



Application of a New Model for Magnetorheological Damper and Investigation of Its Effectiveness in Vertical Mass Isolated Structures

Mohamad Shahrokh Abdi *

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

Masoud Nekooei

Associate Professor, Department of Civil Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

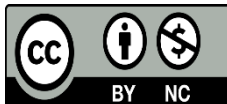
shahrokh.abdi@iau.ac.ir

Keywords

MR damper, nonlinear, convergence, seismic control, displacement.

Abstract

Due to the controllability of magneto-rheological (MR) damper, the application of these dampers in seismic control of structures has been considered. One of the challenges of modeling these dampers is their complex nonlinear behavior. Using existing parametric models for these dampers in seismic analysis of structures, causes divergence issues and requires more time to analyze the structures. In this research, a velocity and displacement-based nonlinear polynomial model for MR damper is presented. The proposed model is a four-state model and is based on experimental results. The current is considered as a control parameter to provide the controllability of this model. Finally, to evaluate the efficiency of the proposed model, its application in the seismic control of vertical mass isolated structures is investigated. The results indicate the high accuracy of the model for calculating the damper force and reduce the required time for analysis of the structure. Moreover, the convergence issues are removed using this model.



This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

(این نشریه تحت قانون بین المللی کپی رایت Creative Commons: BY-NC می باشد).

* Corresponding Author

کاربرد یک مدل جدید برای میراگر مگنتورئولوژیک و بررسی کارایی آن در کنترل لرزه‌ای سازه‌های جداسازی شده به روش جرمی قائم

محمد شاهرخ عبدی*

استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد سنندج، دانشگاه آزاد اسلامی، سنندج، ایران

مسعود نکویی

دانشیار، گروه مهندسی عمران، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

shahrokh.abdi@iau.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۰۸ اسفند ۱۴۰۳

تاریخ دریافت: ۱۹ آذر ۱۴۰۳

چکیده

میراگرهای مگنتورئولوژیک (MR) به دلیل قابلیت کنترل شونده، با استقبال خاصی در بحث کنترل لرزه‌ای سازه‌ها مواجه شده است. یکی از چالش‌های مدل‌سازی این میراگرها رفتار غیرخطی پیچیده آنها می‌باشد. استفاده از مدل‌های پارامتری موجود برای این میراگرها در تحلیل لرزه‌ای سازه باعث ایجاد مشکلات و اگرایی در نتایج می‌شود که حل این موضوع نیازمند صرف زمان بیشتر برای آنالیز سازه‌ها می‌باشد. در این تحقیق یک مدل چند جمله‌ای غیرخطی وابسته به سرعت و جابجایی برای میراگر MR ارائه شده است. مدل پیشنهادی، یک مدل چهار ناحیه‌ای بوده و براساس نتایج آزمایشگاهی بدست آمده است. برای ارائه قابلیت کنترل شونده میراگر در مدل مذکور، پارامتری با عنوان جریان ورودی به میراگر در نظر گرفته شده است. در نهایت برای بررسی کارایی مدل پیشنهادی، استفاده از آن در بحث کنترل لرزه‌ای سازه‌های جداسازی شده به روش جرمی قائم مورد بررسی قرار گرفت. نتایج بررسی‌ها حاکی از دقت بالای مدل برای محاسبه نیروی میراگر بوده، که سبب کاهش زمان تحلیل سازه و حذف مشکل و اگرایی نتایج تحلیل‌ها با استفاده از مدل مذکور می‌باشد.

واژگان کلیدی: میراگر مگنتورئولوژیک، غیرخطی، همگرایی، کنترل لرزه‌ای، جابجایی.



مقدمه

کنترل لرزه‌ای سازه‌ها در اثر نیروهای ناشی از زلزله، همواره به عنوان یکی از مهمترین مسائل در حوزه مهندسی سازه محسوب می‌شود. در رابطه با تجهیزات و روش‌های کنترل لرزه‌ای سازه‌ها سه دسته‌بندی وجود دارد. دسته اول تجهیزات غیرفعال می‌باشند که غیرقابل کنترل بوده و احتیاجی به برق ندارند. دسته دوم، تجهیزات فعال می‌باشند که قابل کنترل بوده اما جهت انجام فعالیت، نیازمند مقدار قابل توجهی برق می‌باشند. دسته سوم از این وسایل، تجهیزات نیمه‌فعال می‌باشند. این دسته، دارای خصوصیت‌های ترکیبی از تجهیزات غیرفعال و فعال می‌باشند بدین معنی که قابل کنترل بوده ولی نیازمند مقدار برق بسیار کمی جهت انجام فعالیت خود می‌باشند. میراگرهای مگنوتورولوژیک^۱ نوعی از تجهیزات نیمه‌فعال در حوزه کنترل لرزه‌ای سازه‌ها می‌باشند که به دلیل کارایی بالای خود، رواج زیادی در صنعت مقاوم‌سازی سازه‌ها پیدا کرده است [۱].

