

## بررسی اثر میرایی هیسترتیک آلیاژهای هوشمند بر عملکرد لرزه ای میراگر جرمی تنظیم شده

مهدی کیانی<sup>۱</sup>، جواد واثقی امیری<sup>۲\*</sup>

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

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

### چکیده

میراگر جرمی تنظیم شده ابزاری رایج در کنترل غیرفعال است که در بسیاری از سازه ها مورد استفاده قرار گرفته است. با این حال، با تمام ویژگی های مناسبی که در این میراگر وجود دارد، مهمترین محدودیت عملکردی آن، ضعف در برابر تحریک های با محتوای فرکانسی بالا است. روش های مختلفی برای غلبه بر این مشکل پیشنهاد شده اند که در میان آنها استفاده از میرایی هیسترتیک مصالح با رفتار غیرخطی به عنوان یک روش موثر شناخته شده است. در میان مصالح با رفتار غیرخطی آلیاژهای حافظه شکی دارای ویژگی های مناسب و حلقه های رفتاری هیستریزیس وسیع هستند. از این رو در این مقاله با استفاده از سختی غیرخطی و میرایی هیسترتیک یک فنر از جنس آلیاژ حافظه شکی، سختی خطی و میرایی ویسکوز میراگرهای جرمی رایج جایگزین می شوند. سپس میراگر جرمی تغییر یافته برای کنترل پاسخ های سازه های یک درجه آزادی تحت تحریک هارمونیک مورد استفاده قرار گرفته و اثر دامنه بارگذاری بر کنترل پاسخ های سازه ای تعیین می شود. پس از آن میراگر برای کنترل پاسخ های لرزه ای سازه های یک درجه آزادی به کار می رود تا عملکرد آن تحت تاثیر بارگذاری های لرزه ای دارای محتوای فرکانسی بالا با عملکرد میراگرهای جرمی معمول مقایسه گردد. نتایج این تحلیل ها نشان می دهند که ویژگی های آلیاژهای حافظه شکی می توانند به نحو قابل قبولی تاثیر دامنه بارگذاری را بر عملکرد میراگر جرمی غیرخطی کنترل نمایند. همچنین حضور میرایی هیسترتیک می تواند به میزان قابل ملاحظه ای کنترل پاسخ های لرزه ای سازه های یک درجه آزادی را نسبت به میراگرهای جرمی معمول بهبود بخشد به شرطی که ویژگی های دینامیکی میراگر غیرخطی مقادیر بهینه خود را اختیار کنند.

کلمات کلیدی: میراگر جرمی تنظیم شده، آلیاژ حافظه شکی، میرایی هیسترتیک، بهینه سازی

سابقه مقاله:

شناسه دیجیتال:

10.22065/JSCE.2018.96994.1310	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
doi: 10.22065/JSCE.2018.96994.1310	۱۳۹۸/۰۶/۰۱	۱۳۹۶/۱۱/۰۷	۱۳۹۶/۱۱/۰۷	۱۳۹۶/۱۰/۰۶	۱۳۹۶/۰۶/۰۹
جواد واثقی امیری vaseghi@nit.ac.ir				*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:	

## Evaluation of Effects of Hysteretic Damping of Shape Memory Alloys on Seismic Performance of Tuned Mass Damper

Mahdi Kiani<sup>1</sup>, Javad Vaseghi Amiri<sup>2\*</sup>

1-Ph.D. Student, Faculty of Civil Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

2-Professor, Faculty of Civil Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

### ABSTRACT

*Tuned mass damper is a common tool in passive control, which is used in many structures. However, with all the proper features, its most important functional limitation is the weakness against broad band excitation. Various methods have been proposed to overcome this problem, among which using hysteretic damping of materials with nonlinear behavior is known effective. Among materials with nonlinear behavior, shape memory alloys have good features and large hysteresis loops. Hence, in this paper, using nonlinear stiffness and hysteretic damping of a shape memory alloy spring, linear stiffness and viscous damping of a common tuned mass damper are replaced. Then, the modified damper has been used to control responses of a single degree of freedom structure under harmonic loadings and the effect of the loading amplitude on the control of the structural responses was determined. Subsequently, the damper has been used to control seismic responses of single degree of freedom structures to compare its performance under broad band seismic loadings with the performance of conventional tuned mass dampers. Results of the analyses show that the characteristics of shape memory alloys can adequately control the impact of the loading amplitude on the performance of nonlinear mass dampers. Also, the presence of hysteretic damping can significantly improve control of seismic responses of single degree degrees of freedom structures compared to conventional tuned mass dampers, provided that dynamic properties of the nonlinear mass damper take their optimal values.*

### ARTICLE INFO

Received: 31/08/2017

Revised: 27/12/2017

Accepted: 27/01/2018

### Keywords:

*Tuned mass damper,  
Shape memory alloy,  
Hysteretic damping,  
Optimization,  
Seismic performance.*

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/JSCE.2018.96994.1310

\*Corresponding author: Javad Vaseghi Amiri  
Email address: vaseghi@nit.ac.ir

۱- مقدمه

طی دهه‌های اخیر پژوهشگران مهندسی سازه کوشیده‌اند تا روش‌های کنترل سازه را در غالب سه زیرشاخه اصلی غیرفعال، نیمه فعال و فعال گسترش دهند تا بدین وسیله تلفات ناشی از زمین لرزه‌ها کاهش یابد. میراگر جرمی تنظیم شده<sup>۱</sup> متشکل از یک جرم، یک فنر خطی و یک میراگر ویسکوز از جمله ادوات کنترل غیرفعال است که در گستره وسیعی از سازه‌ها مورد استفاده قرار گرفته است. در این میراگر به واسطه تنظیم فرکانس طبیعی میراگر جرمی با فرکانس اصلی سازه تحت کنترل، انرژی نوسانی از سازه به میراگر منتقل شده و در آنجا توسط میراگر ویسکوز مستهلک می‌شود. با این توضیح، بدیهی است عملکرد مطلوب در میراگر جرمی وقتی حاصل می‌شود که ویژگی‌های دینامیکی آن به درستی تنظیم شده باشند. این مورد، موضوع بسیاری از تحقیقات پیشین در زمینه میراگر جرمی بوده است [۵-۱]. اما با وجود تاثیر چشم‌گیر میراگر جرمی در زمینه کنترل پاسخ سازه‌ها، یکی از مهمترین ناکارآمدی‌های آن ضعف در مقابل تحریک‌های با محتوای فرکانسی بالا است [۶]. از این رو محققین در مطالعات خود تلاش نموده‌اند تا این نقیصه را برطرف نمایند.

میراگر جرمی چندگانه<sup>۲</sup> [۷]، میراگر جرمی فعال<sup>۳</sup> [۸] و میراگر جرمی نیمه فعال<sup>۴</sup> [۹] از جمله ادواتی هستند که به منظور ارتقاء میراگر جرمی غیرفعال پیشنهاد شده‌اند و توانسته‌اند به نحو قابل ملاحظه‌ای در پوشش معایب آن موثر واقع شوند. اما، در عملکرد این ابزارهای ارتقا یافته نیز محدودیت‌هایی وجود دارد. میراگر جرمی چندگانه در مورد سازه‌هایی که همزمان دارای میرایی و سختی متغیر هستند، تاثیر خود را از دست می‌دهد. میراگر جرمی فعال برای اعمال کنترل بر پاسخ سازه نیازمند یک منبع بزرگ انرژی است. میراگر جرمی نیمه فعال اگرچه قادر است تا تمامی محدودیت‌های قبلی را از میان برداشته و کنترلی موثرتر بر سازه اعمال نماید، اما، هزینه‌های اجرا، نگهداری و پیچیدگی ذاتی این میراگر، عملکرد آنها را محدود نموده و اهمیت بررسی برای دست‌یابی به ابزارهای غیرفعال موثرتر را بیش از پیش نمایان می‌سازد.

روش دیگری که به ویژه برای افزایش محدوده فرکانس عملکردی میراگرهای جرمی پیشنهاد گردیده است، استفاده از میراگرهای جرمی غیرخطی است، به طوری که، المان غیرخطی می‌تواند به صورت میرایی و یا سختی غیرخطی در نظر گرفته شود. لاکاربونارا و وسترونی [۱۰] عملکرد لرزه‌ای یک میراگر جرمی دارای سختی غیرخطی را بررسی کرده و نشان دادند که این میراگر می‌تواند پاسخ‌های لرزه‌ای ساختمان‌های کوتاه مرتبه را به خوبی کاهش دهد. عملکرد و پارامترهای بهینه یک میراگر جرمی دارای میراگر ویسکوز غیرخطی تحت تحریک تصادفی طیف سفید توسط رودینگر [۱۱] بررسی شده و نتایج مطلوب استفاده از این میراگر گزارش گردید. بعد از این مطالعه، چانگ و همکاران [۱۲] گزارشی از نحوه پیاده سازی این میراگر در برج تایپه ۱۰۱ در تایوان ارائه نمودند. در کارهای دیگر نیز اشاره شده است که یک میراگر جرمی غیرخطی نسبت به میراگرهای جرمی معمول نیاز به درصد جرمی کمتری دارد و می‌تواند بهتر از میراگر جرمی خطی پاسخ‌های گذرای<sup>۵</sup> نوسان را کاهش دهد [۱۳]. در برخی دیگر از مطالعات در زمینه میراگرهای جرمی غیرخطی، کاربرد آلیاژهای حافظه شکلی فوق ارتجاعی<sup>۶</sup> (SMA) در این میراگرها مورد بررسی قرار گرفته است. ویژگی بارز این آلیاژها در توانایی بازبایی کرنش‌هایی با بزرگی ۱۰ درصد است. بومیک و میشر [۱۴] عملکرد لرزه‌ای یک میراگر جرمی دارای یک فنر SMA فوق ارتجاعی را مورد بررسی قرار دادند. در این میراگر فنر غیرخطی به جای فنر خطی و میراگر ویسکوز استفاده شده است. نتایج این بررسی‌ها حاکی از آن است که این میراگر جرمی غیرخطی می‌تواند با داشتن درصد جرمی کمتر نسبت به میراگرهای جرمی معمول، کنترل موثری بر پاسخ‌های لرزه‌ای سازه یک درجه آزادی اعمال نماید. هوانگ و همکاران [۱۵] در مطالعه‌ای آزمایشگاهی تاثیرات درجه حرارت را بر یک میراگر جرمی غیرفعال مجهز به یک میله فوق ارتجاعی پایه مس بررسی نمودند. این میراگر به منظور حذف ارتعاشات یک تیر فولادی در کف تحت بارهای بهره برداری پیشنهاد گردید. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که پاسخ ارتعاش این سیستم می‌تواند توسط میراگر پیشنهادی به‌طور قابل توجهی کاهش یابد، زمانی که سختی میراگر با گرم یا سرد کردن میله SMA تنظیم شود. این رفتار وابسته به دما حاکی از آن است که SMA فوق ارتجاعی می‌تواند برای توسعه ابزارهای لرزه‌ای کنترل فعال یا نیمه فعال به کار گرفته شود که البته این مورد توسط محققان مورد مطالعه قرار گرفته

<sup>1</sup>Tuned Mass Damper, TMD

<sup>2</sup>Multiple Tuned Mass Damper, MTMD

<sup>3</sup>Active Tuned Mass Damper

<sup>4</sup>Semi Active Tuned Mass Damper

<sup>5</sup>Transient Responses

<sup>6</sup>super elastic Shape Memory Alloys, SMA

است [۱۶-۱۸]. در این مطالعات، SMAهای فوق ارتجاعی به عنوان جاذب ارتعاشی استفاده شده‌اند و فرکانس طبیعی ابزار در هر لحظه با گرم کردن یا سرد کردن المان SMA تنظیم می‌شود.

