیچ‌های بخش اول با بخش دوم بوده که منجر به ایجاد نیروی لغزش متغییر در دو بخش میراگر می‌گردد. جهت توسعه میراگر اصطکاکی سخت شونده، میزان نیروی پیش‌تنیدگی پیچ‌ها در بخش دوم دو برابر بخش اول در نظر گرفته شده‌است. براین اساس میراگر ارائه شده دارای سطح عملکردی متغییر نسبت به شدت بارگذاری لرزه‌ای بوده که در مدل‌های آزمایشگاهی و عددی عملکرد آن مورد ارزیابی قرار گرفته‌است. براساس مطالعات انجام شده [۴۰، ۴۱] میزان نیروی مقاوم در اتصالات پیچی از رابطه (۱) پیروی می‌کند:

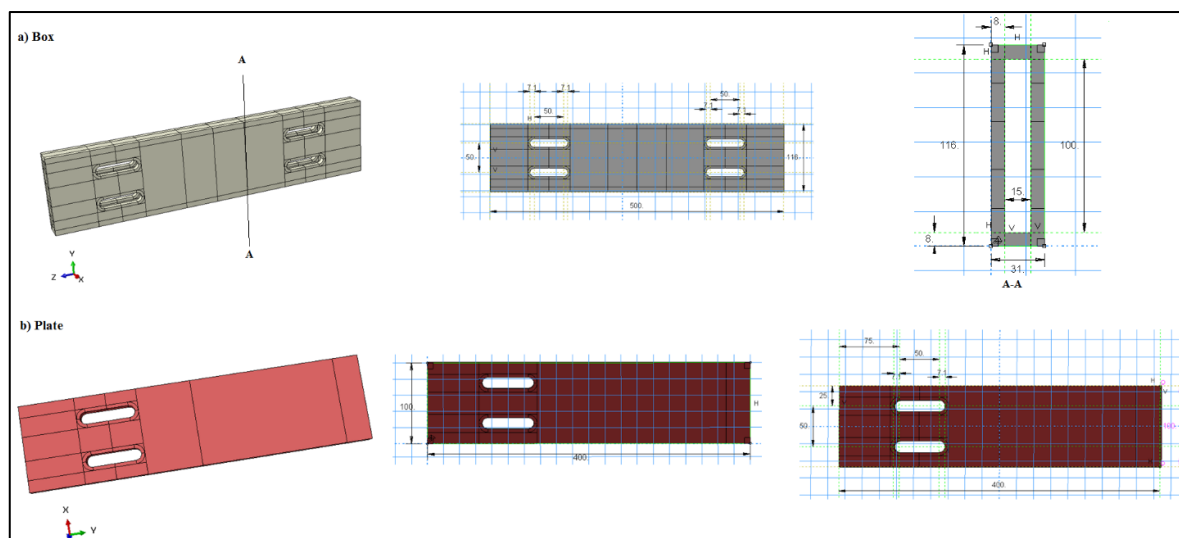
$$F_R = \frac{k_s n \mu}{\gamma} F_p \quad (1)$$

در رابطه (۱) پارامتر  $F_R$  بیانگر میزان نیروی مقاوم (نیروی لغزش) اتصال پیچی بوده که برای نیروهای کمتر از مقادیر  $F_R$  صفحات متصل شده بدون حرکت باقی می‌مانند، پارامتر  $F_p$  بیانگر میزان نیروی پیش‌تنیدگی پیچ،  $n$ : تعداد صفحات روی هم قرار گرفته،  $K_s$ : ضریب تصحیح بوده که عمدتاً بر اساس شکل هندسی سوراخ پیچ دارای مقداری بین ۰/۶ تا ۱ می‌باشد، این پارامتر برای سوراخ لوبیایی معادل با ۰/۷ در نظر گرفته می‌شود.  $\mu$ : ضریب اصطکاک بین سطوح لغزش و پارامتر  $\gamma$  ضریب اطمینان بوده‌است. براساس رابطه (۱) مشخص می‌گردد که مقادیر نیروی لغزش در میراگر پیشنهادی به طور مستقیم با میزان نیروی پیش‌تنیدگی پیچ‌ها در دو بخش میراگر مرتبط بوده است، براین اساس با در نظر گرفتن مقادیر متغییر برای نیروی پیش‌تنیدگی پیچ‌ها میتوان انتظار سطح عملکردی متغییر میراگر تحت بارگذاری لرزه‌ای را داشت. با توجه به توضیحات ارائه شده و با ارزیابی شکل شماتیک میراگر پیشنهادی (شکل ۱) مشخص می‌گردد که طرح پیکربندی میراگر بسیار ساده بوده و به راحتی با بازکردن پیچ‌های میراگر قابلیت نصب/کارگذاری و تعویض (در صورت نیاز) را داشته‌است. در این میراگر ضخامت صفحات متحرک دو برابر ضخامت قوطی در نظر گرفته شده‌است، این مهم منجر به مزیت‌هایی همچون: وزن پایین و

مقاومت بالا در برابر کمانش، اعوجاج میراگر تحت بارهای دوره‌ای می‌گردد که به عنوان یکی از ضعف‌های اصلی میراگرهای قبلی مطرح بوده‌است.

## ۲-۲ مدل‌سازی آزمایشگاهی میراگر

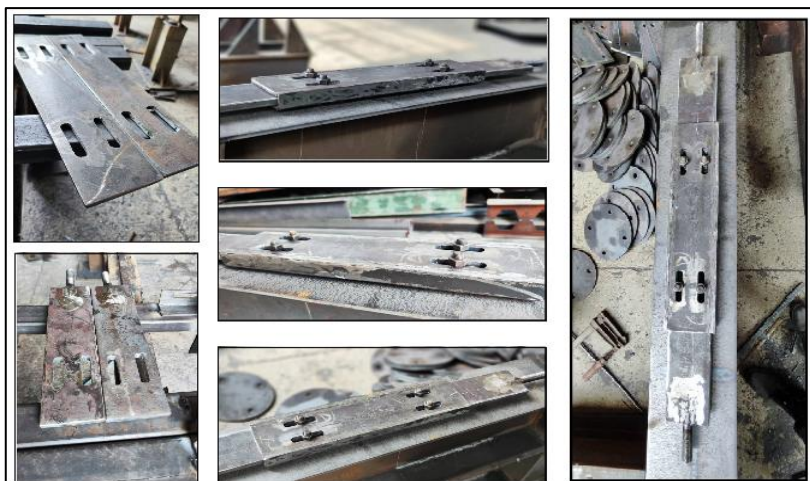
به جهت ارزیابی عملکرد میراگر اصطکاکی پیشنهادی، ابتدا مدل فیزیکی میراگر در ابعاد مناسب ایجاد و تحت تست‌های آزمایشگاهی، عملکرد لرزه‌ای آن مورد بررسی قرار گرفته‌است. ابعاد و اجزا مختلف میراگر به همراه جزئیات هر یک از بخش‌های میراگر در شکل (۲) نمایش داده شده‌است.



شکل ۲: ابعاد، مشخصات و جزئیات مدل میراگر (a) قوطی، (b) صفحات متحرک

جهت ایجاد مدل فیزیکی، برای قوطی و همچنین صفحات متحرک از مصالح فولاد ST52 استفاده شده‌است، همچنین جهت تامین مقاومت میراگر در برابر کمانش، اعوجاج و پیچش اعضا، از ورق با ضخامت 16 mm برای صفحات متحرک و ضخامت 8 mm برای قوطی استفاده شده‌است. پیچ‌های مدل فیزیکی از نوع پیچ مقاوم M10 براساس استاندارد ASTM<sup>۳۹</sup> بوده‌است. در مدل آزمایشگاهی جهت ایجاد دو نیروی پیش‌تنیدگی متفاوت در بخش اول و دوم میراگر با بهره‌گیری از ابزار گشتاورسنج<sup>۳۹</sup> پیچ و همچنین استاندارد موجود، میزان گشتاور متفاوت جهت فیکس کردن پیچ‌ها در بخش اول و دوم اعمال گردیده‌است، براین اساس پیچ‌های بخش اول دارای نیروی پیش‌تنیدگی 24 KN و پیچ‌های بخش دوم میراگر دارای نیروی پیش‌تنیدگی 48 KN به جهت ایجاد نیروی لغزش متغییر در میراگر بوده‌است. در شکل (۳) نمایی از مدل فیزیکی میراگر ایجاد شده به همراه بخش‌های مختلف آن نمایش داده شده‌است.

<sup>39</sup> torque meter



شکل ۳: روند ساخت مدل فیزیکی میراگر

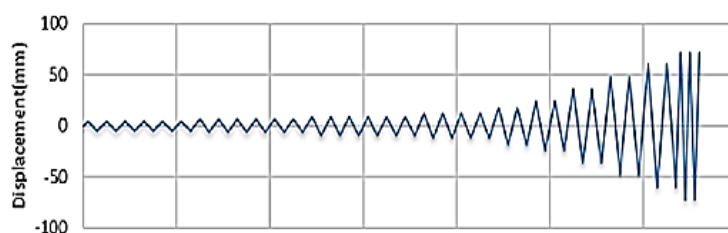
جهت ارزیابی عملکرد مدل فیزیکی میراگر با بهره‌گیری از دستگاه یونیورسال<sup>۴۰</sup> رفتار لرزه‌ای میراگر مورد بررسی قرار گرفته‌است. دستگاه یونیورسال دارای دو گیره (یک فک ثابت و یک فک متحرک) جهت قرارگیری میراگر در دستگاه بوده که توانایی اعمال نیرو یا جابه‌جایی به نمونه را داشته، همچنین مقادیر جابه‌جایی یا نیرو براساس سنسورهای موجود در دستگاه قابل اندازه‌گیری و با استفاده از دستگاه Data Logger قابل ثبت بوده‌است. آزمایشات در آزمایشگاه دانشگاه نوشیروانی بابل انجام شده‌است. دستگاه یونیورسال آزمایشگاه دارای ظرفیت اسمی 100 KN بوده و دهانه دستگاه (فاصله بین دو فک) 120 cm می‌باشد. در شکل (۴) ستاپ آزمایشگاهی میراگر اصطکاکی در دستگاه یونیورسال نمایش داده شده‌است.



شکل ۴: ستاپ آزمایشگاهی میراگر در دستگاه universal

در این پژوهش به جهت اعمال بارگذاری لرزه‌ای از پروتکل بارگذاری ارائه شده ATC-SAC که در حقیقت جایگزین زلزله‌های واقعی بوده، به‌کارگیری شده‌است. این پروتکل مربوط به زلزله‌های دور از گسل بوده که نیرو از طریق جابه‌جایی در انتهای نمونه اعمال می‌شود، همچنین این تاریخچه بارگذاری شامل تغییرشکل‌های سیکی گام به گام افزایش یافته‌است. پروتکل بارگذاری دوره‌ای SAC در شکل (۵) نمایش داده شده‌است.