سیالات قابل کنترل، به موادی اطلاق می‌شوند که با تغییر در رفتار رئولوژی خودشان، به میدان الکتریکی یا مغناطیسی اعمال شده، واکنش نشان می‌دهند [۲]. سیال مگنوتورولوژیک یک نوع از سیالات قابل کنترل می‌باشد که به صورت ترکیبی از یک مایع و ذرات با اندازه میکرون بوده که قابلیت تغییر با شرایط مغناطیسی را دارا می‌باشند. زمانی که این سیال در معرض میدان مغناطیسی قرار می‌گیرد، ذرات مذکور، به صورت زنجیره‌وار در جهت میدان مغناطیسی آرایش پیدا کرده و سبب افزایش ویسکوزیته سیال می‌شوند. این موضوع سبب می‌شود که سیال از حالت مایع به حالت نیمه جامد (خمیری) تبدیل شود. بعد از حذف اثر میدان مغناطیسی، سیال دوباره به حالت مایع برمی‌گردد [۳]. یکی از مثال‌های موفق در زمینه کاربرد این نوع از سیالات، استفاده کاربردی از آنها در میراگرهای مگنوتورولوژیک می‌باشد. این نوع از میراگرها، کاربرد وسیعی در کنترل لرزه‌ای سازه‌ها و صنعت داشته و توانایی کاربرد در کنترل‌های نیمه فعال و فعال سازه‌ها را دارا می‌باشند. تغییر خصوصیات میرایی، تطبیق با نیروی وارده و توانایی تولید دامنه وسیعی از نیروهای کنترلی، از جمله عواملی می‌باشد که کاربرد این میراگرها را توجیه پذیر می‌کند [۴].

استن وی و همکاران^۲ یک مدل دو المانی را با نام مدل بینگهام برای بیان رفتار میراگرهای الکترورئولوژیک پیشنهاد دادند [۵، ۶]. مدل مذکور شامل یک المان اصطکاکی کولمب بوده که به صورت موازی با یک میراگر ویسکوز قرار گرفته است. نتایج بررسی‌های ایشان نشان

داد که مدل پیشنهادی برای محدوده فشار میدان جریان 1 kV/mm تا 2 kV/mm معتبر است. گاموتا و فلیسکو^۳ در سال ۱۹۹۱ یک مدل سه قسمتی را برای بیان رفتار میراگر ER ارائه دادند [۷]. مدل مذکور شامل یک المان زینر بوده که به صورت سری با ترکیب موازی المان اصطکاکی و میراگر ویسکوز قرار گرفته است. این مدل به تغییرات میدان الکتریکی حساس بوده و به خوبی تغییرات رفتار از محدوده ویسکوالاستیک به ویسکوالاستیک-پلاستیک را بیان می‌کند. لی و همکاران^۴ در سال ۲۰۰۰، یک مدل دو قسمتی را برای محدوده رفتاری قبل و بعد از تسلیم، برای میراگر MR ارائه دادند [۸]. مدل مذکور در ناحیه قبل از تسلیم دارای رفتار ویسکو-الاستیک و در ناحیه بعد از تسلیم دارای رفتار ویسکو-پلاستیک است. یکی از متدهایی که برای بیان رفتار هیستریزس سیستم‌ها به کار می‌رود مدل بوکون^۵ است [۹]. این مدل براساس فرمول بندی بردار مارکو و روش حل گالرکین ارائه شده است. یکی دیگر از مدل‌هایی که به بیان رفتار میراگرهای MR می‌پردازد، مدل بوکون است که شامل المانی برای بیان رفتار هیستریزس میراگر است. این مدل شامل سه مؤلفه (المان) هیستریزس، فنر و میراگر ویسکوز می‌باشد [۱۰]. در سال ۱۹۹۷، اسپنسر و همکاران^۶، مدل توسعه یافته‌ای از مدل بوکون را برای بیان رفتار میراگر MR ارائه دادند [۱۰]. این مدل با اضافه کردن یک میراگر به صورت سری به مدل بوکون و اضافه کردن یک فنر به صورت موازی به مجموعه جدید، برای بیان بهتر و دقیقتر رفتار میراگر در سرعت‌های نزدیک به صفر، بدست آمد. سونگ و همکاران در سال ۲۰۰۵ از یک مدل ناپارامتری برای بیان رفتار میراگرهای MR استفاده کردند [۱۱]. در این مدل از یک تابع چندجمله‌ای برای بیان جذب انرژی و از یک تابع تانژانت هیپربولیک برای نشان دادن شکل تیز در منحنی نیرو-سرعت میراگر استفاده شده است. باجکوفسکی و همکاران^۷ در سال ۲۰۰۸، یک مدل جرمی متمرکز را برای میراگر MR پیشنهاد دادند [۱۲]. مدل مذکور تغییرات دما و اصطکاک را در بیان رفتار میراگر MR در نظر می‌گیرد. در این مدل سرعت و اصطکاک به صورت توابعی از تغییرات دما و جریان وارده تعریف شده است. مترد و همکاران^۸ در سال ۲۰۱۰ از مدل شبکه عصبی پیشرو و پسرو برای مدل‌سازی رفتار دینامیکی مستقیم و معکوس میراگرهای MR استفاده کردند [۱۳]. آموزش و صحت سنجی مدل شبکه عصبی مورد استفاده در تحقیقات ایشان براساس داده‌های حاصل از نتایج