همانند میراگرهای جرمی خطی، استفاده از میراگرهای جرمی غیرخطی نیز با موانعی مواجه است که باید توجه ویژه‌ای به آنها شود. دامنه تحریک ورودی بر نوسان یک میراگر جرمی غیرخطی تاثیرگذار است به طوری که می‌تواند موجب ایجاد پاسخ‌های ناپایدار یا الگوهای نوسانی ناخوشایند در پاسخ‌های ارتعاشی شود [۱۹]. جندلمان و همکاران [۲۰] نشان دادند زمانی که فرکانس یک تحریک هارمونیک نزدیک به فرکانس اصلی یک سیستم نوسانی خطی دارای میراگر جرمی با غیرخطی است، پاسخ نوسانگر دارای الگویی شبه هارمونیک خواهد بود. استاروتسکی و جندلمان [۲۱] یک سیستم نوسانی متشکل از یک نوسانگر خطی و یک میراگر جرمی غیرخطی را تحت تحریک هارمونیک بررسی نمودند و به این نتیجه رسیدند که میراگر جرمی با سختی درجه سوم و میرایی غیرخطی درجه دوم می‌تواند به نحوی موثر پاسخ‌های هارمونیک مخرب را کنترل نماید. سان و همکاران [۲۲] یک نوسانگر غیرخطی دافینگ<sup>۷</sup> را که مجهز به یک میراگر با سختی غیرخطی بود، تحت تحریک هارمونیک مورد بررسی قرار دادند. آنها مشاهده کردند که میراگر غیر خطی در برخی از حالات تحریک هارمونیک قادر به کنترل پاسخ‌های نوسانی با دامنه بزرگ نیست و پیشنهاد کردند که برای حذف این پاسخ‌ها میراگر جرمی غیرخطی با یک میراگر جرمی نیمه فعال همراه شود. کارپنتینو و همکاران [۲۳] رشته‌های فولادی تحت خمش را که متصل به یک جرم ثانویه بود برای کنترل ارتعاشات وسط دهانه یک تیر دوسر مفصل در یک مطالعه تحلیلی و آزمایشگاهی مورد بررسی قرار دادند. تحریک‌های دینامیکی مورد استفاده در این مطالعه یک تحریک هارمونیک به همراه یک تحریک تصادفی طیف سفید بودند. آنها تاثیر دامنه تحریک را بر پارامترهای بهینه میراگر جرمی غیرخطی بررسی نموده و نتیجه گرفتند یک فنر غیرخطی با سختی پس از تسلیم مناسب می‌تواند پاسخ سازه را به نحو قابل توجهی تحت کنترل قرار دهد.

با توجه به مرور مطالعات گذشته مشخص می‌شود که معرفی یک میراگر جرمی که بتواند عملکرد لرزه‌ای بهتری نسبت به میراگرهای جرمی خطی رایج داشته باشد و دارای پیچیدگی‌های محاسباتی و اجرایی زیاد نباشد، تا به امروز مورد توجه بسیاری از محققین بوده است. از سویی دیگر نتایج مطالعات گذشته حاکی از توانایی میراگرهای جرمی غیرخطی غیرفعال برای کنترل پاسخ‌های نوسانی هستند، که هم می‌توانند ضعف‌های میراگر جرمی خطی را پوشش دهند و هم نسبت به میراگرهای نیمه فعال دارای پیچیدگی‌های کمتری هستند. از این رو در این مقاله، یک میراگر جرمی غیرخطی جدید شامل یک فنر SMA با خاصیت حافظه شکلی<sup>۸</sup> به نام MSMA-TMD معرفی شده است. در این میراگر جرمی فنر SMA جایگزین فنر خطی و میراگر ویسکوز در میراگرهای جرمی معمول خواهد شد. همانگونه که در بخش بعدی بیان خواهد شد، مزایای اصلی فنرهای SMA با خاصیت حافظه شکلی برخلاف SMAهای فوق ارتجاعی، حلقه‌های هیستریزس بزرگتر و پایداری شکل حلقه‌ها تحت تغییرات ویژگی‌های بارگذاری و دمای محیط است. این مطلب بدان معناست که، تامین همزمان سختی و میرایی مورد نیاز یک میراگر جرمی تنها با استفاده از فنر SMA فوق ارتجاعی تحت تحریک‌های لرزه‌ای (مانند مطالعه [۱۴])، می‌تواند با تغییر ویژگی‌های بارگذاری و شرایط محیطی، دچار اختلال گردد و در مقابل، فنر SMA حافظه شکلی می‌تواند با اتکا بر حلقه‌های هیستریزس بزرگتر و ویژگی‌های پایدارتر، عملکرد مناسب‌تری داشته باشد. البته، برخلاف SMAهای فوق ارتجاعی که توانایی بازیابی کرنش به محض باربرداری را دارند، SMAهای حافظه شکلی نیاز به تحریک دما برای بازیابی تغییر شکل‌ها دارند که این مورد محدودیتی در کاربرد آنها ایجاد نمی‌نماید. بنابراین، با توجه به این مطالب انتظار می‌رود که MSMA-TMD دارای قابلیت مناسب و ویژگی‌های رفتاری مطلوبی در کنترل نوسان سازه باشد. در این مطالعه اثرات دامنه تحریک دینامیکی بر رفتار MSMA-TMD به عنوان نگرانی اصلی در کاربرد میراگرهای جرمی غیرخطی، مورد بررسی قرار می‌گیرد. علاوه بر این، در این مطالعه به بررسی تاثیر میرایی هیستریک ناشی از فنر SMA حافظه شکلی بر عملکرد لرزه‌ای میراگر جرمی پرداخته شده و عملکرد لرزه‌ای MSMA-TMD در مقایسه با میراگر جرمی خطی معمولی مورد بررسی قرار گرفته است.

<sup>7</sup> Duffing oscillator

<sup>8</sup> Shape memory effect

## ۲- خواص آلیاژهای هوشمند

SMAها دسته‌ای از فلزات هستند که خواص خارق العاده ای از خود نشان می‌دهند. این آلیاژها دو فاز رفتاری اصلی دارند که هریک دارای ساختارهای کریستالی متفاوتی هستند. یکی از این فازها مارتنسیت<sup>۹</sup> نام دارد که در دماهای پایین و سطوح بالای تنش پایدار است و دیگری آستنیت<sup>۱۰</sup> نام دارد که در دماهای بالا و تنش‌های پایین پایدار است. آستنیت که فاز والد نیز نامیده می‌شود، اغلب ساختار کریستالی مکعبی دارد، در حالیکه مارتنسیت ساختار کریستالی مرتبه پایین‌تر دارد. مارتنسیت با توجه به جهت‌گیری کریستال‌ها در دو شکل یافت می‌شود: مارتنسیت توام و غیر توام<sup>۱۱</sup>. خاصیت کلیدی SMAها در نتیجه تغییر فاز برگشت‌پذیر بین فازهای آستنیت و مارتنسیت حاصل می‌گردد. این انتقال فازهای جامد به جامد که تحت عنوان انتقال فاز مارتنسیت نیز نامیده می‌شوند، در اثر اعوجاج برشی شبکه کریستالی بدون هیچ‌گونه انتشار ذرات حاصل می‌گردد.

انتقال فاز می‌تواند تحت تاثیر حرارت (اثر حافظه شکلی) و یا تحت تاثیر تنش (اثر فوق ارتجاعی) صورت پذیرد. انتقال فاز در چهار مقدار درجه حرارت مشخص رخ می‌دهد که عبارتند از: (۱) دمای آغاز فاز آستنیت،  $A_s$ ، که ماده از حالت مارتنسیت توام انتقال را به سمت آستنیت آغاز می‌کند (۲) دمای پایان فاز آستنیت،  $A_f$ ، که در آن انتقال به فاز آستنیت پایان یافته است (۳) دمای آغاز فاز مارتنسیت،  $M_s$ ، که در آن آستنیت شروع به انتقال به سمت مارتنسیت توام می‌کند (۴) دمای پایان فاز مارتنسیت،  $M_f$ ، که در آن انتقال به فاز مارتنسیت کامل شده است. لازم به توجه است که تمامی این دماهای انتقال با اعمال تنش افزایش می‌یابند.

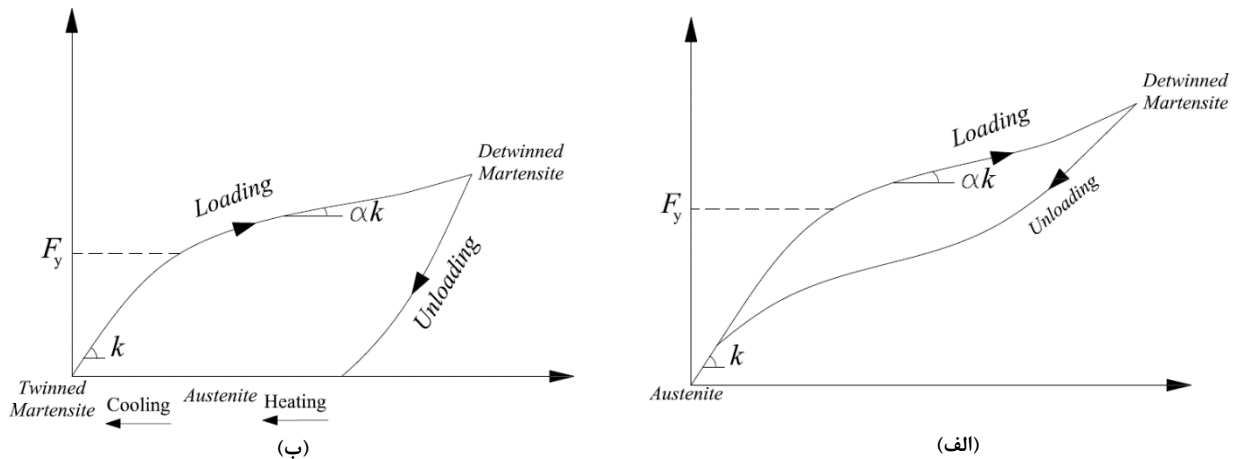
اثر حافظه شکلی به توانایی بازیابی شکل اولیه SMA در اثر یک چرخه گرمایی پس از تغییر شکل اشاره دارد. در درجه حرارت کمتر از  $M_f$  آلیاژ SMA در فاز مارتنسیت توام است. هنگامی که تنش بیش از یک حد بحرانی به آن اعمال گردد، تغییر فاز به مارتنسیت غیر توام در آن رخ می‌دهد و پس از باربرداری نیز در همین فاز ساختاری باقی می‌ماند. در این وضعیت SMA می‌تواند شکل اولیه خود را پس از گرم شدن تا درجه حرارتی بیش از  $A_f$  بازیابد. گرم نمودن ماده به درجه حرارتی بیش از  $A_f$  منجر به تشکیل فاز آستنیت و تکمیل بازیابی شکل اولیه می‌گردد. پس از این و با سرد نمودن، SMA بدون هیچ‌گونه جابجایی پسماندی به فاز اولیه مارتنسیت توام خود باز می‌گردد. شکل ۱ (الف) اثر حافظه شکلی را بر منحنی تنش - کرنش به تصویر کشیده است.