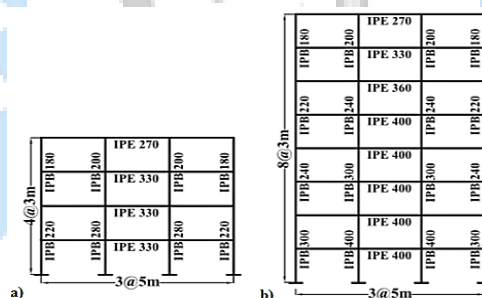
<sup>40</sup> universal machine



شکل ۵: پروتکل بارگذاری لرزه‌ای SAC [۳۹]

### ۳-۲ به کارگیری میراگر برای کنترل جابه‌جایی و دریافت سازه

به جهت ارزیابی عملکرد میراگر در کنترل جابه‌جایی و دریافت سازه، دو ساختمان ۴ و ۸ طبقه در بستر نرم‌افزار اپنسیس<sup>۴۱</sup> مدل‌سازی عددی شده و رفتار سازه در شرایط عدم تجهیز و تجهیز به میراگر تحت بارگذاری‌های لرزه‌ای مختلف مورد مطالعه قرار گرفته‌است. قاب‌های مورد بررسی، مدل قاب میانی دو بعدی از یک سازه سه بعدی با عرض بارگیر ۵ متر می‌باشد. که هر قاب دارای سه دهانه ۵ متری با ارتفاع طبقات ۳ متری بوده که براساس آیین نامه ASCE 7-16 طراحی شده‌است. بارثقلی کف طبقات مشتمل بر بار مرده<sup>۴۲</sup> معادل با  $600 \text{ kg/m}^2$  و بار زنده<sup>۴۳</sup> معادل با  $250 \text{ kg/m}^2$  بوده‌است، همچنین براساس طراحی انجام شده بار بام سازه معادل با  $550 \text{ kg/m}^2$  و بارهای مرده و  $150 \text{ kg/m}^2$  بارهای زنده بوده‌است. اعضای سازه‌ای ساختمان‌ها (ستون و تیر) از جنس فولاد با تنش تسلیم<sup>۴۴</sup> معادل با  $2400 \text{ kg/cm}^2$  برای تمام اعضا در نظر گرفته شده‌است. ستون‌های سازه فولاد با مقطع IPB و تیرهای سازه فولاد با مقطع IPE بوده‌است. در شکل (۶) شماتیکی از دو سازه ۴ و ۸ طبقه به همراه ابعاد و مقاطع اعضای سازه‌ای نمایش داده شده‌است. طراحی مقاطع و المان‌های سازه سازه براساس در نظر گرفتن نیروی کل برش پایه<sup>۴۵</sup> انجام شده‌است.



شکل ۶: شماتیک ابعاد و مقاطع سازه‌های ۴ و ۸ طبقه

### ۳-۱-۲ مدل‌سازی عددی سازه

مدل ساختمان‌های ۴ و ۸ طبقه به صورت قاب دوبعدی براساس مشخصات و خصوصیات سازه‌ها (شکل ۶) در بستر نرم‌افزار اپنسیس ایجاد شده‌است. براین اساس ابتدا با تعریف موقعیت نقاط گره‌ای، تعیین المان‌های تیر و ستون، معرفی مصالح، تعیین مقاطع تیر و ستون و مقیدسازی گره‌های تکیه‌گاهی فرایند مدل‌سازی انجام شده‌است. پس از ایجاد مدل هندسی و خصوصیات مصالح و مقاطع، بارهای ثقلی برپایه طراحی انجام شده تعریف شده‌است. در این پژوهش به جهت ارزیابی عملکرد میراگر، سازه‌های ۴ و ۸ طبقه تحت ۳ وضعیت دهانه میانی بدون مهاربند و سیستم کنترلی، دهانه میانی مجهز به سیستم مهاربند و دهانه میانه مجهز به میراگر تحت شرایط اعمال بارگذاری‌های لرزه‌ای مختلف مدل‌سازی شده‌اند. در مدل عددی رفتار مصالح از نوع غیرخطی (در اپنسیس مصالح Steel 01) تعریف

<sup>41</sup> OPENSEES

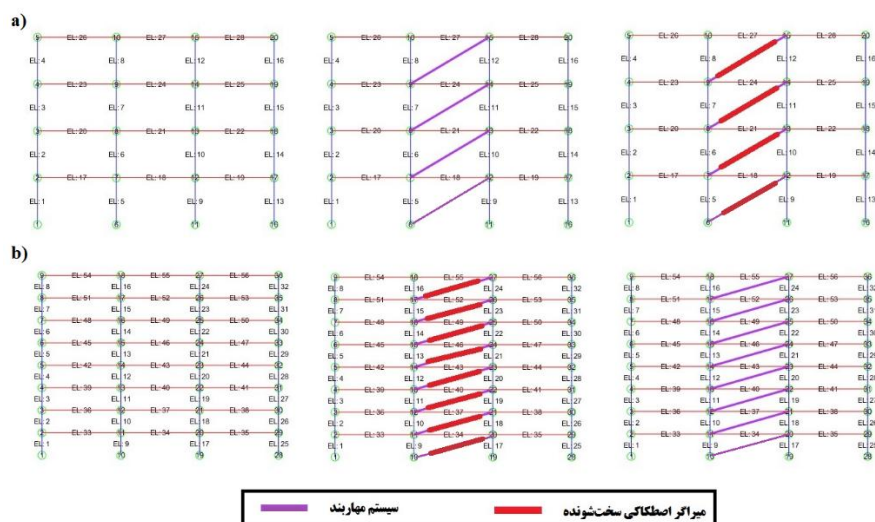
<sup>42</sup> dead loads

<sup>43</sup> live loads

<sup>44</sup> yield stress

<sup>45</sup> full base shear force

شده است. سیستم مهاربند در مدل‌های دهانه میانی مجهز به سیستم مهاربند با تعریف المان مهاربند با جنس فولاد و از نوع المان خرپا بین دو گره قطری در قاب‌های دهانه میانی تعریف شده است. همچنین مقاطع مهاربند برای سازه‌های مجهز به سیستم مهاربندی براساس در نظر گرفتن شرایط طراحی معادل با  $1/5$  برابر برش پایه تعریف شده است. در شکل (۷) شماتیک مدل عددی سازه‌های ۴ و ۸ طبقه تحت هریک از سه شرایط مدلسازی نمایش داده شده است.



شکل ۷: مدل‌های عددی سازه تحت شرایط مختلف مدلسازی در بستر اپنسیس- (a) سازه ۴ طبقه، (b) سازه ۸ طبقه

به جهت مدلسازی عددی میراگر در بستر نرم‌افزار اپنسیس، پس از ارزیابی عملکرد میراگر پیشنهادی و استخراج منحنی هیستریزس میراگر، با بهره‌گیری از مصالح ElasticPPGap<sup>46</sup> که در کتابخانه اپنسیس موجود بوده و استفاده از تکنیک مصالح موازی، مصالحی نوین که بیانگر رفتار هیستریزیسی منطبق بر رفتار میراگر اصطکاکی پیشنهادی بوده ایجاد و در مدل عددی به کارگیری شده است.

#### ۴-۲ مشخصات بارگذاری لرزه‌ای

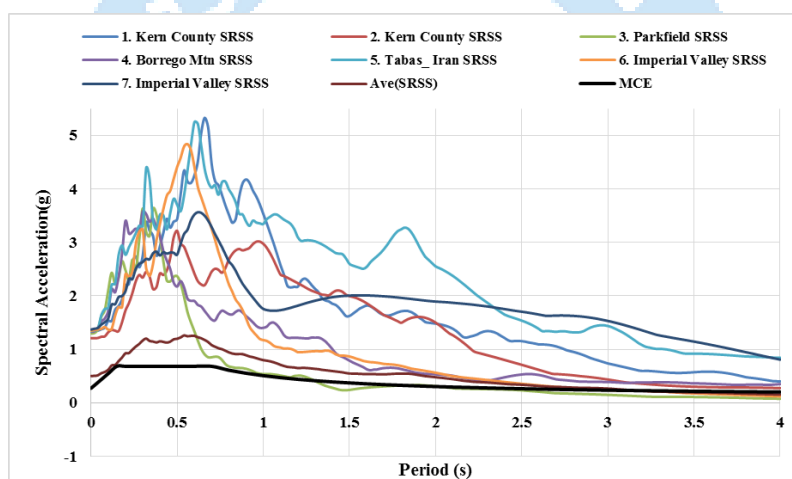
در این پژوهش به هدف ارزیابی عملکرد میراگر مدل‌های عددی ساختمان‌های ۴ و ۸ طبقه ایجاد شده در اپنسیس، تحت بارگذاری ۷ زمین‌لرزه بزرگ قرار گرفته و نتایج استخراج شده است. مشخصات زمین‌لرزه به همراه جزئیات هریک از آنها در جدول (۱) ارائه شده است.

جدول ۱: مشخصات زمین‌لرزه‌های به کارگیری شده جهت ارزیابی عملکرد لرزه‌ای مدل‌های عددی [۴۲]

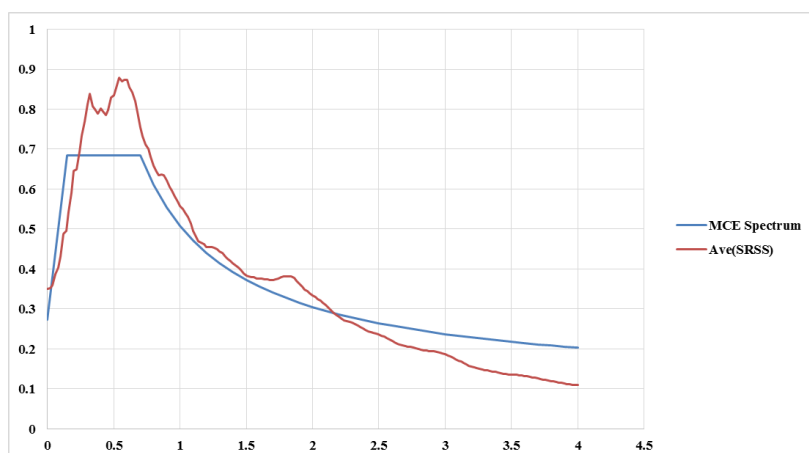
Code	Event	Year	Station	Magnitude (MW)	Rrup (km)	PGA (g)	Vs (m/s)
S1	Kern County_(St I)	1952	Pasadena - CIT Athenaeum	7.4	126	0.06	415
S2	Parkfield	1966	Cholame - Shandon Array	6.2	9	0.44	299
S3	Borrego Mountain	1968	Cholame - Shandon Array#	6.6	129	0.05	443
S4	Tabas, Iran	1978	Kashmar	7.3	194	0.04	280
S5	Imperial Valley (El Centro)	1979	El Centro - Meloland Geot. Array	6.5	10	0.38	265
S6	Kern County_(St II)	1952	Santa Barbara Courthouse	7.4	82	0.14	515
S7	Imperial Valley_(St I)	1979	Coachella Canal #4	6.5	50	0.16	336