³ Gamota and Filisko

⁴ Li et al.

⁵ Bouc Wen Model

⁶ Spencer et al.

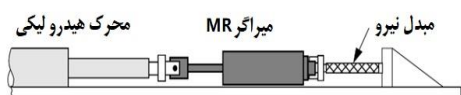
⁷ Bajkowski et al.

⁸ Metered et al.

¹ Magnetorheological damper

² Stanway et al.

این میراگر ۳۰۰۰ نیوتن بوده و حداکثر تغییرات آن در بازه دمایی ۴۰- تا ۱۵۰ سانتیگراد، کمتر از ۱۰ درصد است. سیال MR مورد استفاده دارای ذرات آهن در اندازه‌های میکرونی بوده که به صورت تصادفی در روغن هیدروکربنی قرار گرفته است. این ترکیب دارای مواد اضافی بوده که از ته‌نشینی ذرات جلوگیری کرده و سبب افزایش همگنی آنها می‌شود. چگالی سیال مذکور $3/28 \text{ g/cm}^3$ است. حداکثر توان مورد نیاز برای میراگر کمتر از ۱۰ وات بوده و ولتاژ ورودی قابل اعمال به آن صفر تا ۳ ولت می‌باشد. شکل (۱) نحوه انجام تست میراگر MR را نشان می‌دهد [۱۰]. هنگامی که سیال در معرض میدان مغناطیسی قرار می‌گیرند، ذرات آهنی که در سراسر سیال پراکنده شده‌اند، دوقطبی‌های مغناطیسی را تشکیل می‌دهند. این دوقطبی‌های مغناطیسی، خود را در امتداد خطوط شار مغناطیسی قرار می‌دهند. زمانی که حداقل ولتاژ به میراگر اعمال شود، کمترین ظرفیت نیرویی تولید خواهد شد و هنگامی که ماکزیمم ولتاژ اعمال شود، بیشترین ظرفیت نیرویی تولید می‌شود.



شکل ۱- نحوه انجام تست میراگر MR در آزمایشگاه [۱۰]

میراگر مورد استفاده در این تحقیق تحت بارگذاری سینوسی با فرکانس‌های ۱/۲۵، ۲/۵۰ و ۵/۱۰۰ هرتز با ماکزیمم دامنه نوسان ۱/۵۰ سانتی‌متر قرار گرفته است. برای بررسی اثر جریان ورودی بر عملکرد میراگر، آزمایشات براساس ولتاژهای اعمالی، ۰/۱۰، ۰/۷۵، ۱/۵۰ و ۲/۲۵ ولت انجام شده است [۱۰].

۳- مدل پیشنهادی:

در این مرحله به تعریف مدل پیشنهادی برای میراگر MR می‌پردازیم. برای این منظور در ابتدا با استفاده از نتایج تست‌های آزمایشگاهی میراگر مذکور، منحنی‌های نیرو-سرعت و نیرو-جابجایی میراگر براساس بارگذاری‌های توضیح داده شده در مرحله معرفی مدل آزمایشگاهی، بدست آمد. هدف اصلی مدل پیشنهادی، ارائه رابطه‌ای مناسب مابین سرعت و جابجایی اعمالی به میراگر و نیروی تولیدی توسط آن است. برای نیل به این مقصود، براساس شکل (۲)، روابط مربوط به این مدل در چهار ناحیه به شرح زیر مطابق رابطه (۱) تعریف می‌شود:

تست‌های آزمایشگاهی میراگر MR انجام شده است. یانگ و همکاران^۱ در سال ۲۰۱۳، یک مدل هیستریزس غیرخطی را برای بیان رفتار میراگر MR ارائه دادند [۱۴]. برای این منظور در ابتدا منحنی‌های نیرو-جابجایی و نیرو-سرعت برای جریان‌های ورودی مختلف براساس نتایج آزمایشگاهی بدست آمد. در ادامه با استفاده از یکسری توابع چند جمله‌ای، پارامترهای مدل بدست آمد. ماتیل و همکاران^۲ در سال ۲۰۱۵ از یک مدل چند جمله‌ای درجه پایین برای مدلسازی میراگر MR استفاده کردند [۱۵]. مدل مذکور، یک مدل دوقسمتی بوده که انتخاب رابطه هر قسمت وابسته به تغییرات سرعت میراگر می‌باشد. ایشان برای بدست آوردن پارامترهای مدل پیشنهادی از نتایج تست‌های آزمایشگاهی میراگر MR استفاده کردند. یو و همکاران^۳ در سال ۲۰۱۷، یک مدل جدید را برای میراگر MR براساس تقسیم منحنی هیستریزس نیرو-سرعت ارائه دادند [۱۶]. در این تحقیق، منحنی هیستریزس مذکور، به دو منحنی فوقانی و تحتانی تقسیم شده و از توابع نمایی برای مدلسازی این دو منحنی استفاده شده است. رحمت و همکاران^۴ در سال ۲۰۲۰ از یک روش سریع برای مدلسازی برای بیان رفتار میراگر MR تحت اثر بارهای ضربه‌ای استفاده کردند [۱۷]. ایشان با استفاده از روش استنتاج تطبیقی عصبی-فازی و با کمک نتایج تست‌های آزمایشگاهی به پیش بینی رفتار میراگر MR پرداختند.

یکی از چالش‌های مدلسازی میراگرهای MR رفتار غیرخطی پیچیده آنها می‌باشد. استفاده از مدل‌های پارامتری موجود برای این میراگرها در تحلیل لرزه‌ای سازه باعث ایجاد مشکلات واگرایی در نتایج می‌شود که حل این موضوع نیازمند صرف زمان بیشتر برای آنالیز سازه‌ها می‌باشد. در این تحقیق یک مدل چند جمله‌ای غیرخطی وابسته به سرعت و جابجایی برای میراگر MR براساس نتایج تحقیقات آزمایشگاهی اسپنسر و همکاران^۵ در سال ۱۹۹۷ [۱۰]، ارائه شده است.

۲- مدلسازی آزمایشگاهی:

در این قسمت به معرفی میراگر مورد استفاده در تحقیقات اسپنسر و همکاران^۵ در سال ۱۹۹۷ [۱۰] و نتایج حاصله پرداخته می‌شود. میراگر مورد استفاده یک میراگر روزنه ثابت بوده که با سیال مگنتورئولوژیک پر شده است. سیال مورد استفاده در این میراگر دارای فرمول بندی اختصاصی بوده و مربوط به شرکت لرد بوده که نام تجاری این سیال VersaFlo™ MRX-135GD است. ماکزیمم نیروی تولیدی توسط

¹ Yang et al.

² Montiel at al.

³ Yu et al.

⁴ Rahmat et al.

⁵ Spencer et al.

(۱)

$$F_j = \sum_{i=1}^n (a_{0j} + (a_{ij} + b_{ij} \times I) \times D^i + (c_{ij} + d_{ij} \times I) \times V^i)$$

رابطه ارائه شده در چهار ناحیه بر اساس علامت تغییرات جابجایی و تغییرات سرعت میراگر تعریف می‌شود. در روابط فوق، پارامترهای به کاررفته به شرح زیر می‌باشند:

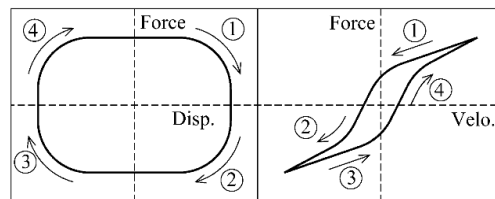
F_j : نیروی میراگر MR در ناحیه j برحسب نیوتن

D : جابجایی میراگر برحسب سانتی‌متر

V : سرعت میراگر برحسب سانتی‌متر بر ثانیه

I : ولتاژ (جریان) اعمالی به میراگر

a, b, c, d : پارامترهایی ارائه شده در جدول‌های (۱) تا (۳)



شکل ۲- نواحی تعریف شده برای مدل پیشنهادی

ناحیه اول: در این ناحیه تغییرات جابجایی میراگر مثبت بوده ولی

تغییرات سرعت اعمالی به میراگر منفی است. ($dD \geq 0; dV \leq 0$)

ناحیه دوم: در این ناحیه تغییرات جابجایی و تغییرات سرعت اعمالی به

میراگر منفی است. ($dD \leq 0; dV \leq 0$)