اثر فوق ارتجاعی به بازیابی کرنش‌های بزرگ در نتیجه انتقال فاز مارتنسیتی تحت دمای ثابت اطلاق می‌شود. SMA در دماهای نسبتاً زیاد در فاز آستنیت است (دماهای بزرگتر از  $A_f$ ). هنگامی که در این وضعیت SMA تحت تنش‌های قابل توجه قرار می‌گیرد، از فاز آستنیت به مارتنسیت غیر توام تغییر فاز می‌دهد. هنگامی که تنش اعمالی حذف گردد، تغییر فاز برعکس رخ می‌دهد و SMA به فاز آستنیتی خود باز می‌گردد که نتیجه آن از بین رفتن کامل تمامی تغییر شکل‌ها و یک چرخه هیستریزس قابل توجه است. منحنی تنش - کرنش شکل ۱ (ب) نشان دهنده اثر فوق ارتجاعی است. لازم به توجه است که در دماهای کمتر از  $A_f$  و بزرگتر از  $A_s$ ، تنها بخشی از تغییر شکل‌ها پس از باربرداری بازگشت‌پذیر خواهند بود. همچنین اگر دما بیشتر از دمای بحرانی  $M_d$  باشد ماده در فاز آستنیت پایدار خواهد بود و هیچ‌گونه تغییر فاز مارتنسیتی در اثر اعمال تنش رخ نخواهد داد.

## ۳- مدل سازی عددی آلیاژهای هوشمند

محققان تلاش نموده‌اند تا خواص مکانیکی SMAها را به واسطه روش‌های عددی مدل کنند. بررسی جامعی بر انواع این مدل‌ها در کار اوزبولوت و همکاران [۲۴] خلاصه شده است. در این مقاله، مدل SMA یک بعدی، پیشنهاد شده در [۲۵] مورد استفاده قرار می‌گیرد که می‌تواند اثرات فوق ارتجاعی و حافظه شکلی SMAها را پیاده سازی نماید. این مدل ساختاری براساس مدل پارامتری ون [۲۶] برای رفتار

9Martensite  
10Austenite  
11 Twinned and DeTwinned



شکل ۱: آلیاز حافظه شکلی (الف) با اثر فوق ارتجاعی (ب) با اثر حافظه شکلی

نیرو تغییر شکل غیرخطی ارائه شده است. شکل یک بعدی از این مدل به شرح زیر است:

$$\dot{F} = k_i \left[ x - |x| \left| \frac{F - \beta}{F_y} \right|^{n-1} \left( \frac{F - \beta}{F_y} \right) \right] \quad (1)$$

$$\beta = \alpha k_i \left[ x - \frac{F}{k_i} + f_T |x|^c \operatorname{erf}(ax) \right]$$

که در آن

$F$  نیروی بازگرداننده فنر SMA

$x$  تغییر شکل فنر SMA

$k_i$  سختی اولیه قبل از آغاز تغییر فاز SMA، نشان داده شده در شکل ۱،

$F_y$  نیروی متناظر با آستانه تغییر فاز ناشی از تنش یا نیروی انتقال، نشان داده شده در شکل ۱،

$\alpha$  نسبت سختی پس از تغییر فاز، نشان داده شده در شکل ۱،

$a$  ضریب کنترل کننده بازیابی تغییر شکل ها در فرآیند باربرداری SMA های فوق ارتجاعی،

$n$  کنترل کننده تندی تغییر فاز (در این مطالعه ۲ فرض شده است)،

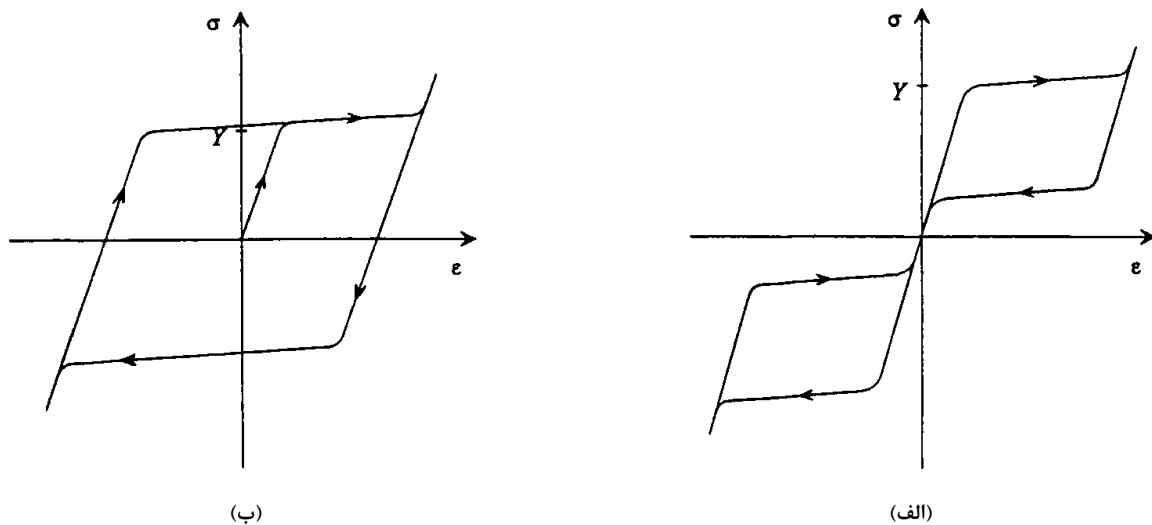
$c$  مربوط به شیب خط باربرداری SMA های فوق ارتجاعی،

$f_T$  کنترل کننده نوع و اندازه چرخه های رفتاری SMA و

$\operatorname{erf}()$  تابع خطا هستند.

در این رابطه بالانویس (.) نشان دهنده مشتق نسبت به زمان است.

برای SMA ها با اثر حافظه شکلی  $f_T$  برابر صفر منظور می گردد [۲۵]. شکل ۲ خروجی های هیستریزس مدل مورد استفاده را نمایش می دهد. این شکل حلقه های هیستریزس هر دو نوع SMA فوق ارتجاعی و حافظه شکلی را نشان می دهد. این مدل نمی تواند اثرات دما را بر روی حلقه های هیستریزس SMA در نظر بگیرد و می توان فرض کرد که مدل، پیش بینی حلقه ها در یک دمای ثابت است. علاوه بر این، دامنه و فرکانس بارهای چرخه ای که در رفتار SMA ها موثر است، در مدل مورد بحث نادیده گرفته می شود.



شکل ۲: خروجی مدل گریسر و کوزارلی برای الف) یک SMA فوق ارتجاعی و ب) یک SMA مارتنزیتی [۲۵]

#### ۴- میرایی SMA های حافظه شکلی

ویژگی اصلی مصالح با رفتار نیرو تغییرشکل غیرخطی، توانایی استهلاک انرژی ورودی است. SMAها با حلقه‌های بزرگ هیسترتیک قادر به استهلاک انرژی ورودی ارتعاش هستند. با این حال، شکل و مساحت حلقه های هیسترتیزس در SMA های فوق ارتجاعی به خواص بارگذاری چرخه‌ای مانند فرکانس و دامنه، و تغییرات دمای محیط بستگی دارد [۲۷]. با افزایش فرکانس و دامنه تحریک، حلقه های هیسترتیزس باریک‌تر شده و تنش‌های انتقال فاز بزرگتر می‌شوند. اما، SMAهای مارتنسیتی یا همان SMAهای با اثر حافظه شکلی روند متفاوتی دارند، به طوری که برخلاف SMAهای فوق ارتجاعی، ویژگی‌های بارهای چرخه ای اعمالی و تغییرات دما نمی‌توانند شکل حلقه‌های هیسترتیزس را تغییر دهند [۲۸]. این ویژگی بارز SMAهای مارتنسیتی، این امکان را ایجاد می‌نماید که تغییرات میرایی هیسترتیک تولید شده به وسیله یک فنر SMA در برابر تغییرات خواص آن بدون در نظر گرفتن ویژگی‌های بارگذاری دینامیکی بررسی شود. همچنین، محدودیت‌های مدل مورد نظر در این مطالعه که در بخش قبلی به آنها اشاره گردید، با در نظر گرفتن این ویژگی‌های SMAهای مارتنسیتی مرتفع می‌شوند. به این منظور، در ابتدا رابطه میرایی معادل هیسترتیک به شکل زیر تعریف می‌شود [۲۹]:

$$\xi_v = \frac{E_D}{2\pi x_e^2 k_i} \quad (2)$$

که در آن  $\xi_v$  میرایی معادل هیسترتیک،  $E_D$  سطح محصور شده منحنی نیرو جابجایی غیرخطی و  $x_e$  دامنه جابجایی تحریک هستند. در ادامه معادله ۱ با کمی تغییر به صورت زیر بازنویسی می‌گردد:

$$\frac{F}{k_i} = \left[ x - \left| x \right| \left| \frac{F - \beta}{k_i - k_i} \right| \frac{F - \beta}{x_y} \right], \frac{\beta}{k_i} = \alpha \left[ x - \frac{F}{k_i} \right] \quad (3)$$

در معادله ۳،  $f_T$  برابر صفر قرار گرفته است تا اثرات حافظه شکلی مدل‌سازی شود. پارامتر  $x_y$  نشان‌دهنده جابجایی متناظر با انتقال فاز SMA مارتنسیتی است و تاثیرات سختی اولیه ( $k_i$ ) و نیروی انتقال ( $F_y$ ) را به طور همزمان در بر می‌گیرد.

شکل ۳ تغییرات میرایی هیسترتیک یک فنر SMA مارتنسیتی را تحت یک تحریک جابجایی هارمونیک بر حسب  $x_y$  و  $\alpha$  نشان می‌دهد. در این شکل پارامتر  $x_y$  نسبت به دامنه تحریک  $x_e$  بدون بعد شده است. مطابق شکل ۳(الف)، میرایی هیسترتیک به ازای یک مقدار خاص از  $x_y$  بیشینه است و برای مقادیر بیشتر و کمتر از این مقدار میرایی هیسترتیک کاهش می‌یابد. دلیل این موضوع از آنجایی است که به ازای یک مقدار ثابت  $k_t$ ، مقادیر بسیار کم  $x_y$  نیروی انتقال را به حدی کاهش می‌دهد که باعث کوچک شدن سطح حلقه‌های هستیزیس می‌گردد. از سوی دیگر، مقادیر بزرگتر  $x_y$  تغییر شکل را محدود می‌کند و سطح حلقه‌های هستیزیس را کاهش می‌دهد. بنابراین،  $x_y$  یک پارامتر کلیدی است که می‌تواند به طور موثری مقدار میرایی هیسترتیک مورد انتظار را تنظیم کند و در فرآیند بهینه سازی یک میراگر جرمی که مبتنی بر SMA است، باید مقداری بهینه را اختیار کند.

شکل ۳(ب)، یک روند ساده را در مورد پارامتر  $\alpha$  نمایش می‌دهد به این ترتیب که با افزایش آن میرایی هیسترتیک کاهش می‌یابد. همچنین در این شکل مشخص است که در محدوده مقادیر کاربردی  $\alpha$  (کمتر از ۰/۱ مطابق [۲۷]) تغییرات چندانی در مقدار میرایی هیسترتیک ایجاد نمی‌گردد و تاثیر این پارامتر بر میرایی هیسترتیک به اندازه پارامتر  $x_y$  نیست.