<sup>46</sup> Elastic-Perfectly Plastic Gap Material

داده‌های شتاب نگاشت زمین لرزه‌های مذکور از سایت PEER که مرجع اصلی تامین داده‌های لرزه‌ای بوده اخذ گردیده‌است. داده‌های اخذ شده اطلاعات شتاب نگاشت خام هریک از زمین لرزه‌ها بوده که برای به‌کارگیری و پیاده‌سازی در مدل‌های عددی نیازمند پردازش و تحلیل (همپایه‌سازی/هم مقیاس‌سازی) براساس شرایط خاک منطقه بوده‌است. براین اساس با بهره‌گیری از نرم‌افزار سائزموسیگنال، فرایند تحلیل زوج شتاب نگاشت‌ها انجام شده‌است. در گام نخست شتاب نگاشت هر زمین لرزه در دو مولفه افقی وارد نرم‌افزار سائزموسیگنال شده و محتوای طیفی آن با در نظر گرفتن میرایی ۵٪ استخراج شده‌است. در گام دوم مقادیر دو مولفه استخراج شده برای هر زمین لرزه بر اساس مقدار بیشینه شتاب همان زمین لرزه هم مقیاس شده‌اند. در گام سوم با استفاده از روش SRSS دو مولفه مقیاس شده با هم ترکیب شده‌اند. در گام چهارم بر اساس طیف آیین نامه (برای شرایط MCE) و بر اساس مشخصات منطقه ترسیم شده‌است. در گام پنجم طیف‌های ترکیب شده به روش SRSS برای هر زمین لرزه با طیف آیین نامه تواما ترسیم گردیده‌است. در گام آخر ضریبی برای نزدیک کردن طیف‌های ترکیب شده هر زلزله با طیف آیین‌نامه استخراج شده‌است، در این مرحله کمتر نبودن طیف SRSS هر زلزله از طیف آیین نامه در بازه  $0.2T - 1.5T$  به عنوان شرط اصلی مدنظر قرار گرفته‌است. در نهایت بر اساس آنالیز انجام شده ضریب مقیاس برای هر شتاب نگاشت استخراج و به مقادیر خام اولیه اعمال شده‌است. در ادامه نتایج حاصل از تجزیه تحلیل و پردازش داده‌های خام زمین لرزه‌های اخذ شده، در اشکال (۸ و ۹) برای قاب ۴ طبقه ارائه شده‌است. ضریب مقیاس نهایی بدست آمده برای سازه ۴ و ۸ طبقه به ترتیب ۰/۳۸ و ۰/۴۸۵. برای هریک از شتاب نگاشت‌ها بوده‌است که بر اساس ضریب هم مقیاسی دو زوج شتاب نگاشت در داده‌های اولیه اعمال گردیده‌است. با پیاده‌سازی تجزیه و تحلیل طیفی بر داده‌های خام لرزه‌ای اخذ شده، شتاب نگاشت نهایی هریک از زمین‌لرزه‌ها استخراج و جهت اعمال در مدل‌های عددی آماده‌سازی شده‌است.



شکل ۸: طیف لرزه‌ای زمین لرزه‌ها با ماکزیمم شتاب  $g$  برای قاب ۴ طبقه به همراه طیف آیین نامه

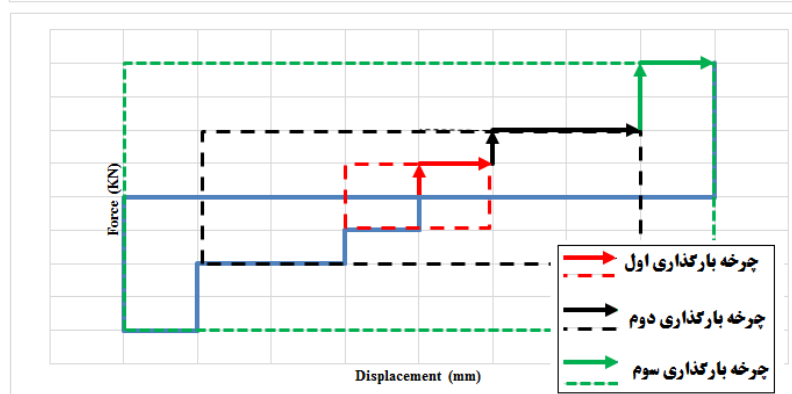
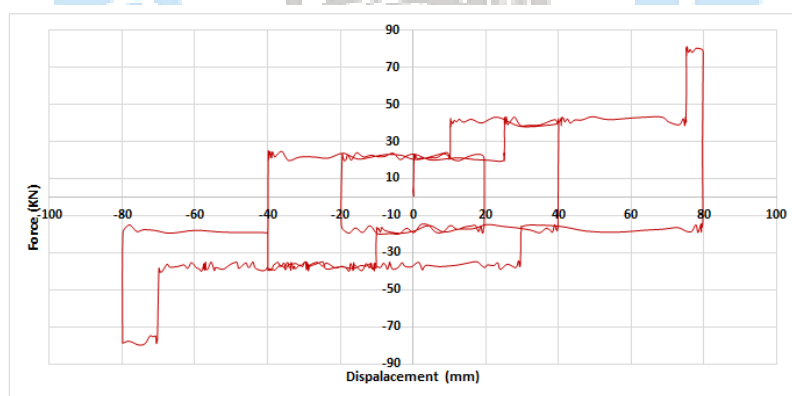


شکل ۹: همپایه سازی طیفی، طیف میانگین SRSS و طیف آیین نامه برای قاب ۴ طبقه

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱ نتایج مدل سازی آزمایشگاهی میراگر پیشنهادی

پس از ایجاد مدل فیزیکی میراگر، نمونه در دستگاه یونیورسال قرار گرفته و براساس پروتکل بارگذاری (شکل ۵) رفتار لرزه ای آن استخراج شده است. بارگذاری از نوع جابه جایی-کنترل بر میراگر اعمال شده و میزان نیرو بر حسب جابه جایی با بهره گیری از سنسورهای دستگاه ثبت و استخراج شده است. در نهایت منحنی هیستریزیس میراگر براساس میزان جابه جایی-نیرو در مدل سازی آزمایشگاهی ترسیم شده است. در شکل (۱۰) منحنی رفتار هیستریزیس میراگر براساس تست آزمایشگاهی نمایش داده شده است.

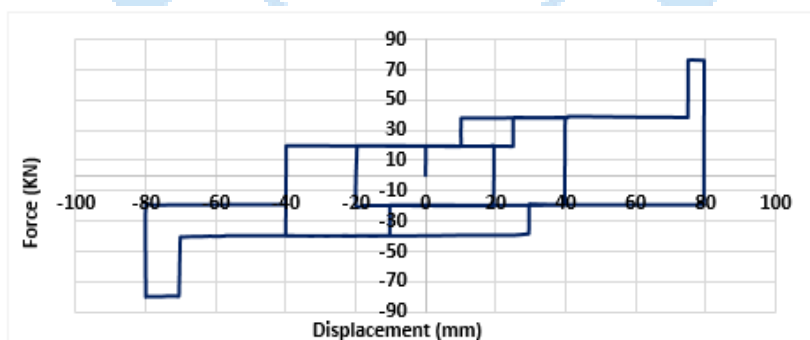


شکل ۱۰: منحنی هیستریزیس میراگر اصطکاکی پیشنهادی براساس مدل آزمایشگاهی

با توجه به نتایج تست آزمایشگاهی مشخص می‌گردد که میراگر تحت بارگذاری چرخه‌ای اعمال شده دارای رفتار کنترلی متغیر تحت سیکل‌های بارگذاری-باربرداری (اعمال جابه‌جایی رفت و برگشت) مختلف بوده‌است. براساس نتایج حاصل از تست آزمایشگاهی (شکل ۱۰) مشخص می‌گردد که نیروی لغزش اولیه ( $F_s$ ) حدوداً معادل با  $20/82$  کیلونیوتن بوده که با توجه به نیروی پیش‌تنیدگی پیچ‌های بخش اول (۲۴ کیلونیوتن)، ضریب لغزش ( $\mu = 0.6$ )، ضریب تصحیح ( $K_s=0.7$ ) و تعداد صفحات تماس ( $n=3$ ) موید رابطه (۱) با ضریب اطمینانی معادل با ( $\gamma = 1.45$ ) بوده‌است. با توجه به منحنی هیستریزیس میراگر (شکل ۱۰) پس از شروع بارگذاری میراگر تا نیروی لغزش اولیه ( $F_s$ ) ثابت و بدون حرکت بوده‌است، با افزایش نیرو و رسیدن به مقدار  $F_s$  میراگر شروع به حرکت کرده و بخش اول مدل با نیروی پیش‌تنیدگی کوچکتر جابه‌جا شده‌است، این روند جابه‌جایی با افزایش نیرو تا نیروی سطح لغزش دوم ثابت بوده و با رسیدن میزان نیرو به مقدار نیروی سطح لغزش دوم جابه‌جایی مرحله بعد را تجربه کرده‌است. نتایج حاصل از مطالعات آزمایشگاهی نشان می‌دهد که میراگر اصطکاکی پیشنهادی دارای رفتار عملکردی متغیر با شدت بارگذاری بوده‌است، همچنین روند تغییرات در شرایط بارگذاری-باربرداری (جابه‌جایی رفت و برگشت) تقریباً دارای تقارن بوده‌است، به بیان دیگر رفتار کنترلی میراگر تحت چرخ‌های بارگذاری-باربرداری تقریباً یکسان بوده‌است.

## ۲-۳ نتایج مدلسازی عددی میراگر پیشنهادی

جهت ارزیابی دقیق رفتار میراگر تحت شرایط بارگذاری لرزه‌ای، مدلسازی عددی نمونه آزمایشگاهی با توجه به شرایط و جزئیات مدل در بستر نرم‌افزار اپنسیس انجام شده‌است. مدلسازی عددی میراگر براساس منحنی هیستریزیس میراگر، با بهره‌گیری از مصالح ElasticPPGap و استفاده از تکنیک مصالح موازی انجام شده‌است. به جهت ارزیابی و صحت‌سنجی مدل عددی میراگر اصطکاکی براساس مصالح جدید، مدل ساده یک درجه آزادی جرم- فنر تحت بارگذاری چرخه‌ای ایجاد و نتایج استخراج شده‌است. در این مدل مشخصات مصالح جدید به فنر اعمال تعریف شده‌است و هدف ارزیابی رفتار هیستریزیس مدل تحت بارگذاری چرخه‌ای بوده‌است. در شکل (۱۱) منحنی هیستریزیس مدل جرم- فنر تحت بارگذاری لرزه‌ای و رفتار هیستریزیس میراگر براساس مدل عددی ارائه شده‌است. براساس نتایج حاصل مشخص می‌گردد که مصالح نوین تعریف شده در نرم‌افزار اپنسیس دارای رفتار هیستریزیسی مطابق با رفتار میراگر پیشنهادی بوده‌است.



شکل ۱۱: همپایه سازی طیفی، طیف میانگین SRSS و طیف آیین نامه

با توجه به منحنی هیستریزیس میراگر در نمونه عددی (شکل ۱۱) مشخص می‌گردد که رفتار لرزه‌ای میراگر در مدل عددی تطابق خوبی با نتایج حاصل از مدل آزمایشگاهی داشته‌است. به جهت ارزیابی دقت مدل عددی نتایج حاصل با نتایج مدل آزمایشگاهی مورد

مقایسه و براساس آزمون‌های آماری میانگین مربعات خطا<sup>۴۷</sup>، ریشه دوم میانگین مربعات خطا<sup>۴۸</sup> و همچنین درصد خطا مورد ارزیابی قرار گرفته‌است. در جدول (۲) اعتبارسنجی عملکرد مدل عددی نسبت به مدل آزمایشگاهی ارائه شده‌است.

جدول ۲: اعتبارسنجی مدل عددی نسبت به مدل آزمایشگاهی

EXP v.s. NUM	MSE	RMSE	Err %
	6.68	2.58	9.82 %

با توجه به نتایج حاصل از اعتبارسنجی عملکرد مدل عددی مشخص می‌گردد که مدل عددی دارای خطای کمتر از ۱۰٪ (۹/۸۲٪) در شبیه‌سازی رفتار لرزه‌ای میراگر اصطکاکی پیشنهادی بوده‌است. با توجه به نتایج تست آزمایشگاهی (منحنی هیستریزیس شکل ۱۰) مشخص می‌گردد که در ثبت داده‌های اندازه‌گیری شده مقادیر نوپز و انحراف به سبب سنسورهای به کارگرفته شده در آزمایشگاه رخ داده که به عنوان خطای قابل قبول در فرایند مدلسازی فیزیکی مطرح بوده‌است. میزان خطای کمتر از ۱۰٪ بین مدل عددی و مدل آزمایشگاهی بیانگر عملکرد قابل قبول مدل عددی در شبیه‌سازی رفتار لرزه‌ای میراگر اصطکاکی پیشنهادی بوده‌است. علاوه بر این میزان آزمون آماری MSE معادل با ۶/۶۸ بوده‌است.