ناحیه سوم: در این ناحیه تغییرات جابجایی میراگر منفی بوده ولی

تغییرات سرعت اعمالی به میراگر مثبت است. ($dD \leq 0; dV \geq 0$)

ناحیه چهارم: در این ناحیه تغییرات جابجایی و تغییرات سرعت اعمالی

به میراگر مثبت است. ($dD \geq 0; dV \geq 0$)

جدول ۱- ضرایب رابطه پیشنهادی برای میراگر MR برای نیروی سینوسی ۱/۲۵ هرتز

ناحیه	a_0	a_1	b_1	a_2	b_2	c_1	d_1	c_2	d_2
1	658.31	78.78	-274.30	-4467.12	1506.45	48.89	206.95	-73.58	-21.55
2	-184.24	239.81	20.49	-125.02	753.98	155.12	347.70	39.50	66.37
3	-491.09	158.17	187.56	1923.77	-176.86	43.48	194.65	35.36	21.00
4	-223.11	154.48	-137.71	727.78	-906.26	150.96	282.08	-24.10	-44.05

جدول ۲- ضرایب رابطه پیشنهادی برای میراگر MR برای نیروی سینوسی ۲/۵۰ هرتز

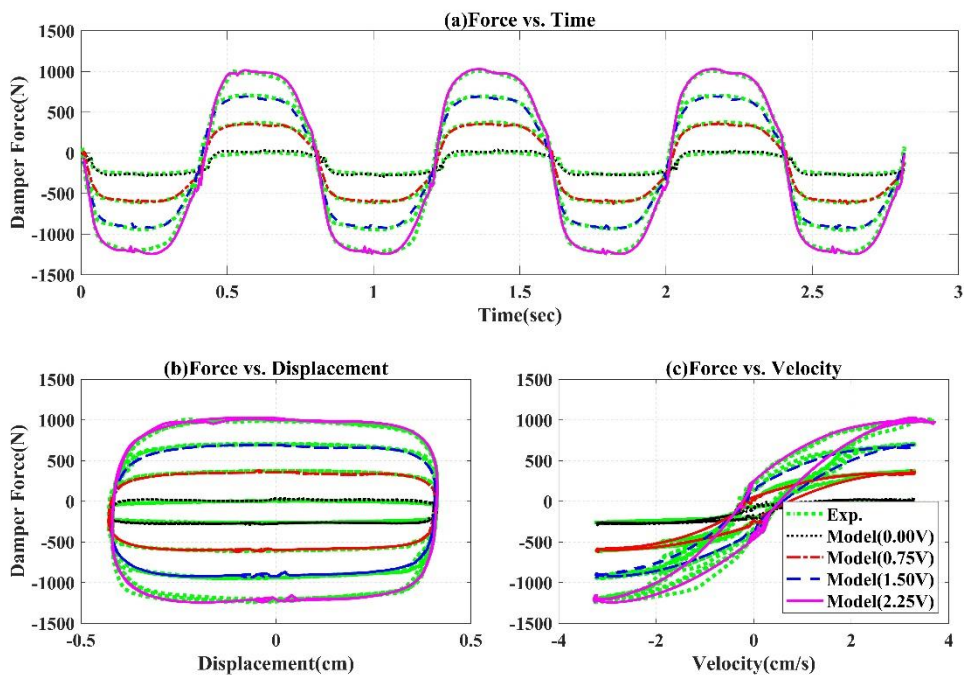
ناحیه	a_0	a_1	b_1	a_2	b_2	c_1	d_1	c_2	d_2
1	-262.50	-147.93	-690.70	1463.60	2889.30	46.22	135.27	0.19	-8.37
2	375.41	-136.91	654.60	-2571.03	-975.50	88.90	216.62	-1.93	21.12
3	435.49	293.76	200.22	-2942.08	-634.30	43.48	100.29	-9.09	4.98
4	-696.31	-34.03	638.52	3077.87	460.29	87.23	244.47	3.32	-24.74