## ۵- معادلات دیفرانسیل حاکم بر سازه یک درجه آزادی دارای میراگر جرمی

معادله دیفرانسیل حاکم بر حرکت یک میراگر جرمی خطی معمول که روی یک سازه یک درجه آزادی خطی قرار گرفته و تحت بارگذاری دینامیکی است به شرح زیر است (شکل ۴(ب)):

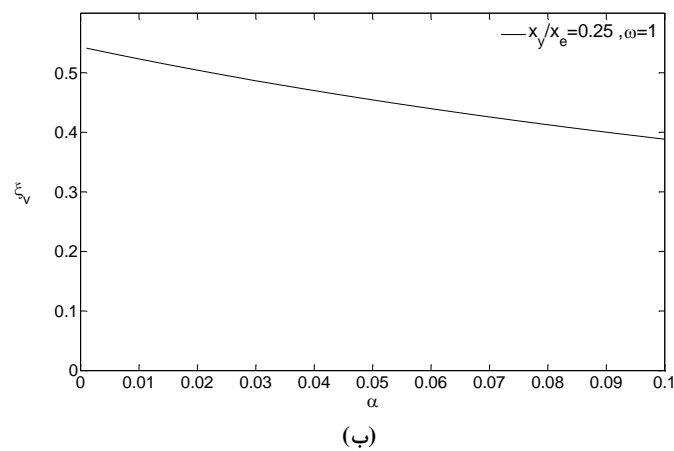
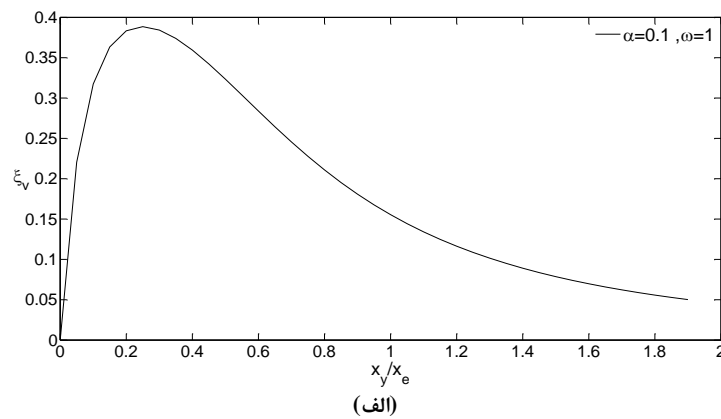
$$\begin{aligned} m\ddot{x}_s + c\dot{x}_s + kx_s + c_t(\dot{x}_s - \dot{x}_t) + k_t(x_s - x_t) &= -m\ddot{u}_g(t) \\ m_t\ddot{x}_t + c_t(\dot{x}_t - \dot{x}_s) + k_t(x_t - x_s) &= -m_t\ddot{u}_g(t) \end{aligned} \quad (۴)$$

که در آن  $x_t$  و  $x_s$  به ترتیب جابجایی‌های سازه و میراگر جرمی،  $m$  جرم سازه اصلی و  $m_t$  جرم میراگر،  $k_t$  و  $c_t$  سختی خطی و ضریب میرایی میراگر ویسکوز و  $\ddot{u}_g(t)$  شتاب تحریک زمین هستند. این مجموعه معادلات دیفرانسیل خطی را می‌توان برای یک میراگر غیرخطی دارای یک فنر SMA مارتنسیتی که روی یک سازه یک درجه آزادی خطی قرار گرفته و تحت بارگذاری دینامیکی است، به صورت زیر نوشت (شکل ۴(الف)):

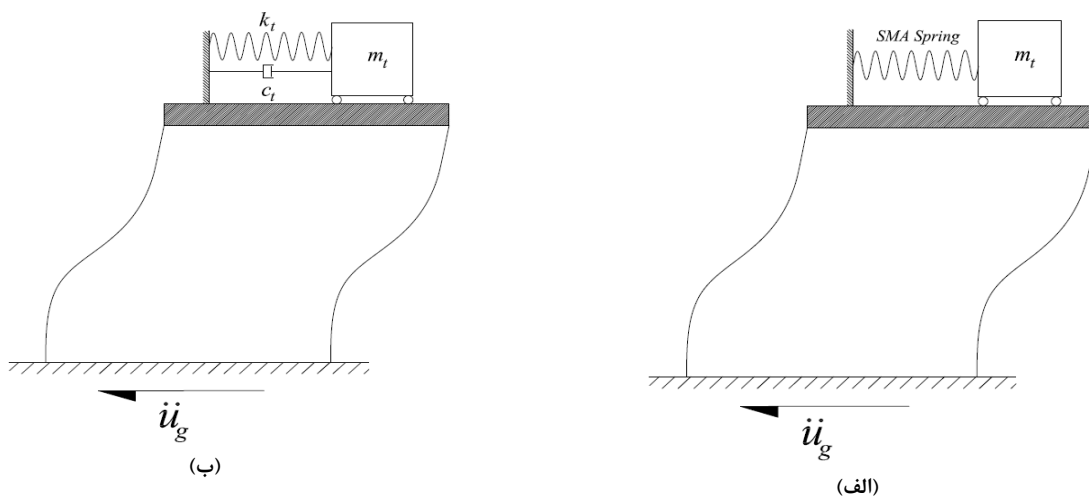
$$\begin{aligned} m\ddot{x}_s + c\dot{x}_s + kx_s - F &= -m\ddot{u}_g(t) \\ m_t\ddot{x}_t + F &= -m_t\ddot{u}_g(t) \\ \dot{F} &= k_i \left[ (\dot{x}_t - \dot{x}_s) - |\dot{x}_t - \dot{x}_s| \left| \frac{F - \beta}{F_y} \right| \left( \frac{F - \beta}{F_y} \right) \right] \\ \beta &= \alpha k_i \left( (x_t - x_s) - \frac{F}{k_i} \right) \end{aligned} \quad (۵)$$

که در آن  $F$  نیروی بازگرداننده فنر SMA است. یادآوری می‌گردد که به منظور مدل‌سازی اثر حافظه شکلی، پارامتر  $f_T$  برابر صفر منظور گردیده است. همچنین در مدل‌سازی‌ها، پارامتر  $n$  برابر ۲ فرض شده است. سیستم معادلات دیفرانسیل غیرخطی به وسیله بردارهای حالت  $(x_s, \dot{x}_s, x_t, \dot{x}_t, x_0)$  به فضای حالت منتقل شده و با استفاده از یک کد کامپیوتری در محیط نرم افزار متلب [۳۰]، انتگرال گیری عددی معادله دیفرانسیل انجام پذیرفته است.





شکل ۳: تغییرات میرایی هیستریتیک فنر SMA با اثر حافظه شکلی (مارتنسیتی) تحت تحریک هارمونیک بر حسب الف)  $x_y$  و ب)  $\alpha$



شکل ۴: نمایش شماتیکی از الف) میراگر جرمی با فنر MSMA و ب) میراگر جرمی خطی، روی سازه یک درجه آزادی

## ۶- تاثیر دامنه و فرکانس بارگذاری بر پاسخ‌های سازه‌ای

در نوسان یک فنر SMA مارتنسیتی با منحنی نیرو تغییر شکل غیر خطی (شکل ۲(ب)) دامنه تحریک به اندازه فرکانس آن یک پارامتر مهم تلقی می‌گردد. با افزایش دامنه تحریک، کاهش تدریجی سختی سکانتی فنر SMA رخ می‌دهد. یکی دیگر از اثرات افزایش دامنه تحریک فنر SMA این است که مساحت محصور شده توسط منحنی نیرو تغییر شکل گسترش می‌یابد که منجر به افزایش میرایی هیسترتیک می‌شود. هر یک از این اثرات، عملکرد یک میراگر جرمی غیرخطی تنظیم شده را به نوعی خاص تغییر می‌دهد، بنابراین رخداد همزمان هر دو مورد یک مسئله پیچیده بوده و نیازمند بررسی بیشتر است. روشی رایج برای بررسی این اثرات، ترسیم منحنی پاسخ فرکانس نوسانگراست. این منحنی برای نوسانگرهای خطی به سادگی و با ثبت بیشینه پاسخ مورد نظر در برابر تغییرات فرکانس تحریک هارمونیک، حاصل می‌شود. با این حال، برای نوسانگرهای غیرخطی، این اتفاق کاملا متفاوت است چرا که پاسخ‌ها به دامنه تحریک و شرایط اولیه نوسان نیز بستگی دارند. پاسخ‌های ناپایدار<sup>۱۲</sup>، دو شاخگی<sup>۱۳</sup> و رژیم‌های مختلف هارمونیک پاسخ‌ها را می‌توان در منحنی پاسخ فرکانس نوسانگرهای غیرخطی مشاهده کرد. از این رو، روش‌های معمول انتگرال‌گیری عددی برای ساختن منحنی پاسخ فرکانس یک نوسانگر غیرخطی نمی‌توانند مورد استفاده قرار گرفته و این منحنی باید با ادامه راه‌حل‌های هارمونیک برای دامنه‌های مختلف تحریک، با روش‌هایی ریاضی موسوم به روش‌های تمديد<sup>۱۴</sup>، به دست آیند [۳۱]. برای انجام چنین تحلیلی در این مقاله از امکانات بسته نرم افزاری MATCONT [۳۲]، از زیر مجموعه بسته‌های نرم افزار متلب، استفاده شده است. به این منظور، در ابتدا معادله ۵ تحت بارگذاری هارمونیک به شکل زیر بی بعد می‌گردد:

$$\ddot{x}_s = -2\xi\dot{x}_s - x_s + x_0 + A \sin(\Omega\tau)$$

$$\ddot{x}_t = \frac{x_0}{\mu_t} + A \sin(\Omega\tau) \quad (۶)$$

$$\dot{x}_0 = \mu_t \Omega_n^2 \left[ (\dot{x}_t - \dot{x}_s) - \left| \dot{x}_t - \dot{x}_s \right| \frac{(1+\alpha)x_0 - \alpha(x_t - x_s)}{x_y} \left| \left( \frac{(1+\alpha)x_0 - \alpha(x_t - x_s)}{x_y} \right) \right| \right]$$

که پارامترهای آن به شرح زیر هستند:

$$\omega_s = \sqrt{\frac{k}{m}}, \quad \xi = \frac{c}{2m\omega_s}, \quad \omega_t = \sqrt{\frac{k_t}{m_t}}, \quad \omega_n = \sqrt{\frac{k_i}{m_t}}, \quad \xi_t = \frac{c_t}{2m_t\omega_t}, \quad \mu_t = \frac{m_t}{m} \quad (۷)$$

$$A = \frac{P_0}{k}, \quad \Omega = \frac{\omega}{\omega_s}, \quad \Omega_t = \frac{\omega_t}{\omega_s}, \quad \Omega_n = \frac{\omega_n}{\omega_s}, \quad x_0 = \frac{F}{k}, \quad x_y = \frac{F_y}{k}, \quad \tau = \frac{t}{\omega_s}$$

در معادلات اخیر  $P_0$  و  $\omega$  به ترتیب دامنه و فرکانس بارگذاری هارمونیک هستند. برای رسم منحنی پاسخ فرکانس سازه اصلی با استفاده از معادلات ۶، ابتدا پاسخ حالت پایدار دستگاه معادلات با شرایط اولیه حالت سکون تعیین شده و سپس این راه حل ادامه می‌یابد. اما قبل از هر گونه اقدام برای حل دستگاه معادلات ۶ نیاز به شناسایی پارامترهای بهینه MSMA-TMD است. این پارامترها باید طوری تعیین شوند تا بیشترین کاهش در پاسخ‌های سازه اولیه به دست آید. در اینجا پارامترهای بهینه میراگرهای جرمی برای به حداقل رساندن جابجایی سازه خطی یک درجه آزادی در تشدید با یک بار هارمونیک از طریق جستجوی مستقیم در یک محدوده تغییرات از پیش تعیین شده به دست می‌آیند. در روش تحلیلی ادامه پاسخ حالت پایا، مقادیر ضریب میرایی سازه ( $\xi$ )، نسبت جرمی میراگر ( $\mu_t$ ) و نسبت سختی پس از انتقال فاز فنر MSMA ( $\alpha$ ) به ترتیب برابر با مقادیر ثابت ۰/۰۲، ۰/۰۲ و ۰/۱ در نظر گرفته شده‌اند. همچنین از آنجایی که فنر

<sup>12</sup>Unstable solution

<sup>13</sup>Bifurcation

<sup>14</sup>Continuation methods

SMA مارتنسیتی حین تحریک دارای رفتار غیرخطی با نسبت سختی پس از انتقال فاز  $\alpha$  است، سختی MSMA-TMD با استفاده از مقدار سختی پس از انتقال فاز فنر MSMA تنظیم می‌شود که به این ترتیب مقدار فرکانس دایره‌ای میراگر در مجموعه روابط ۷ به شکل زیر خواهد بود:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{\alpha k_i}{m_i}} \quad (8)$$

تحریک هارمونیک مورد استفاده در روند بهینه سازی یک بار سینوسی با دامنه ۰/۱ و نسبت فرکانسی ۱ است. محدوده تغییرات پارامترها به همراه گام افزایشی آنها و مقادیر بهینه پارامترهای در جدول ۱ گردآوری شده‌اند. لازم به ذکر است که در روند بهینه‌سازی با جستجوی مستقیم تک‌تک نقاط محدوده‌های تغییراتی تعریف شده باید در یک روند آزمون و خطا مورد بررسی قرار گیرند. با در نظر گرفتن گام افزایشی هر محدوده تغییرات، تنها برای بهینه‌سازی MSMA-TMD تحت یک تحریک خاص، بیش از ۳ میلیون تحلیل انجام شده است. در این جدول محدوده تغییرات برای پارامتر مهم  $x_y$  به صورت نسبتی از دامنه تحریک هارمونیک (۰/۲ تا ۳ برابر A) انتخاب شده است. این محدوده که به صورت تجربی و در پی آزمون و خطاهای متعدد حاصل شده است، به طور قابل توجهی به فرآیند بهینه سازی MSMA-TMD کمک می‌کند و یک محدوده مناسب برای رسیدن به یک مقدار بهینه برای  $x_y$  است.