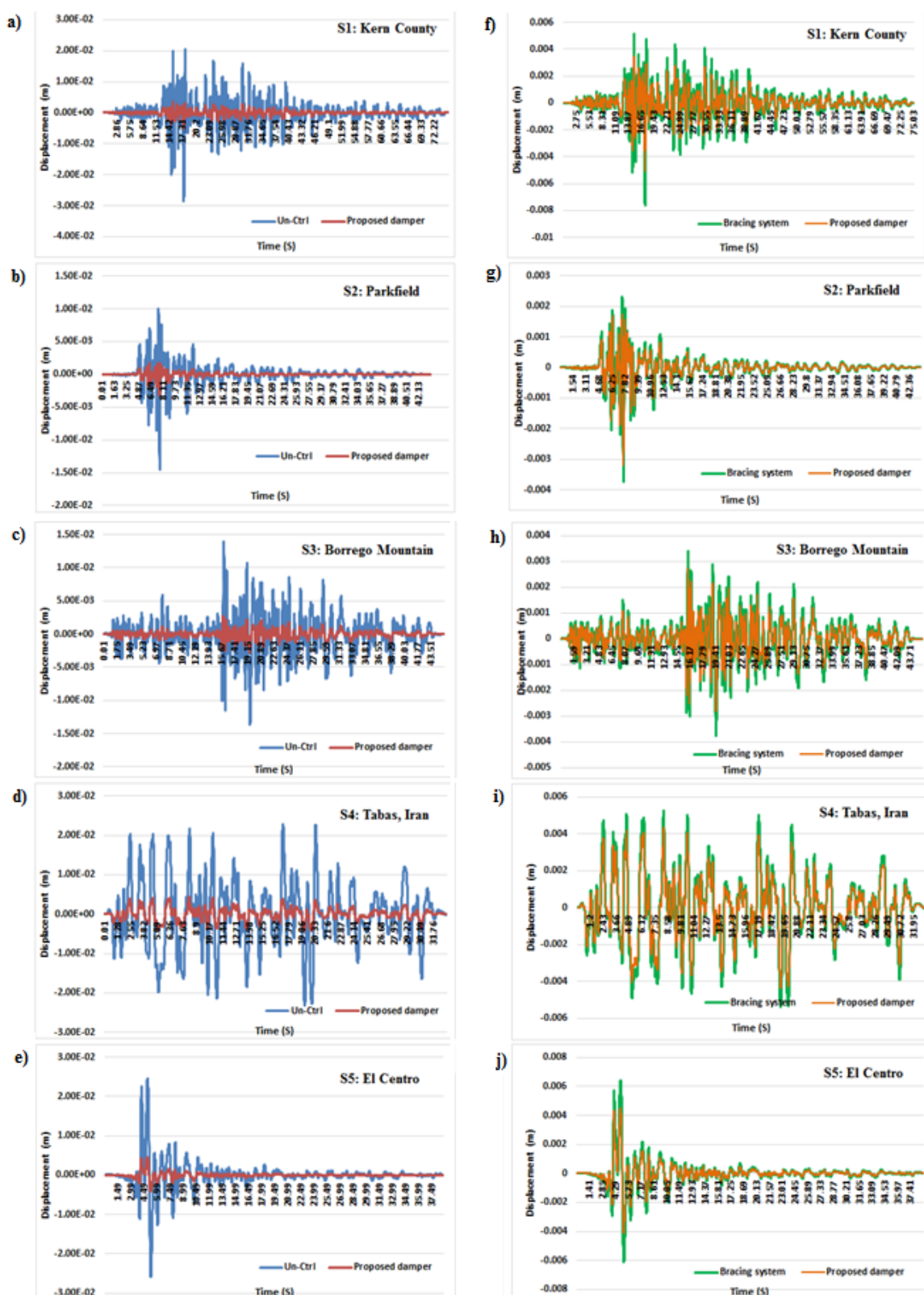
### ۳-۳ ارزیابی عملکرد میراگر پیشنهادی در کنترل جابه‌جایی و دریفت سازه

پس از صحت‌سنجی عملکرد مدل عددی میراگر پیشنهادی در بستر نرم‌افزار اپنسیس، مدل سازه‌های ۴ و ۸ طبقه براساس خصوصیات و جزئیات ارائه شده در بخش ۲-۲ ایجاد و تحت بارگذاری لرزه‌ای ۷ زمین لرزه بزرگ قرار گرفته‌است. به جهت ارزیابی رفتار کنترلی میراگر پارامتر میزان جابه‌جایی طبقه فوقانی و دریفت نسبی سازه تحت هر یک از ۷ بارگذاری مورد ارزیابی قرار گرفته‌است.

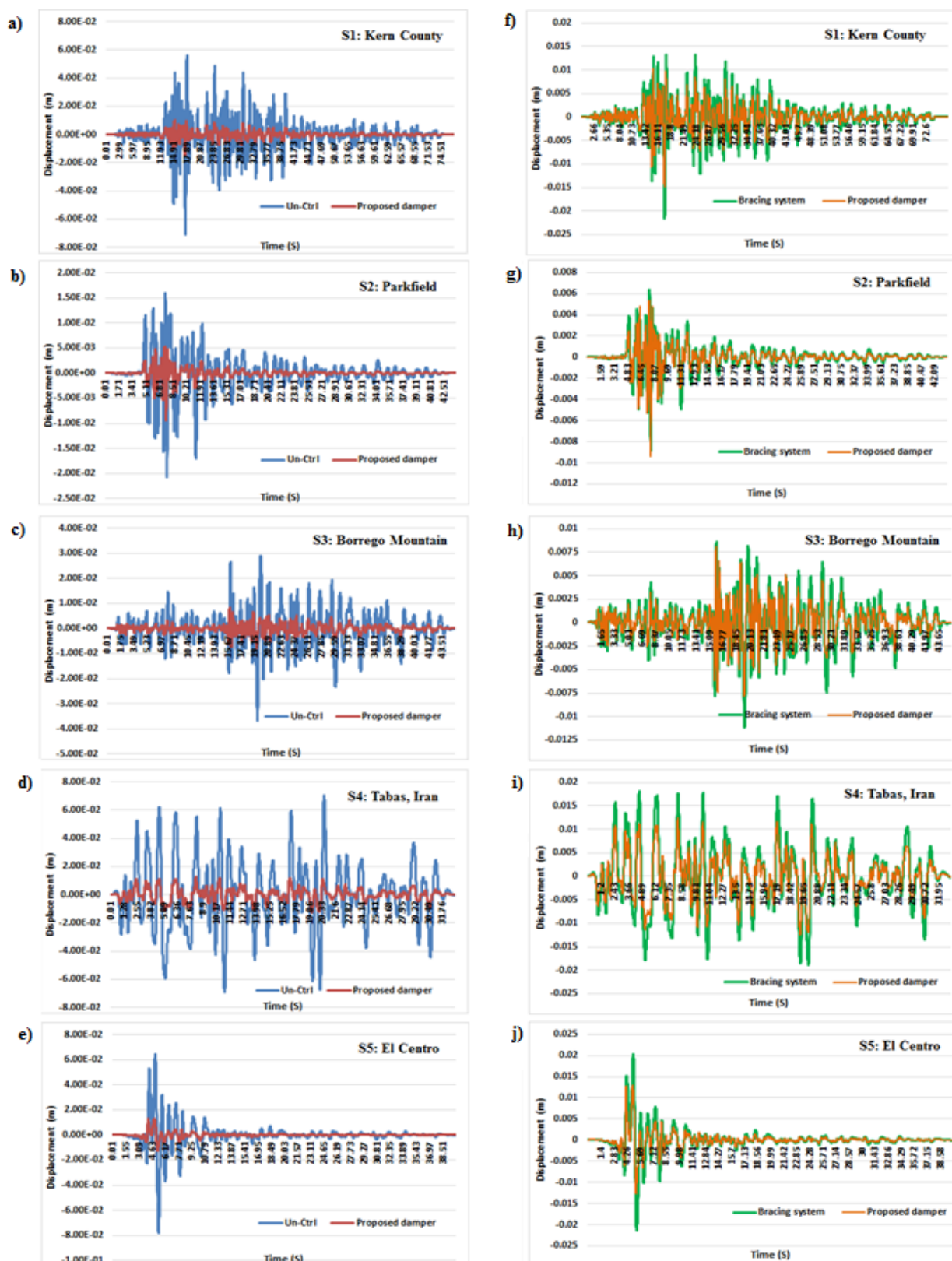


<sup>47</sup> MSE

<sup>48</sup> RMSE



شکل ۱۲: جابه جایی طبقه فوقانی ساختمانی ۴ طبقه تحت بارگذاری لرزه‌ای S1 تا S5



شکل ۱۳: جابه‌جایی طبقه فوقانی ساختمانی ۴ طبقه تحت بارگذاری لرزه‌ای S1 تا S5

## ۳-۳-۱ ارزیابی عملکرد میراگر در کنترل جابه‌جایی سازه

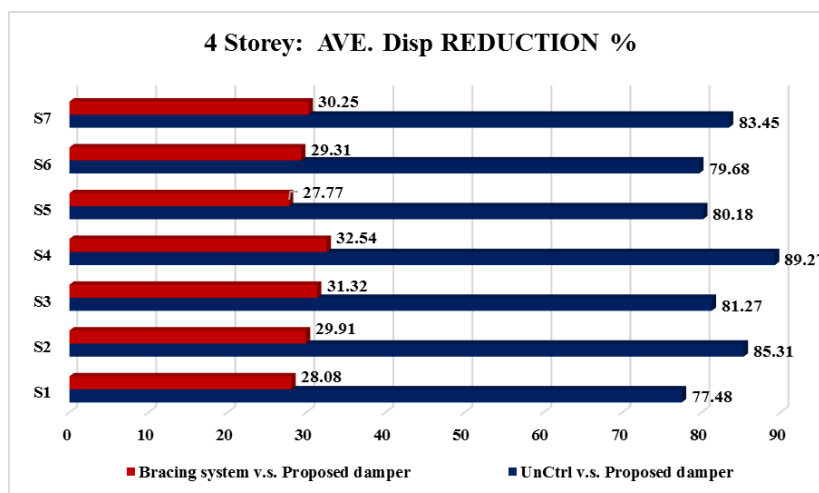
در اشکال (۱۲) و (۱۳) به ترتیب نتایج حاصل از مدل‌سازی ساختمان ۴ طبقه و ساختمان ۸ طبقه تحت بارگذاری‌های زمین‌لرزه ارائه شده‌است. نتایج حاصل از ارزیابی رفتار لرزه‌ای سازه تحت سه وضعیت: ۱- دهانه میانی بدون مهاربند و سیستم کنترلی، ۲- دهانه میانی مجهز به سیستم مهاربند، ۳- دهانه میانه مجهز به میراگر اصطکاکی و سیستم مهاربندی با گراف آبی رنگ و میزان جابه‌جایی طبقه فوقانی ساختمان ۴ طبقه در شرایط عدم تجهیز به میراگر اصطکاکی و سیستم مهاربندی با گراف آبی رنگ و میزان جابه‌جایی سازه در شرایط تجهیز به میراگر با گراف قرمز رنگ تحت هریک از بارگذاری‌های لرزه‌ای S1 تا S5 نمایش داده شده‌است. در شکل (۱۲-f تا ۱۲-j) گراف سبز رنگ بیانگر جابه‌جایی ساختمان ۴ طبقه با سیستم مهاربندی و گراف نارنجی رنگ میزان جابه‌جایی سازه تحت شرایط تجهیز به میراگر اصطکاکی پیشنهادی بوده‌است. براساس نتایج حاصل مشخص می‌گردد که با تجهیز سازه به میراگر پیشنهادی میزان جابه‌جایی سازه تحت هریک از ۷ بارگذاری لرزه‌ای نسبت به شرایط عدم تجهیز سازه و تجهیز سازه به سیستم مهاربندی کاهش چشم‌گیری یافته‌است.