جدول ۳- ضرایب رابطه پیشنهادی برای میراگر MR برای نیروی سینوسی ۵/۰۰ هرتز

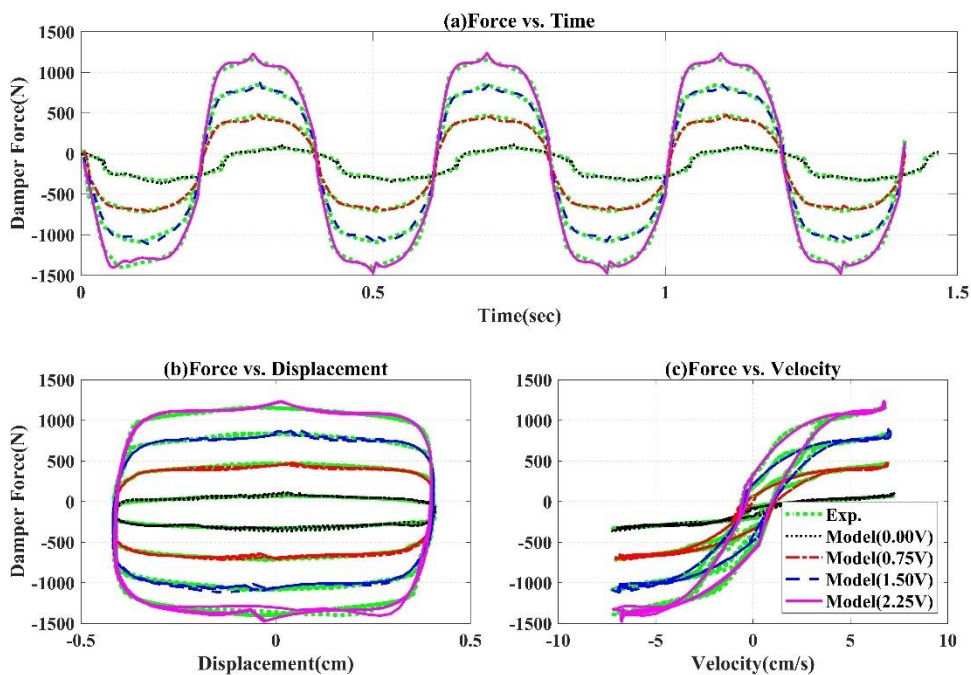
ناحیه	a_0	a_1	b_1	a_2	b_2	c_1	d_1	c_2	d_2
1	156.97	-538.11	-310.41	-234.66	2515.98	28.93	60.81	-1.85	-1.61
2	279.33	-87.08	719.31	-2784.93	-882.84	43.82	149.83	-1.31	9.14
3	-721.94	118.44	496.59	4384.86	-379.08	32.19	50.88	4.75	1.43
4	-275.21	-47.42	905.62	1306.99	-18.28	28.20	203.77	0.63	-13.48

بررسی‌های حاکی از دقت بالای ۹۹ درصد مدل پیشنهادی در تولید نیروی میراگر می‌باشد.

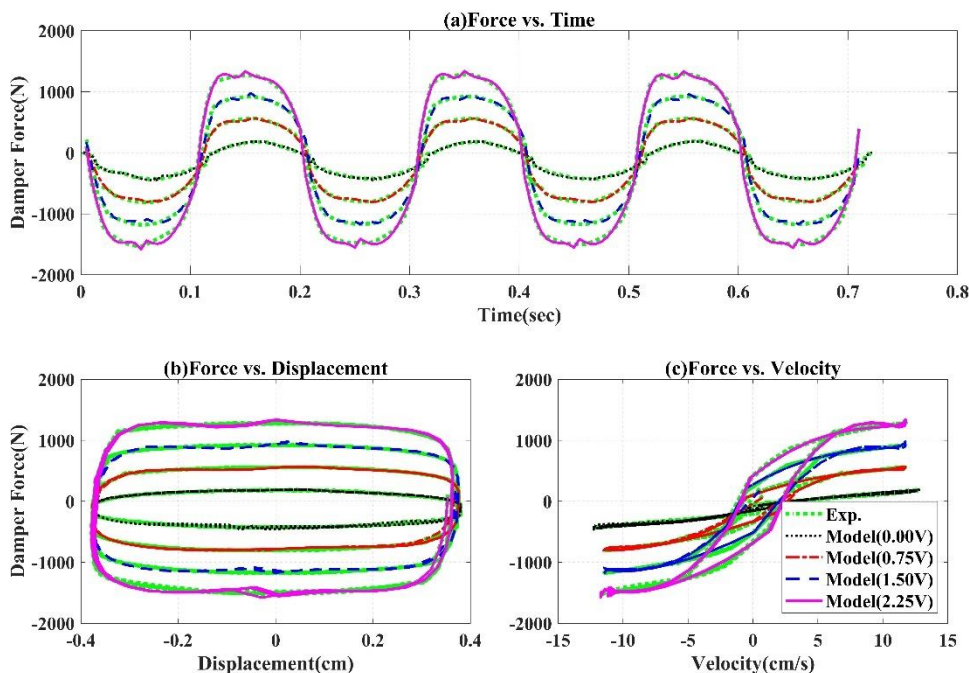
برای بررسی دقت مدل پیشنهادی، نتایج نیروهای تولیدی توسط میراگر با استفاده از مدل پیشنهادی و نتایج تست‌های آزمایشگاهی در شکل‌های (۳) تا (۵) نشان داده شده است.