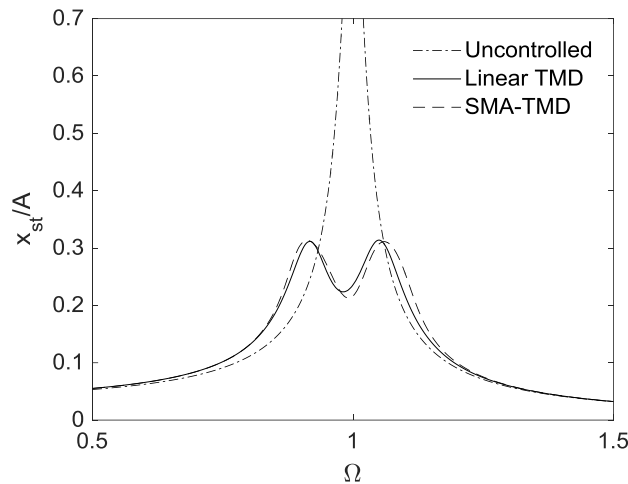
جدول ۱: مقادیر پارامترهای میراگرهای جرمی

محدوده پارامترهای میراگر جرمی خطی: (باگام $\mu_t = 0.01 - 0.1 / 0.01$ )، (باگام $\omega_t = 0.18 - 1 / 0.01$ )، (باگام $\xi_t = 0.02 - 0.24 / 0.01$ )
محدوده پارامترهای MSMA-TMD: (باگام $\mu_t = 0.01 - 0.1 / 0.01$ )، (باگام $\mu_t = 0.01 - 0.1 / 0.01$ )، (باگام $\omega_n = 0.1 - 1 / 0.02$ )، (باگام $\alpha = 0.1$ )، (باگام $x_y = 0.02 - 0.3 / 0.02$ )
مقادیر بهینه میراگر جرمی خطی: $\xi_t = 0.07$ ، $\omega_t = 0.97$ ، $\mu_t = 0.02$
مقادیر بهینه MSMA-TMD: $\mu_t = 0.02$ ، $\omega_n = 0.31$ ، $\alpha = 0.1$ ، $x_y = 0.12$

شکل ۵ منحنی‌های پاسخ فرکانسی را برای پاسخ جابجایی سازه‌های با میراگر جرمی و بدون میراگر جرمی نشان می‌دهد. پاسخ جابجایی کنترل شده سازه اصلی نسبت به دامنه استاتیکی جابجایی سازه بدون کنترل بی بعد شده است. مطابق این شکل میراگر جرمی غیرخطی می‌تواند مانند میراگر جرمی خطی به میزان قابل توجهی پاسخ حالت پایای سازه اولیه را در یک باند فرکانسی در مجاورت فرکانس تشدید کاهش دهد. در این شکل، منحنی‌های پاسخ فرکانسی سازه کنترل شده دو قله با مقادیر پاسخ برابر و نزدیک به پاسخ فرکانس تشدید دارند که نشان می‌دهند، ویژگی‌های میراگرهای جرمی به خوبی تنظیم شده‌اند. این شکل نشان می‌دهد که MSMA-TMD تحت تغییرات فرکانس تحریک روندی مانند میراگرهای جرمی خطی دارد.

شکل ۶ پاسخ فرکانسی جابجایی سازه مجهز به MSMA-TMD را تحت تحریک هارمونیک با دامنه‌های مختلف نشان می‌دهد. دامنه جابجایی ۰/۱ مقداری است که پارامترهای رفتاری میراگر مطابق با آن بهینه شده‌اند. این شکل نشان می‌دهد که MSMA-TMD به ازای دامنه‌های غیر از مقدار ۰/۱ رفتاری غیر بهینه دارد. در دامنه‌های کوچکتر (شکل ۶ الف))، میرایی هیسترتیک MSMA-TMD کاهش می‌یابد و سختی سکانتی آن بیشتر از مقدار سختی موثر بهینه است. از آنجایی که در این دامنه‌ها پاسخ‌های بیشینه معمولاً کمتر از مقادیر طراحی (به ازای دامنه ۰/۱) هستند، رفتار غیر بهینه میراگر با مشکلات جدی همراه نیست. در دامنه‌های بالاتر از دامنه بهینه، سختی سکانتی فنر MSMA کاهش یافته و میرایی هیسترتیک آن افزایش می‌یابد. این امر باعث می‌شود که قله‌های منحنی پاسخ فرکانسی با یکدیگر ادغام شده و در مجاورت فرکانس تشدید پاسخ‌هایی بزرگتر از پاسخ حالت بهینه حاصل گردد. اما، باید توجه داشت که مقدار رشد این پاسخ‌ها با توجه افزایش دامنه تحریک عددی قابل قبول است. از آنجایی که در مقاصد طراحی لرزه‌ای معمولاً دامنه حرکت زمین به صورت شتاب مبنای طرح یا بیشینه شتاب زمین قابل دسترس است، بنابراین، می‌توان پارامترهای بهینه MSMA-TMD را بر مبنای آن تعیین نمود. با مراجعه به شکل ۶ (ب) مشخص است که به ازای ۱/۵ برابر شدن دامنه تحریک میزان کنترل پاسخ‌های حالت تشدید از حدود ۲۲ درصد حالت بهینه به ۳۰ درصد می‌رسد که این رشد مقداری قابل قبول است. باید توجه نمود که افزایش ۱/۵ برابری دامنه

تحریک در طراحی‌های لرزه ای عدد بزرگی است که زلزله سطح طراحی<sup>۱۵</sup> را به بیشینه زلزله محتمل<sup>۱۶</sup> می‌رساند و احتمال وقوع چنین زلزله‌ای بسیار کم است. این ویژگی قابل تامل را می‌توان ناشی از مقدار سختی بالای فنر MSMA و میزان میرایی هیسترتیک قابل توجه آن دانست. با این قابلیت این میراگر می‌تواند حاشیه اطمینان مناسبی را در برابر تغییرات دامنه تحریک ایجاد نماید که همواره به عنوان یک نقص اساسی در کاربرد میراگرهای با سختی غیر خطی مطرح است.



شکل ۵: منحنی پاسخ فرکانسی سازه بدون میراگر جرمی و با میراگرهای جرمی

## ۷- تحریک‌های باند پهن لرزه‌ای

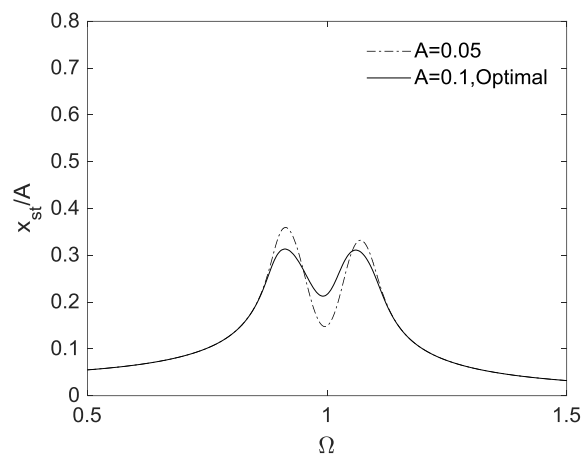
در این بخش عملکرد MSMA-TMD تحت تحریک‌رکوردهای زلزله مورد بررسی قرار می‌گیرد. محتوای فرکانسی و دامنه حرکت زمین بر نیازهای سازه‌ای تأثیر گذارند که این اثرات در مورد سازه‌های غیرخطی برجسته‌تر هستند. از این رو، اطلاع از عملکرد لرزه-ای MSMA-TMD امری ضروری به نظر می‌رسد. تحلیل‌های لرزه‌ای می‌توانند اثربخشی MSMA-TMD را تحت تحریک‌های باند پهن مشخص نمایند. میراگرهای جرمی خطی و غیرخطی برای کنترل پاسخ‌های لرزه‌ای سازه یک‌درجه آزادی با وزن ۱ کیلوگرم و زمان تناوب-های طبیعی بین ۰/۱ تا ۲ ثانیه با گام ۰/۱ ثانیه به کار رفته‌اند. در این تحلیل‌ها نسبت میرایی سازه‌های یک درجه آزادی در محدوده ۲ تا ۶ درصد میرای بحرانی است. به منظور مقایسه عملکرد دو نوع میراگر خطی و غیرخطی، هر میراگر به طور جداگانه با پارامترهای بهینه روی سازه یک‌درجه آزادی تعبیه شده‌اند. پارامترهای بهینه TMDهای خطی و غیرخطی از طریق جستجوی مستقیم در یک محدوده تغییرات از پیش تعریف شده تعیین می‌شوند که در جدول ۱ گزارش شده‌اند.

مطابق جدول ۲، ۷ رکورد زلزله حوزه دور مطابق با پیشنهاد مرجع [۳۳] برای تحلیل‌های لرزه‌ای انتخاب شده‌اند که مشخصات مبسوط این رکوردها در کتابخانه رکوردهای NGA<sup>۱۷</sup> موجود هستند. این رکوردهای زلزله دارای بزرگی ممان بین ۶/۵ تا ۷/۱ هستند. این رکوردها مطابق با جدول ۲ روی بسترهای با شرایط ساختگاهی مختلف ثبت شده‌اند که این امر بر عمومیت نتایج می‌افزاید. با توجه به پارامترهای متعدد مورد بررسی برای بهینه سازی میراگرها مانند بخش قبلی فقط برای یک رکورد زلزله بیش از ۳ میلیون تحلیل لازم است تا پارامترهای بهینه برای میراگر MSMA-TMD حاصل شوند. بنابراین با توجه به حجم بالای تحلیل‌ها بخشی از نتایج این تحلیل‌ها در اینجا گزارش می‌شوند به طوری که دربردارنده روند کلی نتایج این مطالعه هستند. برای هر سازه یک‌درجه آزادی که در این مطالعه مورد بررسی قرار گرفته است، پاسخ نهایی به صورت میانگین پاسخ‌های حاصل از هر رکورد گزارش می‌گردد.