به جهت ارزیابی کمی تاثیر میراگر اصطکاکی پیشنهادی در کنترل ارتعاشات مقادیر بیشینه، کمینه و میانگین جابه‌جایی سازه تحت هریک از سه وضعیت سازه و براساس هریک از بارگذاری‌های لرزه‌ای در جدول (۳) ارائه شده‌است. با توجه به نتایج حاصل مشخص می‌گردد که با تجهیز سازه ۴ طبقه به میراگر اصطکاکی پیشنهادی میزان میانگین جابه‌جایی سازه نسبت به شرایط عدم تجهیز سازه به میراگر تحت بارگذاری‌های لرزه‌ای S1 تا S7 به ترتیب  $0.77/48\%$ ،  $0.85/31\%$ ،  $0.81/27\%$ ،  $0.89/27\%$ ،  $0.80/18\%$ ،  $0.79/68\%$  و  $0.83/45\%$  کاهش یافته‌است. همچنین با ارزیابی نتایج مشخص می‌گردد که به‌کارگیری میراگر پیشنهادی در سازه موجب کاهش میزان جابه‌جایی سازه نسبت به شرایط تجهیز سازه به سیستم مهاربندی شده است به گونه‌ای که میزان جابه‌جایی تحت هریک از بارگذاری‌های لرزه‌ای S1 تا S5 به ترتیب  $0.28/08\%$ ،  $0.29/91\%$ ،  $0.31/32\%$ ،  $0.32/54\%$ ،  $0.27/77\%$ ،  $0.29/31\%$  و  $0.30/25\%$  کاهش یافته‌است. در نمودارهای میله‌ای شکل (۱۴) مقایسه‌ای بین میزان کاهش جابه‌جایی ساختمان ۴ طبقه تحت شرایط مختلف ارائه شده‌است.

جدول ۳: ارزیابی عملکرد میراگر در کنترل ارتعاشات ساختمان ۴ طبقه

Seismic Loading	Structural Condition 4-Storey	Displacement (m)		
		MAX	MIN	AVE.
S1: Kern County	UN-CTRL	2.04E-02	-2.84E-02	-5.57E-07
	Bracing system	5.16E-03	-7.62E-03	-1.74E-07
	Proposed damper	3.47E-03	-5.05E-03	-1.25E-07
	UnCtrl v.s. Proposed damper			77.48
	Bracing system v.s. Proposed damper			28.08
S2: Parkfield	UN-CTRL	9.98E-03	-1.45E-02	2.16E-08
	Bracing system	2.31E-03	-3.75E-03	4.54E-09
	Proposed damper	1.75E-03	-3.19E-03	3.18E-09
	UnCtrl v.s. Proposed damper			85.31
	Bracing system v.s. Proposed damper			29.91
S3: Borrego Mountain	UN-CTRL	1.39E-02	-1.37E-02	7.13E-08
	Bracing system	3.39E-03	-3.78E-03	1.90E-08
	Proposed damper	2.75E-03	-2.83E-03	1.30E-08
	UnCtrl v.s. Proposed damper			81.27
	Bracing system v.s. Proposed damper			31.32
S4: Tabas, Iran	UN-CTRL	2.28E-02	-2.33E-02	7.44E-07
	Bracing system	5.27E-03	-5.37E-03	1.18E-07
	Proposed damper	4.37E-03	-4.32E-03	7.98E-08
	UnCtrl v.s. Proposed damper			89.27
	Bracing system v.s. Proposed damper			32.54
S5: Imperial Valley (El Centro)	UN-CTRL	2.47E-02	-2.58E-02	1.26E-06
	Bracing system	6.40E-03	-6.09E-03	3.47E-07
	Proposed damper	4.55E-03	-4.09E-03	2.50E-07
	UnCtrl v.s. Proposed damper			80.18
	Bracing system v.s. Proposed damper			27.77
S6: Kern County (St II)	UN-CTRL	2.34E-02	-3.84E-02	-6.57E-07
	Bracing system	5.16E-03	-6.62E-03	-1.44E-07
	Proposed damper	4.47E-03	-3.05E-03	-1.21E-07
	UnCtrl v.s. Proposed damper			79.68
	AVE. Disp			79.68

S7: Imperial Valley (St f)	REDUCTION%	Bracing system v.s. Proposed damper		29.31
	UN-CTRL	3.04E-02	-3.26E-02	-6.54E-07
	Bracing system	8.16E-03	-7.62E-03	-1.89E-07
	Proposed damper	4.42E-03	-5.05E-03	-1.32E-07
	AVE. Disp REDUCTION%	UnCtrl v.s. Proposed damper		83.45
		Bracing system v.s. Proposed damper	30.25	



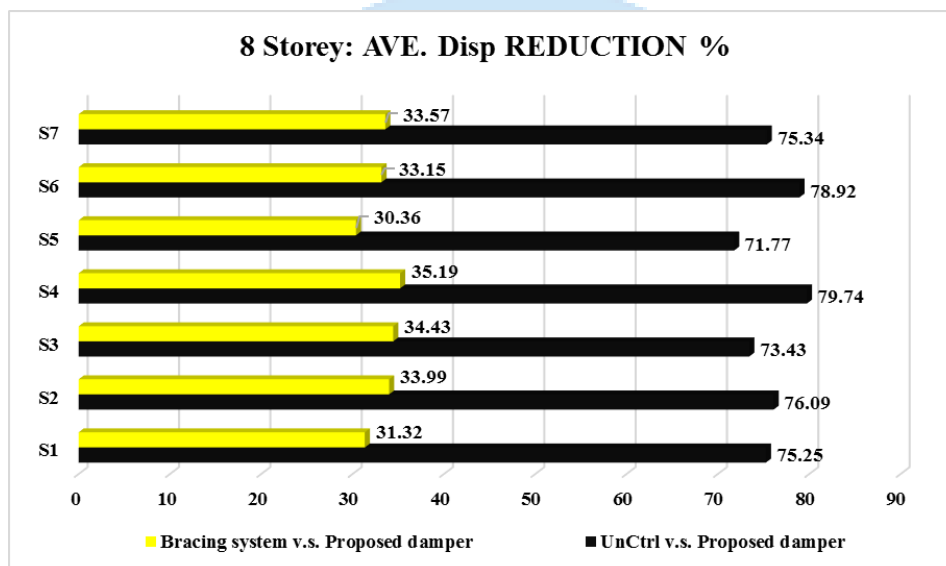
شکل ۱۴: مقایسه عملکرد میراگر در کنترل ارتعاشات ساختمان ۴ طبقه

در شکل (۱۳-a تا ۱۳-e) میزان جابه‌جایی طبقه فوقانی ساختمان ۸ طبقه در شرایط عدم تجهیز به میراگر و سیستم مهاربندی با گراف آبی رنگ و میزان جابه‌جایی سازه در شرایط تجهیز به میراگر با گراف قرمز رنگ تحت هریک از بارگذاری‌های لرزه‌ای S1 تا S5 نمایش داده شده‌است. همچنین در شکل (۱۳-f تا ۱۳-j) گراف سبز رنگ بیانگر جابه‌جایی ساختمان ۸ طبقه با سیستم مهاربندی و گراف نارنجی رنگ میزان جابه‌جایی سازه تحت شرایط تجهیز به میراگر اصطکاکی پیشنهادی بوده‌است. به جهت ارزیابی کمی تاثیر میراگر اصطکاکی پیشنهادی در کنترل ارتعاشات ساختمان ۸ طبقه مقادیر بیشینه، کمینه و میانگین جابه‌جایی سازه تحت هریک از سه وضعیت سازه و براساس هریک از بارگذاری‌های لرزه‌ای در جدول (۴) ارائه شده‌است.

جدول ۴: ارزیابی عملکرد میراگر در کنترل ارتعاشات ساختمان ۸ طبقه

Seismic Loading	Structural Condition 8-Storey	Displacement (m)		
		MAX	MIN	AVE.
S1: Kern County	UN-CTRL	5.61E-02	-7.09E-02	-1.08E-06
	Bracing system	1.33E-02	-2.16E-02	-3.90E-07
	Proposed damper	1.03E-02	-1.48E-02	-2.68E-07
	AVE. Disp REDUCTION%	UnCtrl v.s. Proposed damper		75.25
S2: Parkfield	UN-CTRL	1.60E-02	-2.08E-02	8.86E-08
	Bracing system	6.34E-03	-8.88E-03	3.21E-08
	Proposed damper	5.37E-03	-9.40E-03	2.12E-08
	AVE. Disp REDUCTION%	UnCtrl v.s. Proposed damper		76.09
S3: Borrego Mountain	UN-CTRL	2.88E-02	-3.68E-02	2.64E-07
	Bracing system	8.16E-03	-7.89E-03	7.02E-08
	Proposed damper	8.62E-03	-1.12E-02	1.07E-07
	AVE. Disp REDUCTION%	UnCtrl v.s. Proposed damper		73.43
S4: Tabas, Iran	UN-CTRL	7.04E-02	-6.90E-02	2.55E-06
	Bracing system	1.81E-02	-1.89E-02	7.98E-07
	Proposed damper	1.25E-02	-1.24E-02	5.17E-07
	AVE. Disp REDUCTION%	Bracing system v.s. Proposed damper		34.43

S5: Imperial Valley (El Centro)	AVE. Disp REDUCTION%	UnCtrl v.s. Proposed damper		79.74
		Bracing system v.s. Proposed damper		35.19
	UN-CTRL	6.44E-02	-7.81E-02	4.66E-07
	Bracing system	2.03E-02	-2.14E-02	1.89E-07
	Proposed damper	1.31E-02	-1.27E-02	1.31E-07
	AVE. Disp REDUCTION%	UnCtrl v.s. Proposed damper		71.77
	Bracing system v.s. Proposed damper		30.36	
S6: Kern County (S t II)	UN-CTRL	7.62E-02	-6.90E-02	3.65E-06
	Bracing system	2.81E-02	-2.89E-02	4.98E-07
	Proposed damper	2.45E-02	-2.54E-02	2.17E-07
	AVE. Disp REDUCTION%	UnCtrl v.s. Proposed damper		78.92
		Bracing system v.s. Proposed damper		33.15
	S7: Imperial Valley (St I)	UN-CTRL	5.43E-02	-7.22E-02
Bracing system	2.35E-02	-3.54E-02	2.89E-06	
Proposed damper	1.41E-02	-2.27E-02	2.31E-06	
AVE. Disp REDUCTION%	UnCtrl v.s. Proposed damper		75.34	
	Bracing system v.s. Proposed damper		33.57	