شکل ۳- مقایسه نتایج رابطه پیشنهادی با نتایج آزمایشگاهی برای نیروی سینوسی ۱/۲۵ هرتز



شکل ۴- مقایسه نتایج رابطه پیشنهادی با نتایج آزمایشگاهی برای نیروی سینوسی ۲/۵۰ هرتز



شکل ۵- مقایسه نتایج رابطه پیشنهادی با نتایج آزمایشگاهی برای نیروی سینوسی ۵/۰۰ هرتز

یک سازه نرم به خود گرفته و از منطقه رزونانس دور شود. نکته قابل توجه و اما مهم در این موضوع، کنترل پاسخهای لرزه‌ای زیرسیستم جرمی است که توسط ارتباط آن با زیرسیستم سختی که به وسیله میراگرهای رابط تأمین می‌شود، حاصل خواهد شد. شکل (۶) نحوه استفاده از روش VMI را در کنترل سازه نشان می‌دهد. برای توضیحات بیشتر در خصوص روش VMI به مقاله‌های تحقیقاتی [۱]، [۱۸]، [۱۹]، [۲۰]، [۲۱]، [۲۲] و [۲۳] مراجعه شود.

رفتار میراگر مورد استفاده در این سازه‌ها با استفاده از مدل بوکون^۲ اصلاح شده و مدل پیشنهادی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. برای دستیابی به این موضوع ابتدا پارامترهای مدل پیشنهادی برای میراگر MR با ظرفیت ۱۰۰ تن که در مطالعات اوز و هادی^۳ در سال ۲۰۱۴ مورد استفاده قرار گرفته، بدست آمد. جدول (۴) پارامترهای مدل بوکون اصلاح شده برای میراگر با ظرفیت ۱۰۰ تن را نشان می‌دهد. پارامترهای مدل پیشنهادی نیز برای این میراگر، در جدول (۵) ارائه شده است.

۴- کاربرد مدل پیشنهادی در سازه‌های جداسازی شده:

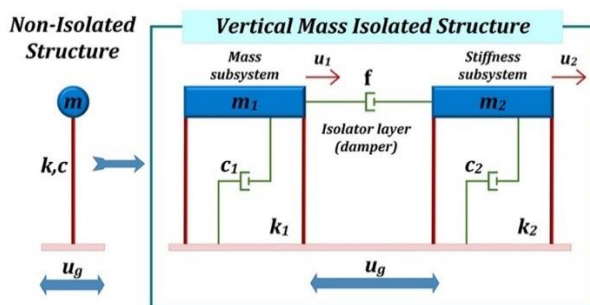
جهت بررسی کارایی عملی مدل پیشنهادی برای میراگر MR، استفاده از میراگر با رابطه مذکور به عنوان لایه جداساز در سازه‌های جداسازی شده به روش جرمی قائم مورد بررسی قرار می‌گیرد. در ادامه توضیح مختصری در رابطه با روش جداسازی جرمی قائم ارائه شده و نحوه استفاده از میراگر MR در این سازه‌ها توضیح داده می‌شود.

روش جداسازی جرمی قائم^۱ که به اختصار VMI نامیده می‌شود، به‌عنوان یکی از روش‌های کنترل لرزه‌ای سازه‌ها توسط نکویی و ضیایی فر مطرح گردید [۱۸]. در این روش سازه اصلی به دو زیرسیستم جرمی و سختی تقسیم می‌شود و ارتباط بین این دو زیرسیستم توسط یک لایه جداساز که همان میراگر است، برقرار می‌شود. فلسفه اصلی این روش استفاده از اصل انتقال پریودیک به‌عنوان یک راهکار در جهت کاهش پاسخهای لرزه‌ای سازه است. در این روش قسمت اعظم جرم سازه در زیرسیستم جرمی متمرکز می‌شود. با این حال، این زیرسیستم درصد کمی از سختی سازه اصلی را در برمی‌گیرد. برخلاف زیرسیستم جرمی، زیرسیستم سختی دارای درصد کمی از جرم سازه و درصد اعظم سختی سازه است. استفاده از این روش جداسازی سبب می‌شود زیرسیستم جرمی رفتاری همانند

² Bouc Wen Model

³ Uz and Hadi

¹ Vertical Mass Isolation



شکل ۶- ساختار روش جداسازی جرمی قائم [۱۹]

جدول ۴- پارامترهای مدل بوکون^۱ اصلاح شده [۲۴]