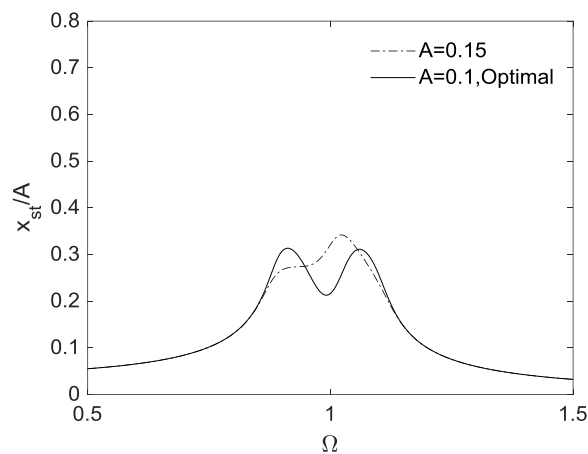
15 Design Based Earthquake

16 Maximum Credible Earthquake

17 Next Generation Attenuation, <http://peer.berkeley.edu/nga>



(الف)



(ب)

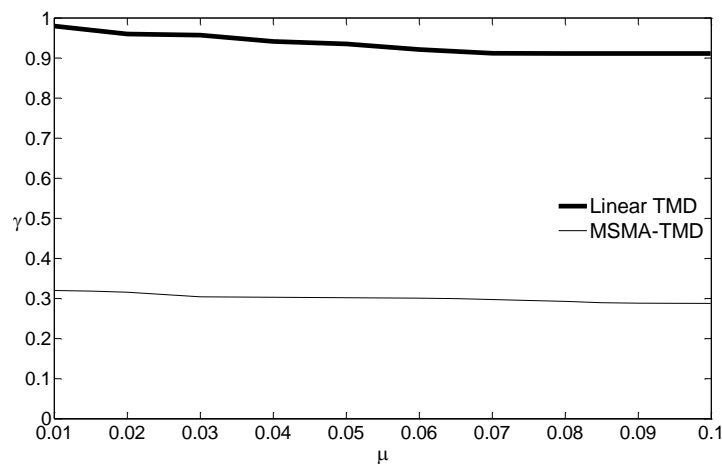
شکل ۶: منحنی پاسخ فرکانسی برای سازه با میراگر جرمی تحت تحریک‌های با دامنه الف) کمتر و ب) بیشتر از دامنه تنظیم شده

جدول ۲: ویژگی‌های رکورد زلزله

Record Number	Year	Earthquake	Magnitude	Station	Geology	Component	PGA	PGD(m)
1	1971	San Fernando	6.5	Pasadena, CIT Athenaeum	Alluvium	0.11	90	0.037
2	1979	Imperial Valley	6.9	Superstition Mountain	Granite	0.2	135	0.12
3	1979	Imperial Valley	6.9	El Centro, Parachute Test Facility	Deep stiff soil	0.2	315	0.45
4	1984	Morgan Hill	6.1	Gilroy #6, San Ysidro Microwave Site	Silty clay over sandstone	0.29	90	0.023
5	1989	Loma Prieta	7.1	South San Francisco, Sierra Point	Rock	0.11	205	0.011
6	1989	Loma Prieta	7.1	Gilroy, Gavilon College Phys. Sch. Bldg.	Terrace deposit over sandstone	0.36	67	0.02
7	1989	Loma Prieta	7.1	Santa Cruz, University of California	Limestone	0.44	360	0.008

شکل ۷ تغییرات نسبت فرکانسی TMD ها را برحسب نسبت جرمی نشان می‌دهد. در این شکل نسبت فرکانسی میراگر غیرخطی مانند نسبت فرکانسی میراگر خطی با افزایش نسبت جرمی کاهش می‌یابد. لازم به یادآوری است که در عملکرد میراگر جرمی نسبت جرمی

بالتر می‌تواند به میزان قابل توجهی پاسخ‌های سازه اصلی را کاهش دهد. این امر با توجه به اختلاف فازی که در کنترل نوسان مورد نیاز است امری بدیهی است. اما با توجه به محدودیت‌هایی که برای استفاده از نسبت‌های جرمی بالا مورد نیاز است، همواره سعی می‌شود تا مقداری بهینه برای آن تعیین گردد. در مورد میرایی میراگرهای جرمی نیز باید چنین مقدار بهینه‌ای تعیین شود. همانطور که در بخش‌های قبلی اشاره گردید در میراگر MSMA-TMD نیروی انتقال فاز (یا تغییر شکل انتقال فاز) میزان میرایی فنر MSMA را کنترل می‌نماید. بنابراین نقش نیروی انتقال فاز در این میراگر معادل با نقش نسبت میرایی در میراگر جرمی خطی است. در همین راستا شکل ۸ تغییرات پاسخ جابجایی کنترل شده را بر حسب میزان میرایی میراگرها نشان می‌دهد. در این شکل پاسخ جابجایی کنترل شده سازه نسبت به پاسخ جابجایی سازه بدون حضور میراگر ( $p_{st}$ ) بدون بعد شده است. همانگونه که در شکل مشخص است در یک مقدار خاص از نیروی انتقال فاز کمترین پاسخ جابجایی در سازه اصلی حاصل می‌شود. همین روند در مورد نسبت میرایی میراگر جرمی خطی نیز قابل ملاحظه است. این موضوع موید این مطلب است که نیروی انتقال فاز نقش کنترل کننده میرایی را دارد و باید مقداری بهینه را اختیار کند. همچنین در شکل ۸ منحنی‌ها برای نسبت جرمی مختلف رسم شده‌اند. ملاحظه می‌گردد که با افزایش نسبت جرمی میزان نیروی انتقال فاز کاهش می‌یابد. لازم به ذکر است کاهش اندازه نیروی انتقال فاز معادل افزایش میرایی است.

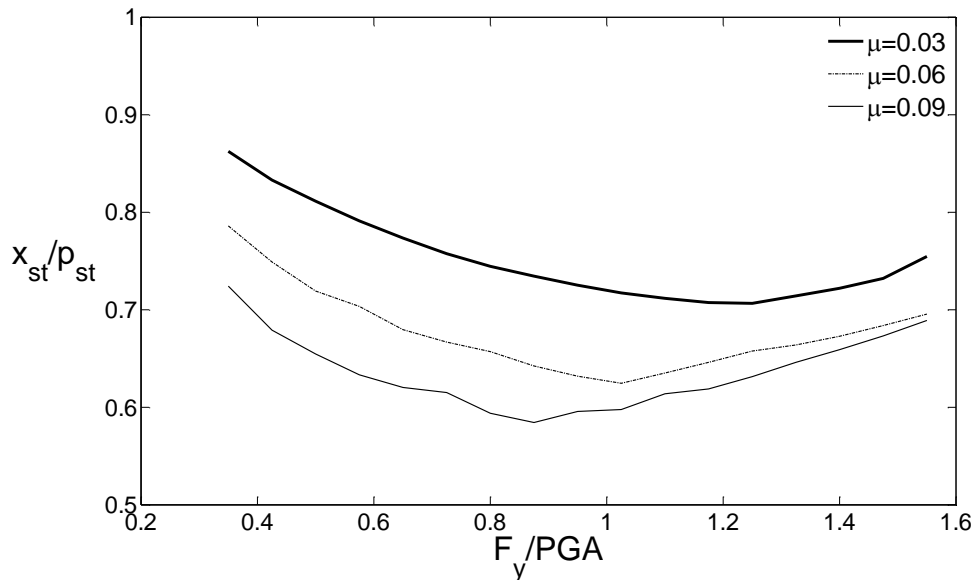


شکل ۷: تغییرات نسبت فرکانسی MSMA و میراگر جرمی خطی بر حسب نسبت جرمی برای سازه با زمان تناوب ۰/۴ ثانیه

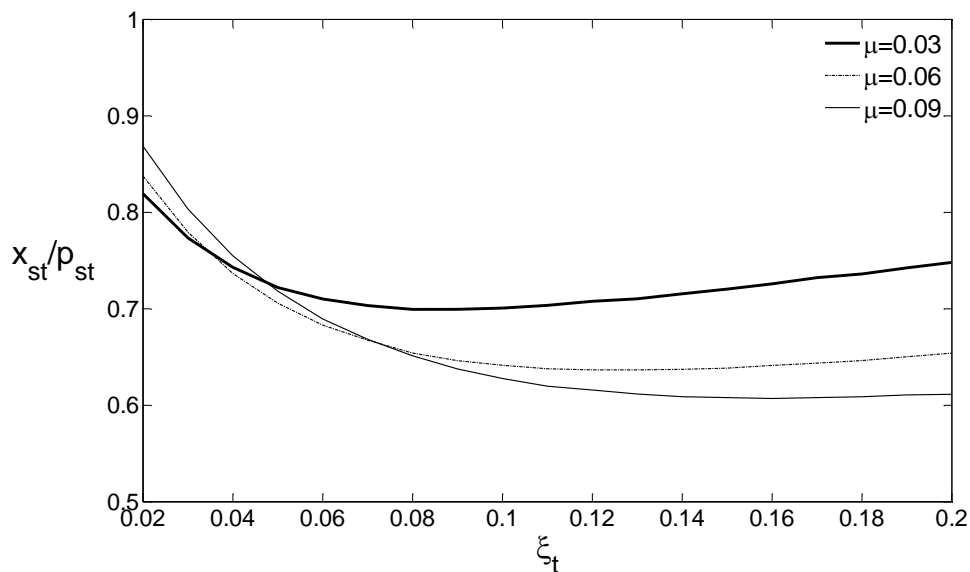
در واقع، ایده اصلی کاربرد میرایی هیسترتیک در میراگر جرمی این است که می‌تواند عملکرد آنرا تحت تحریک‌های باند پهن بهبود بخشد. برای بررسی این موضوع می‌توان اثرات MSMA-TMD را بر نیازهای لرزه‌ای سازه‌ها مورد ارزیابی قرار داد. شکل ۹ تاریخچه زمانی جابجایی سازه یک‌درجه آزادی را با زمان تناوب ۱/۵ و نسبت میرایی ۰/۰۲ نشان می‌دهد که تحت تحریک زلزله‌های حوزه دور است. این شکل جابجایی هر دو سازه بدون میراگر و با میراگر را نمایش می‌دهد. برای وضوح بیشتر این اشکال، بخشی از تاریخچه زمانی با بیشترین میزان نوسان نشان داده شده است که در آن جابجایی سازه به صورت نسبتی از جابجایی زمین (PGD) گزارش شده است. همانگونه که دیده می‌شود، هر دو میراگر خطی و MSMA-TMD موجب کاهش جابجایی سازه می‌شوند که بیشترین کاهش نیز در مورد جابجایی بیشینه اتفاق می‌افتد. متوسط‌ترین کاهش به ترتیب بیش از ۴۰ و ۵۰ درصد برای میراگر جرمی خطی و MSMA-TMD است، که بیانگر رفتار بهتر میراگر غیر خطی است.