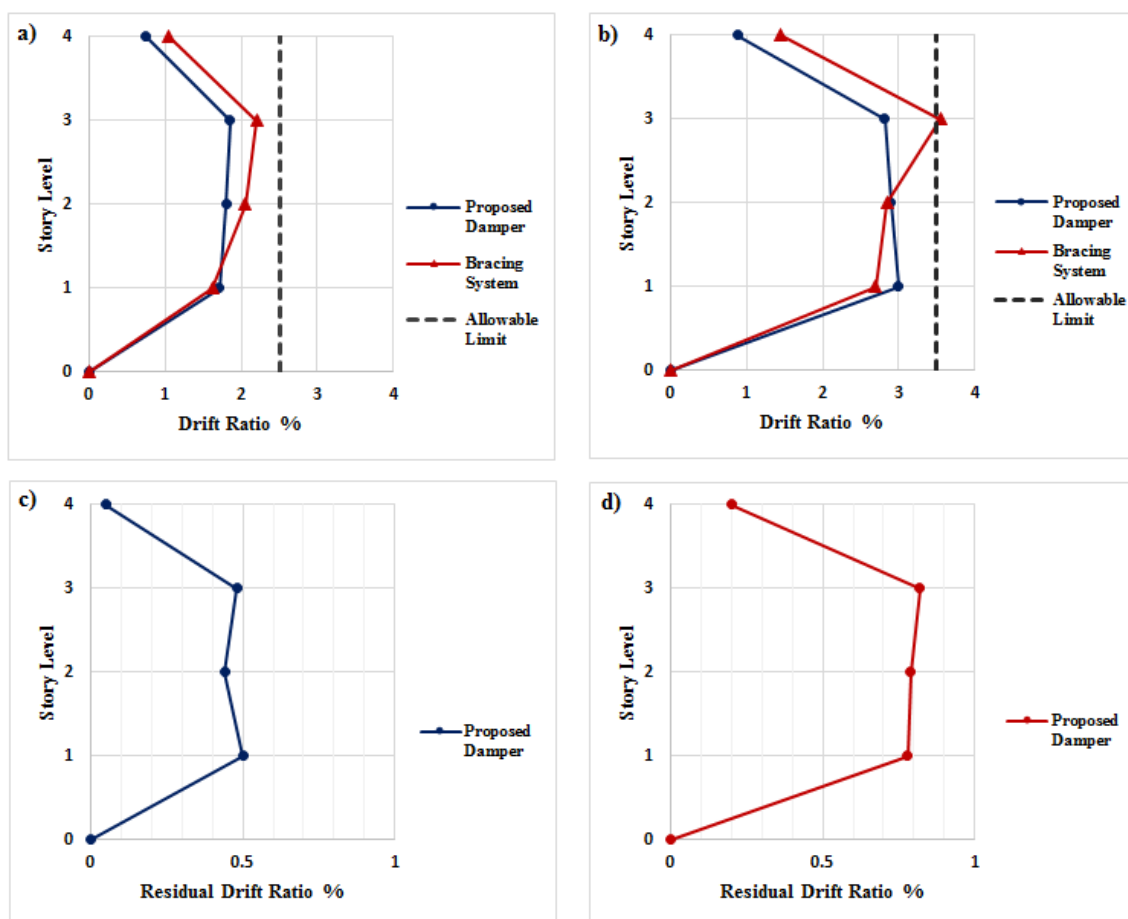
شکل ۱۵: مقایسه عملکرد میراگر پیشنهادی در کنترل ارتعاشات ساختمان ۸ طبقه

با توجه به نتایج حاصل (جدول ۴) مشخص می‌گردد که با تجهیز سازه ۸ طبقه به میراگر اصطکاکی پیشنهادی میزان میانگین جابه‌جایی سازه نسبت به شرایط عدم تجهیز سازه به میراگر تحت بارگذاری‌های لرزه‌ای S1 تا S7 به ترتیب ۷۱/۷۷٪، ۷۹/۷۴٪، ۷۳/۴۳٪، ۷۶/۰۹٪، ۷۵/۲۵٪، ۷۸/۹۲٪ و ۷۵/۳۴٪ کاهش یافته‌است. همچنین با ارزیابی نتایج مشخص می‌گردد که به‌کارگیری میراگر اصطکاکی پیشنهادی در سازه موجب کاهش میزان جابه‌جایی سازه نسبت به شرایط تجهیز سازه به سیستم مهاربندی شده است به گونه‌ای که میزان جابه‌جایی تحت هریک از بارگذاری‌های لرزه‌ای S1 تا S7 به ترتیب ۳۰/۳۶٪، ۳۵/۱۹٪، ۳۴/۴۳٪، ۳۳/۹۹٪، ۳۱/۳٪، ۳۳/۱۵٪ و ۳۳/۵۷٪ کاهش یافته‌است. در نمودارهای میله‌ای شکل (۱۵) مقایسه‌ای بین میزان کاهش جابه‌جایی ساختمان ۸ طبقه تحت شرایط مختلف سازه ارائه شده‌است.

## ۲-۳-۳ ارزیابی عملکرد میراگر در کنترل دررفت سازه

به جهت ارزیابی عملکرد میراگر پیشنهادی، در این بخش دررفت نسبی طبقات دو سازه ۴ و ۸ طبقه تحت دو شرایط سازه مجهز به سیستم مهاربندی و سازه مجهز به میراگر پیشنهادی مورد بررسی قرار گرفته‌است. براین اساس بیشینه مقدار دررفت نسبی طبقات سازه

تحت اعمال بارگذاری لرزه‌ای براساس شرایط زمین لرزه پایه طراحی (DBE<sup>49</sup>) و زمین لرزه محتمل بیشینه (MCE<sup>50</sup>) مورد ارزیابی قرار گرفته‌است. براساس آیین نامه‌های مختلف طراحی سازه مقادیر مجاز بیشینه دررفت نسبی طبقات برای شرایط اعمال بارگذاری DBE معادل با ۲٪/۵ و برای شرایط اعمال بارگذاری MCE معادل با ۳٪/۵ می‌باشد. در شکل (a-۱۶) و (b-۱۶) مقادیر بیشینه دررفت نسبی طبقات برای ساختمان ۴ طبقه و براساس زمین لرزه طراحی DBE و بیشینه زمین لرزه محتمل MCE به ترتیب ارائه شده‌است. علاوه بر این در شکل (c-۱۶) و (d-۱۶) دررفت پسماند در طبقات سازه مجهز به میراگر پیشنهادی ارائه شده‌است. همچنین به جهت ارزیابی کمی نتایج، مقادیر بیشینه دررفت نسبی سازه ۴ طبقه تحت دو شرایط ذکر شده برای بارگذاری لرزه‌ای DBE و MCE در جدول (۵) نمایش داده شده‌است.



شکل ۱۶: دررفت نسبی طبقات سازه ۴ طبقه، (a) تحت شرایط بارگذاری DBE، (b) تحت شرایط بارگذاری MCE، (c) دررفت پسماند تحت شرایط بارگذاری DBE، (d) دررفت پسماند تحت شرایط MCE

جدول ۵: بیشینه دررفت نسبی ساختمان ۴ طبقه

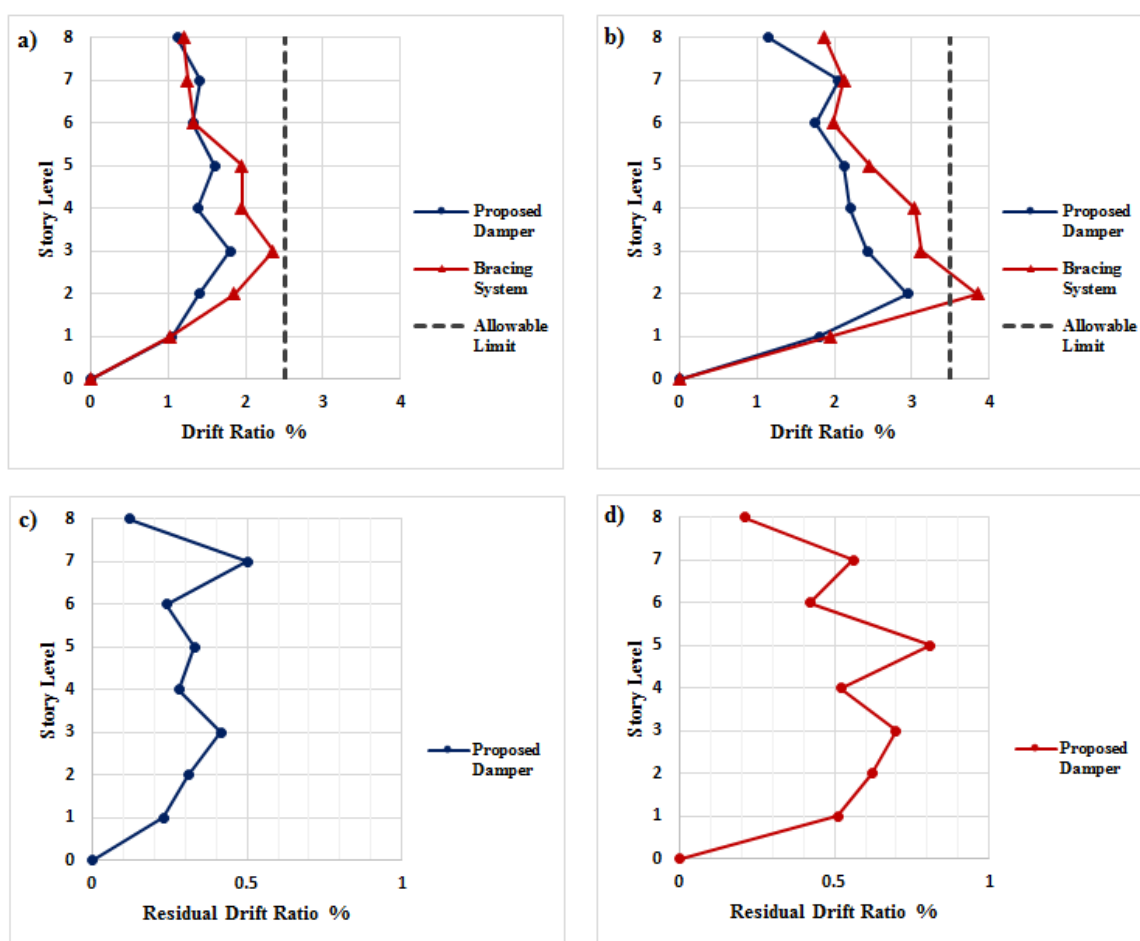
Structural Condition 4-Storey		DBE	MCE
Max Drift Ratio %	Bracing System	2.2	3.55
	Proposed Damper	1.85	3
	Reduction %	15.9	15.49

<sup>49</sup> design basis earthquake

<sup>50</sup> maximum credible earthquake

بر اساس نتایج حاصل (جدول ۵) مشخص می‌گردد که مقادیر بیشینه دررفت نسبی در سازه ۴ طبقه مجهز به سیستم مهاربندی تحت شرایط DBE و MCE به ترتیب معادل با ۲/۲٪ و ۳/۵۵٪ بوده که با تجهیز سازه به میراگر پیشنهادی مقادیر بیشینه دررفت سازه به ۱/۸۵٪ و ۳٪ کاهش یافته‌است. براین اساس بهره‌گیری از میراگر پیشنهادی منجر به کاهش حدوداً ۱۵٪ مقادیر دررفت نسبی ساختمان ۴ طبقه نسبت به شرایط تجهیز سازه به سیستم مهاربندی تحت هر دو شرایط بارگذاری DBE و MCE شده‌است.