دلیل اصلی عملکرد بهتر MSMA-TMD را باید به حضور میرایی غیر خطی ناشی از فنر MSMA نسبت داد. همانگونه که بیان گردید میرایی هیسترتیک در میراگر غیرخطی با افزایش جابجایی فنر MSMA افزایش می‌یابد و رویه اعمال این میرایی با آنچه در مورد میراگرهای ویسکوز معمول اتفاق می‌افتد متفاوت است. در میراگرهای ویسکوز، با توجه به نرخ بالای اعمال بار، تمامی میرایی موثر می‌تواند در کسری از ثانیه اعمال شود. در واقع این شرایط معادل این است که فرض شود، در تمام لحظات اعمال تحریک، میراگر با سطح ثابتی از میرایی عمل می‌کند. در مقابل میرایی هیسترتیک MSMA-TMD به طور تدریجی تا مقدار بهینه خود افزایش می‌یابد. هنگامی که جرم میراگر به سمت دامنه جابجایی خود در حرکت است، با افزایش تغییر شکل فنر، میرایی هیسترتیک آن نیز افزایش می‌یابد. این موضوع

باعث می‌شود که جابجایی‌های بزرگتری برای جرم میراگر رخ دهد و بتواند انرژی بیشتری را از سازه اصلی جذب نماید. باید توجه داشت که حضور کل میرایی بهینه در تمامی لحظات تحریک باعث کاهش جابجایی جرم سازه شده و جریان انرژی نوسانی را از سازه اصلی به سمت میراگر کاهش می‌دهد. این موضوع با نتیجه بررسی‌های [۹] در بررسی میراگرهای نیمه فعال مطابقت دارد و دلیل تاثیر بهتر حضور میرایی هیسترتیک را نسبت به میرایی ویسکوز توجیه می‌نماید.

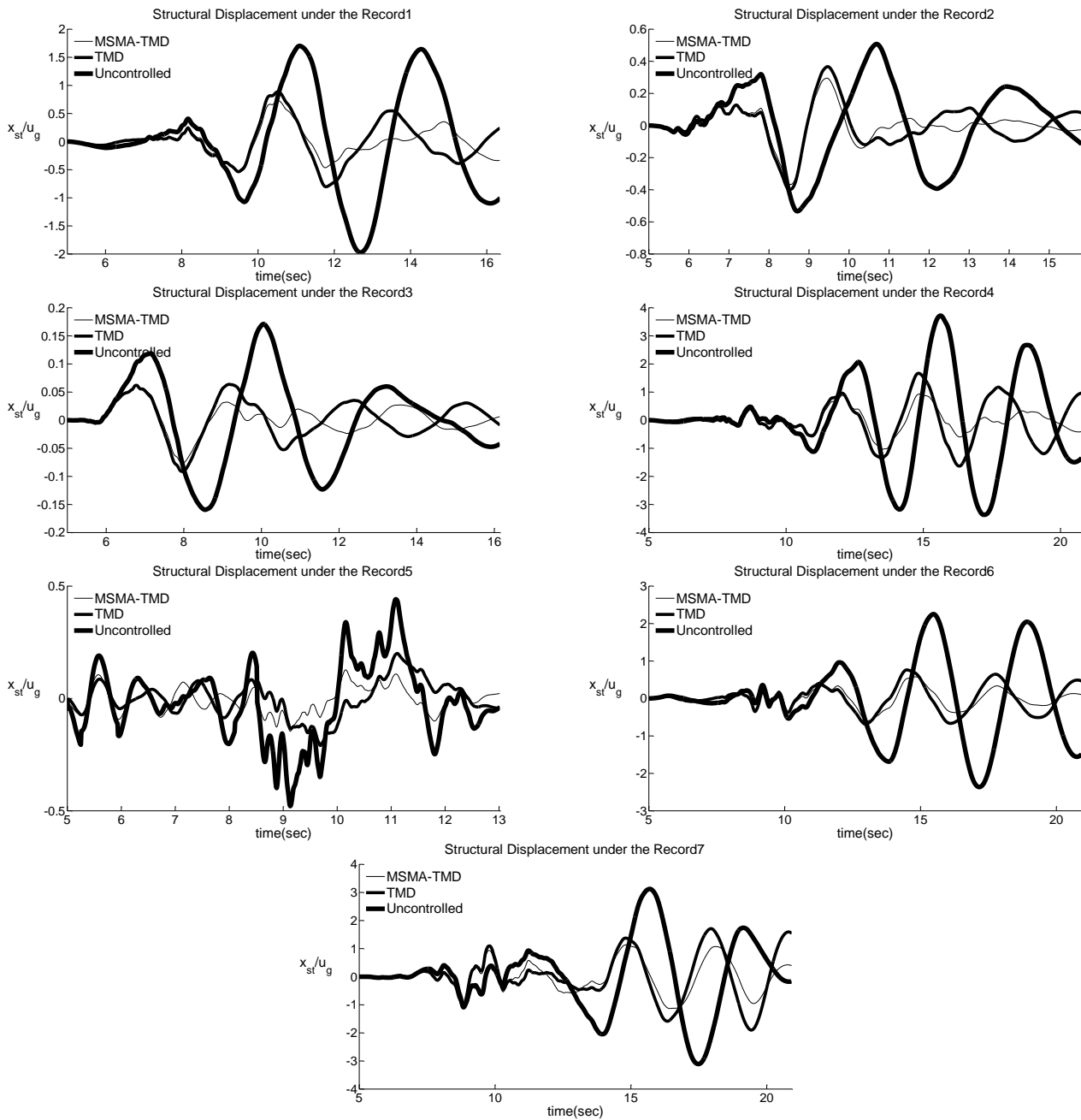


(الف)



(ب)

شکل ۸: تغییرات پاسخ جابجایی کنترل شده بر حسب الف) میرایی هیسترتیک میراگر جرمی غیرخطی ب) میرایی ویسکوز میراگر جرمی خطی برای سازه با زمان تناوب ۰/۸ ثانیه



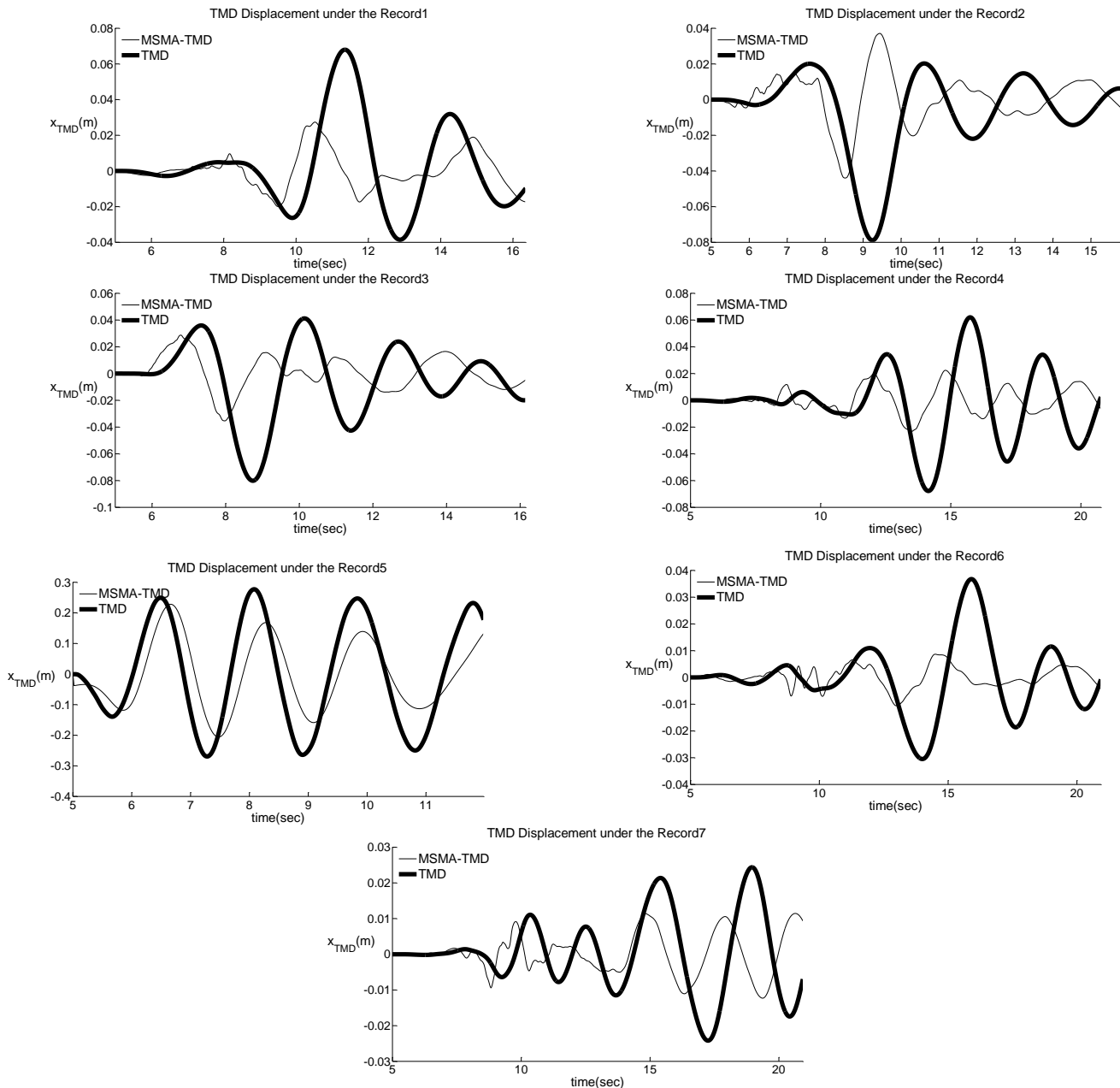
شکل ۹: تاریخچه زمانی پاسخ جابجایی سازه یک درجه آزادی با زمان تناوب ۱/۵ ثانیه تحت رکوردهای حوزه دور

شکل ۱۰ تاریخچه جابجایی میراگرهای جرمی را تحت زلزله‌های مختلف حوزه دور نشان می‌دهد. جابجایی جرم میراگر که در مراجع به عنوان ضربه میراگر<sup>۱۸</sup> از آن یاد می‌شود، پارامتر عملکردی مهمی در به کارگیری میراگر جرمی محسوب می‌شود. در استفاده‌های واقعی، گاهی محدودیت فضا در مقایسه با جابجایی میراگر به عنوان یکی از قیدهای بهینه‌سازی مطرح می‌گردد. مطابق شکل ۱۱، جابجایی MSMA-TMD کمتر از جابجایی میراگر جرمی خطی است. این کاهش در مورد رکوردهای مختلف متفاوت است به طوری که، در مواردی جابجایی به نصف کاهش می‌یابد. این پیشرفت در مورد MSMA-TMD را می‌توان به سختی اولیه بزرگ فنر MSMA نسبت داد. باید توجه

<sup>18</sup>Damper stroke



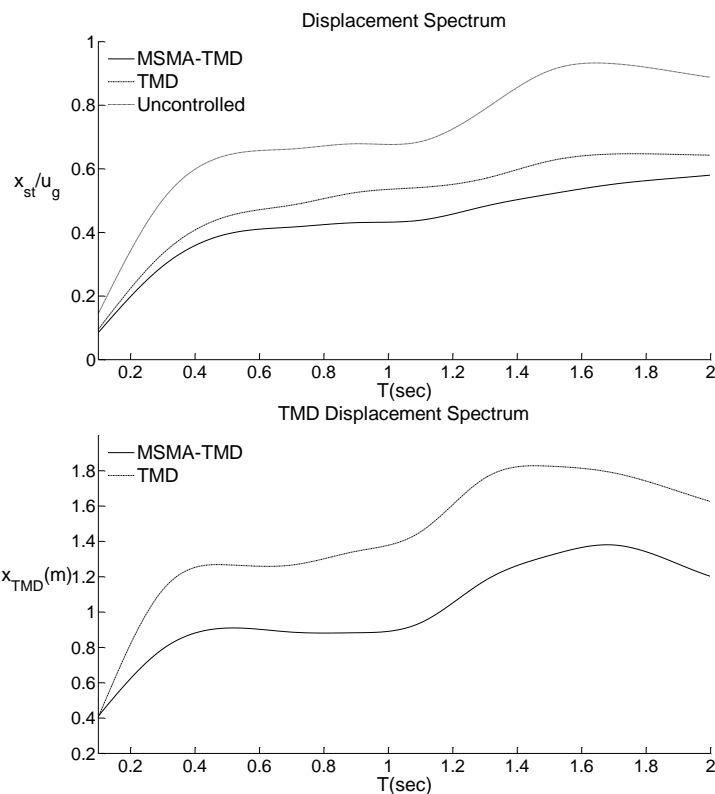
داشت که جابجایی کوچکتر MSMA-TMD میرایی هیسترتیک آن را تحت الشعاع قرار نمی‌دهد و منافاتی با توضیحات قبلی، در مورد توانایی جذب انرژی جرم میراگر ندارد.