در شکل (a-۱۷) و (b-۱۷) مقادیر بیشینه دررفت نسبی طبقات برای ساختمان ۸ طبقه و براساس زمین لرزه طراحی DBE و بیشینه زمین لرزه محتمل MCE به ترتیب ارائه شده‌است. علاوه براین در شکل (c-۱۷) و (d-۱۷) دررفت پسماند در طبقات سازه مجهز به میراگر پیشنهادی ارائه شده‌است. همچنین به جهت ارزیابی کمی نتایج، مقادیر بیشینه دررفت نسبی سازه ۸ طبقه تحت دو شرایط ذکر شده برای بارگذاری لرزه‌ای DBE و MCE در جدول (۶) نمایش داده شده‌است.



شکل ۱۷: دررفت نسبی طبقات سازه ۸ طبقه، (a) تحت شرایط بارگذاری DBE، (b) تحت شرایط بارگذاری MCE، (c) دررفت پسماند تحت شرایط بارگذاری DBE، (d) دررفت پسماند تحت شرایط بارگذاری MCE

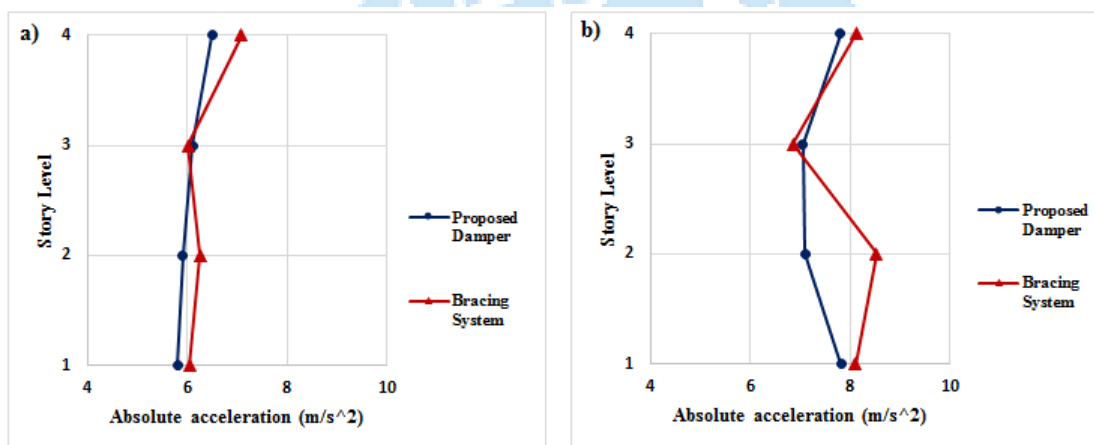
جدول ۶: بیشینه دررفت نسبی ساختمان ۸ طبقه

Structural Condition 8-Storey		DBE	MCE
Max Drift Ratio %	Bracing System	2.35	3.85
	Proposed Damper	1.8	2.95
	Reduction %	23.40	23.37

بر اساس نتایج حاصل (جدول ۶) مشخص می‌گردد که مقادیر بیشینه دررفت نسبی در سازه ۸ طبقه مجهز به سیستم مهاربندی تحت شرایط DBE و MCE به ترتیب معادل با ۲/۳۵٪ و ۳/۸۵٪ بوده که با تجهیز سازه به میراگر پیشنهادی مقادیر بیشینه دررفت سازه به ۱/۸۵٪ و ۲/۹۵٪ کاهش یافته‌است. بر این اساس بهره‌گیری از میراگر پیشنهادی منجر به کاهش حدوداً ۲۳٪ مقادیر دررفت نسبی ساختمان ۸ طبقه نسبت به شرایط تجهیز سازه به سیستم مهاربندی تحت هر دو شرایط بارگذاری DBE و MCE شده‌است.

### ۳-۳-۳ ارزیابی عملکرد میراگر در کنترل شتاب سازه

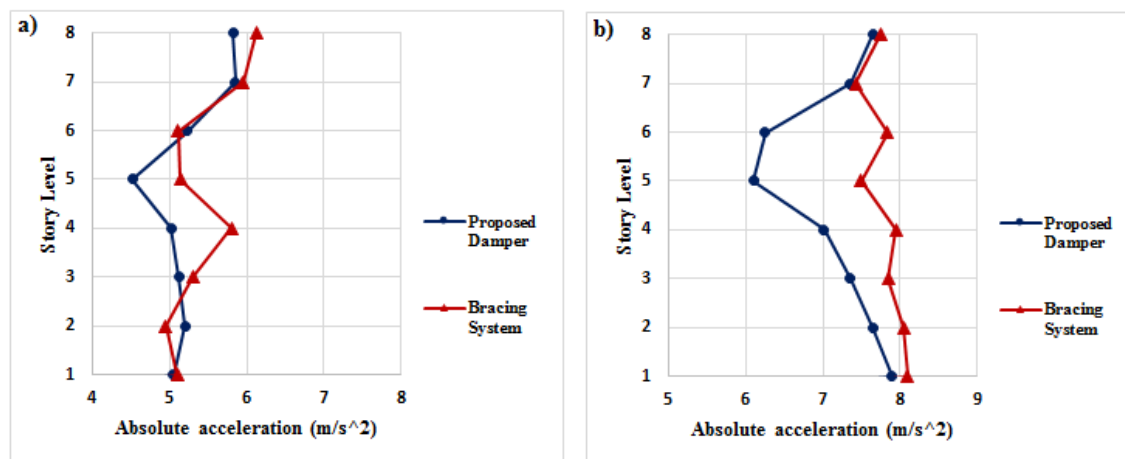
به جهت ارزیابی عملکرد میراگر پیشنهادی، در این بخش شتاب بیشینه مطلق طبقات دو سازه ۴ و ۸ طبقه تحت دو شرایط سازه مجهز به سیستم مهاربندی و سازه مجهز به میراگر پیشنهادی مورد بررسی قرار گرفته‌است. بر این اساس بیشینه مقدار دررفت نسبی طبقات سازه تحت اعمال بارگذاری لرزه‌ای بر اساس شرایط زمین لرزه پایه طراحی (DBE) و زمین لرزه محتمل بیشینه (MCE) مورد ارزیابی قرار گرفته‌است. در شکل (a-۱۸) و (b-۱۸) مقادیر بیشینه شتاب طبقات برای ساختمان ۴ طبقه و در شکل (a-۱۹) و (b-۱۹) برای ساختمان ۸ طبقه و بر اساس زمین لرزه طراحی DBE و بیشینه زمین لرزه محتمل MCE به ترتیب ارائه شده‌است. همچنین به جهت ارزیابی کمی نتایج، مقادیر شتاب سازه ۴ طبقه و ۸ طبقه تحت دو شرایط ذکر شده برای بارگذاری لرزه‌ای DBE و MCE به ترتیب در (جدول ۷) و (جدول ۸) نمایش داده شده‌است.



شکل ۱۸: شتاب مطلق طبقات سازه ۴ طبقه، (a) تحت شرایط بارگذاری DBE، (b) تحت شرایط بارگذاری MCE

جدول ۷: ارزیابی شتاب طبقات ساختمان ۴ طبقه

Structural Condition 4-Storey		DBE	MCE
Absolute acceleration	Bracing System	7.08	8.52
	Proposed Damper	6.5	7.81
	Reduction %	8.19	8.333



شکل ۱۹: شتاب مطلق طبقات سازه ۴ طبقه، (a) تحت شرایط بارگذاری DBE، (b) تحت شرایط بارگذاری MCE

جدول ۸: ارزیابی شتاب طبقات ساختمان ۸ طبقه

Structural Condition 8-Storey		DBE	MCE
Absolute acceleration	Bracing System	6.42	8.25
	Proposed Damper	5.85	7.45
	Reduction %	8.87	9.69

بر اساس نتایج حاصل (جدول ۷) مشخص می‌گردد که مقادیر شتاب طبقات در سازه ۴ طبقه مجهز به سیستم مهاربندی تحت شرایط DBE و MCE به ترتیب معادل با ۷/۰۸ و ۸/۲۵ متر بر مجذور ثانیه بوده که با تجهیز سازه به میراگر پیشنهادی مقادیر بیشینه شتاب طبقات به ۸/۱۹٪ و ۸/۳۳٪ کاهش یافته‌است. همچنین بر اساس نتایج حاصل (جدول ۸) مشخص می‌گردد که میزان شتاب طبقات سازه ۸ طبقه در شرایط تجهیز به میراگر پیشنهادی نسبت به شرایط تجهیز به سیستم مهاربندی، ۸/۸۷٪ تحت شرایط DBE و ۹/۶۹٪ تحت شرایط MCE کاهش یافته‌است.

#### ۴- نتیجه گیری

در این پژوهش به هدف ارائه میراگر اصطکاکی نوین با دو سطح لغزش، ابتدا ارزیابی دقیقی بر پارامترهای موثر در رفتار لرزه‌ای میراگرهای اصطکاکی صورت گرفته‌است. با بررسی نقاط ضعف میراگرهای اصطکاکی ارائه شده تا به امروز و مزایای متمایز این سیستم کنترلی همچون: نصب و به کارگیری آسان، سهولت در تعویض میراگر پس از رخداد زمین لرزه در صورت آسیب، سازوکار کنترل ارتعاشات ساده، وزن بهینه میراگر، مقاومت مصالح میراگر در برابر کمانش و اعوجاج به عنوان معیارهای اصلی طراحی میراگر در این پژوهش مدنظر قرار گرفته‌است. نتایج اصلی حاصل از این پژوهش به صورت موردی به شرح ذیل طبقه‌بندی می‌گردد:

۱. میراگر پیشنهادی متشکل از یک قوطی فلزی جهت حرکت صفحات اصطکاکی در داخل آن و دو صفحه متحرک بوده که با بهره‌گیری از سوراخ‌های لوبیایی با پیچ بر روی هم ثابت شده‌اند. این میراگر دارای تقارن محوری جهت حفظ خودکنترلی بوده و از دو بخش اصلی با نیروی پیش‌تنیدگی متفاوت برای پیچ‌ها (جهت ایجاد نیروی لغزش متغیر) تشکیل شده‌است.

۲. جهت ارزیابی میراگر اصطکاکی پیشنهادی مدل فیزیکی میراگر ایجاد و عملکرد لرزه‌ای آن تحت بارگذاری چرخه‌ای در دستگاه یونیورسال مورد بررسی قرار گرفت. همچنین مدل عددی میراگر پیشنهادی در بستر نرم‌افزار اپنسیس با بهره‌گیری از مصالح ElasticPPGap و استفاده از تکنیک مصالح موازی مدلسازی شده‌است. براساس نتایج حاصل مشخص گردید که میزان دقت مدل عددی نسبت به مدل آزمایشگاهی ۹/۸۱٪ بوده که بیانگر دقت قابل قبول مدل عددی در شبیه‌سازی رفتار میراگر بوده‌است.
۳. نتایج حاصل از مطالعات پارامتریک نشان داد که رفتار هیستریزیس میراگر پیشنهادی وابسته به دو پارامتر طول سوراخ لوبیایی ( $\Delta$ ) و میزان نیروی لغزش اولیه میراگر (Fs) بوده‌است، همچنین نتایج نشان داد که میراگر پیشنهادی دارای دو سختی متفاوت نسبت به شدت بارگذاری لرزه‌ای بوده به گونه‌ای که نیروی لغزش ثانویه میراگر بیشتر از نیروی لغزش اولیه آن می‌باشد، علاوه براین براساس دو پارامتر  $\Delta$  و Fs میزان سختی میراگر قابل تنظیم بوده‌است.
۴. به جهت ارزیابی عملکرد میراگر در کنترل ارتعاشات سازه، دو ساختمان ۴ و ۸ طبقه در بستر نرم‌افزار اپنسیس تحت سه وضعیت دهانه میانی بدون مهاربند و سیستم کنترلی، دهانه میانی مجهز به سیستم مهاربند و دهانه میانه مجهز به میراگر مدلسازی و رفتار لرزه‌ای سازه تحت اعمال بار لرزه‌ای ۷ زمین لرزه بزرگ مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که با تجهیز سازه ۴ طبقه به میراگر، میزان میانگین جابه‌جایی‌های طبقه فوقانی سازه نسبت به شرایط عدم تجهیز به میراگر و تجهیز سازه به سیستم مهاربندی به ترتیب ۸۲/۷٪ و ۲۹/۹۲٪ کاهش یافته‌است. همچنین نتایج حاصل از ارزیابی ساختمان ۸ طبقه نشان داد که تجهیز سازه به میراگر اصطکاکی پیشنهادی موجب کاهش میانگین جابه‌جایی به میزان ۷۲/۲۶٪ نسبت به شرایط عدم تجهیز سازه به میراگر اصطکاکی و ۳۳/۰۶٪ نسبت به شرایط تجهیز سازه به سیستم مهاربندی گردیده‌است.
۵. با ارزیابی دریافت نسبی سازه مشخص شد که بهره‌گیری از میراگر پیشنهادی منجر به کاهش تقریبی ۱۵٪ و ۲۳٪ مقادیر دریافت نسبی به ترتیب در ساختمان ۴ و ۸ طبقه نسبت به شرایط تجهیز سازه به سیستم مهاربندی تحت هر دو شرایط بارگذاری DBE و MCE شده‌است.
۶. با ارزیابی نتایج حاصل از عملکرد میراگر اصطکاکی پیشنهادی که در قالب این پژوهش به هردو روش آزمایشگاهی و عددی مورد بررسی قرار گرفت، مشخص می‌گردد که میراگر پیشنهادی عملکرد قابل قبولی در کنترل ارتعاشات لرزه‌ای سازه داشته و با توجه به سطح عملکردی متغیر میراگر، می‌تواند به عنوان یک ابزار مناسب برای کنترل ارتعاشات سازه به کارگیری شود.
- در این مطالعه میراگر نوین اصطکاکی با سطح عملکرد متغیر ارائه و عملکرد آن مورد ارزیابی قرار گرفته‌است، همچنین به جهت بررسی عملکرد کنترلی این میراگر بر سازه، دو سازه ۴ و ۸ طبقه تحت ۷ بارگذاری زمین لرزه دور از گسل مورد ارزیابی قرار گرفته که نتایج بیانگر عملکرد کنترلی قابل قبول میراگر پیشنهادی بوده‌است. برای مطالعات آتی پیشنهاد می‌گردد که عملکرد میراگر پیشنهادی در کنترل ارتعاشات سازه تحت رخداد زمین لرزه‌های حوزه نزدیک مورد بررسی قرار گیرد.

## سپاسگزاری

نویسندگان این مقاله از دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل به جهت ایجاد شرایط مناسب و مساعدت لازم برای انجام مدل‌سازی آزمایشگاهی قدردانی می‌نمایند.

## مراجع

- [1] Guo, J., Li, H., Zhang, C., Chu, S., & Dang, X. (2022). Effect of an Innovative Friction Damper on Seismic Responses of a Continuous Girder Bridge under Near-Fault Excitations. *Buildings*, 12(7), 1019.

- [2] Artar, M., & Carbas, S. (2022, October). Optimum sizing design of steel frame structures through maximum energy dissipation of friction dampers under seismic excitations. In *Structures* (Vol. 44, pp. 1928-1944). Elsevier.
- [3] Kandasamy, R., Cui, F., Townsend, N., Foo, C. C., Guo, J., Sheno, A., & Xiong, Y. (2016). A review of vibration control methods for marine offshore structures. *Ocean Engineering*, 127, 279-297.
- [4] Zhang, C., & Ou, J. (2008). Control structure interaction of electromagnetic mass damper system for structural vibration control. *Journal of engineering mechanics*, 134(5), 428-437.
- [5] Wang, W., Hua, X., Wang, X., Wu, J., Sun, H., & Song, G. (2019). Mechanical behavior of magnetorheological dampers after long-term operation in a cable vibration control system. *Structural Control and Health Monitoring*, 26(1), e2280.
- [6] Stanikzai, M. H., Elias, S., Matsagar, V. A., & Jain, A. K. (2020). Seismic response control of base-isolated buildings using tuned mass damper. *Australian Journal of Structural Engineering*, 21(1), 310-321.
- [7] Yin, X., Song, G., & Liu, Y. (2019). Vibration suppression of wind/traffic/bridge coupled system using multiple pounding tuned mass dampers (MPTMD). *Sensors*, 19(5), 1133.
- [8] Pourzangbar, A., Vaezi, M., Mousavi, S. M., & Saber, A. (2020). Effects of brace-viscous damper system on the dynamic response of steel frames. *International Journal of Engineering*, 33(5), 720-731.
- [9] Tirca, L. (2015). Friction dampers for seismic protections of steel buildings subjected to earthquakes: Emphasis on structural design. *Encyclopedia of Earthquake Engineering*, Springer, Berlin, 1058, 1070.
- [10] Hua, X. G., Tai, Y. J., Huang, Z. W., & Chen, Z. Q. (2021). Optimal design and performance evaluation of a novel hysteretic friction tuned inerter damper for vibration control systems. *Structural Control and Health Monitoring*, 28(8), e2775.
- [11] Moghaddam, H., Afzalnia, F., & Hajirasouliha, I. (2022, March). Optimal distribution of friction dampers to improve the seismic performance of steel moment resisting frames. In *Structures* (Vol. 37, pp. 624-644). Elsevier.
- [12] Lavan, O., & Dargush, G. F. (2009). Multi-objective evolutionary seismic design with passive energy dissipation systems. *Journal of Earthquake Engineering*, 13(6), 758-790.
- [13] Nishimura, I. (2012, December). Performance evaluation of a building structure with nonlinear dampers under strong ground motion on March 11, 2011. In *14th US-Japan workshop on improvement of structural design and construction practices*.
- [14] De Domenico, D., & Hajirasouliha, I. (2021). Multi-level performance-based design optimisation of steel frames with nonlinear viscous dampers. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 19(12), 5015-5049.
- [15] Ghorbani, H. R., & Rofooei, F. R. (2020). A novel double slip loads friction damper to control the seismic response of structures. *Engineering Structures*, 225, 111273.
- [16] Pall, A. S. (1979). *Limited slip bolted joints: a device to control the seismic response of large panel structures* (Doctoral dissertation, Concordia University).
- [17] MacRae, G. A., Clifton, G. C., Mackinven, H., Mago, N., Butterworth, J., & Pampanin, S. (2010). The sliding hinge joint moment connection. *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*, 43(3), 202-212.
- [18] Christopoulos, C., Tremblay, R., Kim, H. J., & Lacerte, M. (2008). Self-centering energy dissipative bracing system for the seismic resistance of structures: development and validation. *Journal of structural engineering*, 134(1), 96-107.
- [19] Filiatrault, A., Tremblay, R., & Kar, R. (2000). Performance evaluation of friction spring seismic damper. *Journal of Structural Engineering*, 126(4), 491-499.
- [20] Hu, S., Wang, W., & Qu, B. (2021). Self-centering companion spines with friction spring dampers: Validation test and direct displacement-based design. *Engineering Structures*, 238, 112191.
- [21] Wang, W., Fang, C., Zhao, Y., Sause, R., Hu, S., & Ricles, J. (2019). Self-centering friction spring dampers for seismic resilience. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 48(9), 1045-1065.
- [22] Javidan, M. M., & Kim, J. (2019). Seismic retrofit of soft-first-story structures using rotational friction dampers. *Journal of structural engineering*, 145(12), 04019162.
- [23] Pall, A. S., Marsh, C., & Fazio, P. (1980). Friction joints for seismic control of large panel structures. *Journal of Prestressed Concrete Institute*, 25(6), 38-61.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] Cho, C. G., & Kwon, M. (2004). Development and modeling of a frictional wall damper and its applications in reinforced concrete frame structures. *Earthquake engineering & structural dynamics*, 33(7), 821-838.
- [27] Samani, H. R., Mirtaheri, M., & Zandi, A. P. (2015). Experimental and numerical study of a new adjustable frictional damper. *Journal of Constructional Steel Research*, 112, 354-362.
- [28] Martínez, C. A., & Curadelli, O. (2017). Testing and performance of a new friction damper for seismic vibration control. *Journal of Sound and Vibration*, 399, 60-74.

- [29] Wang, G., Wang, Y., Yuan, J., Yang, Y., & Wang, D. (2017). Modeling and experimental investigation of a novel arc-surfaced frictional damper. *Journal of Sound and Vibration*, 389, 89-100.
- [30] Lee, C. H., Kim, J., Kim, D. H., Ryu, J., & Ju, Y. K. (2016). Numerical and experimental analysis of combined behavior of shear-type friction damper and non-uniform strip damper for multi-level seismic protection. *Engineering Structures*, 114, 75-92.
- [31] Shu, Z., Ma, R., & He, M. (2017). Comprehending the ductile behavior of slotted bolted connections. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 26(3), e1309.
- [32] Lee, J., Kang, H., & Kim, J. (2017). Seismic performance of steel plate slit-friction hybrid dampers. *Journal of Constructional Steel Research*, 136, 128-139.
- [33] Yu, H., Xiao, W., Yuan, Y., & Taerwe, L. (2017). Seismic mitigation for immersion joints: Design and validation. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 67, 39-51.
- [34] Zhu, L. H., Li, G., & Li, H. N. (2018). A lattice-shaped friction device and its performance in weak-story prevention. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 27(15), e1535.
- [35] Kim, D. H., Lee, C. H., & Ju, Y. K. (2017). Experimental investigation of hybrid buckling-restrained braces. *International journal of steel structures*, 17, 245-255.
- [36] Taiyari, F., Mazzolani, F. M., & Bagheri, S. (2019). Damage-based optimal design of friction dampers in multistory chevron braced steel frames. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 119, 11-20.
- [37] Asfaw, A. M., Cao, L., Ozbulut, O. E., & Ricles, J. (2022). Development of a shape memory alloy-based friction damper and its experimental characterization considering rate and temperature effects. *Engineering Structures*, 273, 115101.
- [38] Tatar, A., Baker, A. M., & Dowden, D. M. (2023). A generalized method for numerical modeling of seismically resilient friction dampers using flat slider bearing element. *Engineering Structures*, 275, 115248.
- [39] Clark, P. W. (2002). *Protocol for fabrication, inspection, testing and documentation of beam-colum connection tests and other experimental specimens*. SAC Joint Venture.
- [40] Tjahyadi, A. (2002). Slotted-bolted friction damper as a seismic energy dissipator in a braced timber frame.
- [41] Cavallaro, G. F., Latour, M., Francavilla, A. B., Piluso, V., & Rizzano, G. (2018). Standardised friction damper bolt assemblies time-related relaxation and installed tension variability. *Journal of Constructional Steel Research*, 141, 145-155.
- [42] Goulet, C. A., Kishida, T., Ancheta, T. D., Cramer, C. H., Darragh, R. B., Silva, W. J., ... & Youngs, R. R. (2021). PEER NGA-east database. *Earthquake Spectra*, 37(1\_suppl), 1331-1353.