شکل ۱۰: تاریخچه زمانی جابجایی میراگر نسبت به سازه یک‌درجه آزادی با زمان تناوب ۱/۵ ثانیه تحت رکوردهای حوزه دور

در واقع، میراگر باید به مقدار میرایی بهینه خود برسد و برای این منظور باید سطح معینی از تغییرشکل در آن رخ دهد. افزایش سختی، جابجایی و در پی آن، میرایی هیسترتیک را محدود می‌کند. بنابراین سختی میراگر، جابجایی میراگر را محدود به مقدار بهینه آن می‌کند که این مقدار از مقدار بهینه مورد نیاز میراگر جرمی خطی کمتر است. در همین راستا، لازم به توجه است که سختی و میرایی هیسترتیک در این میراگر، در دو نقطه مقابل قرار دارند و بهینه‌سازی این دو تا حد زیادی به انتخاب مقداری مناسب برای  $F_y$  بستگی دارد.

به عنوان بررسی دیگری بر عملکرد MSMA-TMD، پاسخ‌های آن تحت تغییرات زمان تناوب سازه‌ای مورد بررسی قرار می‌گیرند. شکل ۱۱ پاسخ جابجایی سازه‌ای میانگین را تحت هفت رکورد زلزله، به صورت یک طیف جابجایی ترسیم می‌کند. مطابق این شکل عملکرد بهتر MSMA-TMD نسبت به میراگر خطی در تناوب‌های مختلف مشهود است. در این شکل دیده می‌شود که شیب منحنی در زمان‌های تناوب کمتر از ۰/۵ ثانیه تندتر است. این مورد را می‌توان به عنوان تأثیر بیشتر تناوب‌های سازه‌ای کوچکتر بر عملکرد میراگرهای جرمی تلقی نمود، در حالی که، به ازای مقادیر بزرگتر منحنی‌ها دارای شیب کمتری هستند.



شکل ۱۱: طیف پاسخ جابجایی سازه یک‌درجه آزادی و جابجایی میراگر نسبت به سازه تحت رکوردهای حوزه دور

## ۸- نتیجه گیری

در این مقاله به معرفی یک میراگر جرمی با نام MSMA-TMD، با استفاده از آلیاژهای هوشمند حافظه شکلی پرداخته شده و پارامترهای موثر بر میرایی هیسترتیک این میراگر، بررسی شدند. همچنین، از آنجایی که پاسخ‌های یک نوسانگر غیرخطی علاوه بر فرکانس، به دامنه تحریک ورودی نیز بستگی دارند، منحنی‌های پاسخ فرکانسی MSMA-TMD از طریق ادامه راه‌حل‌های متناوب تحت تغییرات فرکانس و دامنه تحریک ترسیم گردیدند. در نهایت نیز، عملکرد این میراگر جرمی غیر خطی در مقایسه با میراگر جرمی خطی معمولی، تحت تحریک‌های لرزه‌ای، مورد ارزیابی قرار گرفتند.

از نسبت فرکانسی و مقدار نیروی انتقال فاز، می‌توان به عنوان مهمترین پارامترهای رفتاری MSMA-TMD، نام برد. طبق بررسی‌های انجام شده، نسبت فرکانسی این میراگر مانند نسبت فرکانسی میراگر جرمی خطی باید مقداری بهینه را اختیار کند، تا میراگر کنترلی موثر بر سازه اعمال نماید. همچنین، نیروی انتقال فاز فنر MSMA نقش مهمی در موازنه بین مقدار میرایی هیسترتیک و سختی اولیه فنر دارد که در روند بهینه‌سازی این میراگر نیاز به توجهی ویژه دارد. از سویی دیگر، منحنی‌های پاسخ فرکانسی MSMA-TMD نشان دادند که این میراگر می‌تواند، تحت تغییرات ویژگی‌های بارگذاری، از جمله دامنه، کنترل قابل قبولی بر سازه تحت کنترل اعمال نماید. در گروه دیگری از تحلیل‌ها برای به دست آوردن پاسخ‌های بیشینه که خواسته اکثر کدهای لرزه‌ای است، مجموعه‌ای شامل هفت زمین لرزه

حوزه دور برای تحریک مدل‌های سازه‌ای استفاده شدند و طی تحلیل‌هایی متعدد، اثرات کنترلی MSMA-TMD مورد بررسی قرار گرفتند. یافته‌های این تحلیل‌ها حاکی از عملکرد برتر MSMA-TMD هستند که دلیل آن، افزایش تدریجی میرایی هیسترتیک در این میراگر است. علاوه بر این، مقدار سختی اولیه بالای MSMA-TMD باعث کاهش جابجایی جرمین میراگر، نسبت به جابجایی جرم میراگر خطی می‌گردد.

## مراجع

- [1] Bekdas, G. and Nigdeli, S. M. (2011). Estimating optimum parameters of tuned mass dampers using harmony search. *Engineering Structures*, 33, 16–23.
- [2] Mohebbi, M. and Joghatai, A. (2012). Designing optimal tuned mass dampers for nonlinear frames by distributed genetic algorithms. *Structural Design of Tall and Special Buildings*, 21, 57–76.
- [3] Soheili, S. and Farshidianfar, A. (2013). Ant colony optimization of tuned mass dampers for earthquake oscillations of high-rise structures including soil–structure interaction. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 51, 14–22.
- [4] Özsariyildiz S. S. and Bozer A. (2015). Finding optimal parameters of tuned mass dampers. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 24(6), 461–475.
- [5] Bekdas, G. and Nigdeli, S. M. (2017). Metaheuristic based optimization of tuned mass dampers under earthquake excitation by considering soil-structure interaction. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 92, 443–462.
- [6] Casciati, F. and Giuliani, F. (2009). Performance of multi-TMD in the towers of suspension bridges. *Journal of Vibration and Control*, 15, 821–47.
- [7] Rahman, M. S., Hassan M. K. and Chung, S. (2017). Adaptive multiple tuned mass dampers based on modal parameters for earthquake response reduction in multi-story buildings. *Advances in Structural Engineering*, 20(9), 1375–1389.
- [8] Li, C. and Cao, B. (2015). Hybrid active tuned mass dampers for structures under the ground acceleration. *Structural Control and Health Monitoring*, 22(4), 757–773.
- [9] Sun, C. and Nagarajaiah, S. (2014). Study on semi-active tuned mass damper with variable damping and stiffness under seismic excitations. *Structural Control and Health Monitoring*, 21, 890–906.
- [10] Lacarbonara, W. and Vestroni, F. (2002). Feasibility of a vibration absorber based on hysteresis. *Proceedings of the Third World Congress on Structural Control*, Como, Italy.
- [11] Rudinger, F. (2006). Optimal vibration absorber with nonlinear viscous power law damping and white noise excitation. *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, 132, 46–53.
- [12] Chung, L., Wu, L., Huang, H. H., Chang, C. H. and Lien, K. H. (2009). Optimal design theories of tuned mass damper with nonlinear viscous damping. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 8, 547–60.
- [13] Eason, R. P., Sun, C., Dick, A. J. and Nagarajaiah, S. Attenuation of a linear oscillator using a nonlinear and a semi-active tuned mass damper in series. *Journal of Sound and Vibration*, 332(1), 154–166.
- [14] Bhowmick, S. and Mishra, S. K. (2014). Shape Memory Alloy-Tuned Mass Damper (SMA-TMD) for Seismic Vibration Control. *Advances in Structural Engineering*, DOI: 10.1007/978-81-322-2193-7\_108.
- [15] Huang, Haoyu., Chang, Wen-Shao. and Mosalam, Khalid. M. (2016). Feasibility of shape memory alloy in a tuneable mass damper to reduce excessive in-service vibration. *Structural Control and Health monitoring*, DOI: 10.1002/stc.1858.
- [16] Sarawate, N. N. and Dapino, M. J. (2009). Dynamic sensing behavior of ferromagnetic shape memory Ni–Mn–Ga. *Smart Material and Structures*, 18(10), 104014(6pp).
- [17] Savi, M. A., Paula, A. S. D. and Lagoudas, D. C. (2011). Numerical Investigation of an Adaptive Vibration Absorber Using Shape Memory Alloys. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 22(1), 67–80.
- [18] Jose, S., Chakraborty, G. and Bhattacharyya, R. (2017). Coupled thermo-mechanical analysis of a vibration isolator made of shape memory alloy. *International Journal of Solids and Structures*, DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2017.03.001.
- [19] Nayfeh, A. H. and Mook, D. T. (1995). *Nonlinear oscillations*, New York, John Wiley & Sons, Inc.
- [20] Gendelman, O., Gourdon, E. and Lamarque, C. (2006). Quasi-periodic energy pumping in coupled oscillators under periodic forcing. *Journal of Sound and Vibration*, 294 (4–5), 651–662.
- [21] Starosvetsky, Y. and Gendelman, O. (2009). Vibration absorption in systems with a nonlinear energy sink, nonlinear damping. *Journal of Sound and Vibration*, 324(3–5), 916–939.
- [22] Sun, C., Eason, R. P., Nagarajaiah, S. and Dick, A. J. (2013). Hardening Duffing oscillator attenuation using a nonlinear TMD, a semi-active TMD and multiple TMD. *Journal of Sound and Vibration*, 332, 674–686.
- [23] Carpineto, N., Lacarbonara, W. and Vestroni, F. (2014). Hysteretic tuned mass dampers for structural vibration mitigation. *Journal of Sound and Vibration*, 333(5), 1302–1318.
- [24] Ozbulut, O. E., Hurlbaus, S. and Desroches, R. (2011). Seismic Response Control Using Shape Memory Alloys, A Review. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 22, 1531–1549.
- [25] Graesser, E. J. and Cozzarelli, F. A. (1994). A proposed three-dimensional constitutive model for shape memory alloys. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 5, 78–89.

- [26] Wen, Y. K. (1980). Equivalent linearization for hysteretic systems under random excitation. *Journal of Applied Mechanics*, 47, 150–154.
- [27] Dolce, M. and Cardone, D. (2001). Mechanical behavior of shape memory alloys for seismic applications 2. Austenite NiTi wires subjected to tension. *International Journal of Mechanical Sciences*, 43:2657–2677.
- [28] Motahari, S. A. and Ghassemieh, M. (2007). Multilinear one-dimensional shape memory material model for use in structural engineering applications. *Engineering Structures*, 29: 904–913.
- [29] Chopra, A. K. (2007). *Dynamics of structures Theory and Applications to Earthquake Engineering, 3d Edition*. New York, prentice Hall
- [30] MATLAB and Statistics Toolbox (2012), the Math Works, Inc., Natick, Massachusetts, United States.
- [31] Lacarbonara, W. and Vestroni, F. (2003). Nonclassical responses of oscillators with hysteresis. *Nonlinear Dynamics*, 32:235–258.
- [32] Dhooge, A., Govaerts, W. and Kuznetsov, Y. A. (2003). MATCONT: A MATLAB package for numerical bifurcation analysis of ODEs. *ACM Transaction of Mathematical Software*, 29, 141–164.
- [33] Federal Emergency Management Agency (FEMA) (2005). Improvement of nonlinear static seismic analysis procedure. Report FEMA 440, Washington, DC.