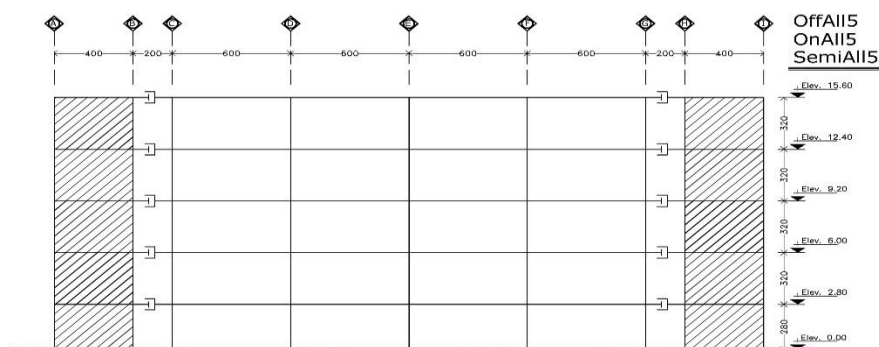
پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
C_{0a}	50.30 kN.s/m	α_a	8.70 kN/m
C_{0b}	48.70 kN.s/m/V	α_b	6.40 kN/m/V
k_0	0.0054 kN/m	γ	496 m ⁻²
C_{1a}	8106.2 kN.s/m	β	496 m ⁻²
C_{1b}	7807.9 kN.s/m/V	A	810.50
k_1	0.0087 kN/m	n	2
x_0	0.18 m	η	195 s ⁻¹

جدول ۵- ضرایب مدل پیشنهادی برای میراگر MR با ظرفیت ۱۰۰ تن

d_2	c_2	d_1	c_1	b_2	a_2	b_1	a_1	a_0	ناحیه
-1141.24	28048.81	516.82	578.51	76423.05	795661.85	-1374.74	-1065.31	-650.09	1
-1221.79	-10402.53	530.62	516.32	-30313.04	-260014.57	5.74	2.08	202.76	2
1141.65	-28064.70	516.76	578.40	-76427.66	-796082.47	-1374.70	-1065.37	650.46	3
1142.65	4394.85	492.34	504.83	4425.62	94978.62	797.14	599.04	-72.49	4

¹ Bouc Wen Model

سازه مورد بررسی در این تحقیق، یک قاب دو بعدی ۵ طبقه بوده که سیستم باربر جانبی آن از نوع دیوار برشی بتن آرمه به همراه قاب خمشی بتن آرمه ویژه می باشد. مشخصات این سازه در جدول (۶) ارائه شده است. شکل (۷) نیز نحوه قرارگیری زیرسیستمها و میراگرها را در این سازه نشان می دهد. برای تحریک لرزه‌ای این سازه، زلزله طیس در سال ۱۹۷۸ با شماره



شکل ۷- مدل جداسازی شده سازه ۵ طبقه با میراگر در تمامی طبقات

جدول ۶- مقادیر جرم، سختی و ضرایب جداسازی برای هر طبقه از سازه ST-۰۵

شماره طبقه	m_1 (ton)	k_1 (kN/m)	m_2 (ton)	k_2 (kN/m)	m_3 (ton)	k_3 (kN/m)	جرم کل (ton)	k (kN/m)
1	54.70	992063.49	195.00	124121.31	54.70	992063.49	304.40	2108248.29
2	56.30	364582.03	206.46	48626.45	56.30	364582.03	319.06	777790.51
3	56.30	227272.73	206.46	44224.58	56.30	227272.73	319.06	498770.03
4	56.30	148809.52	206.46	44010.76	56.30	148809.52	319.06	341629.81
5	52.62	77735.54	205.18	42536.03	52.62	77735.54	310.42	198007.12

حداکثر میراگر استفاده می شود و در صورتی که خلاف موضوع فوق اتفاق بیافتد از ولتاژ حداقل برای ایجاد نیروی میراگر حداقل استفاده می شود. براین اساس در زمان اعمال بار لرزه‌ای، میراگر در ابتدا براساس حداقل ظرفیت خود در مدار کنترلی سازه فعالیت می کند. ادامه فعالیت میراگر و میزان نیروی تولیدی آن وابسته به شرایط ایجاد شده بود که مطابق استراتژی مذکور، انجام می پذیرد. این نتایج بیانگر دقت بسیار مناسب مدل پیشنهادی در بیان رفتار میراگر MR تحت مسائل عملی می باشد.

نتایج برش پایه سازه‌های جداسازی شده جرمی قائم با استفاده از میراگر MR، براساس مدک بوکون^۱ اصلاح شده و مدل پیشنهادی در سه حالت کنترلی غیرفعال خاموش^۲، غیرفعال روشن^۳ و نیمه فعال^۴ برای میراگر MR در شکل های (۸) تا (۱۰) ارائه شده است. لازم به ذکر است حداقل و حداکثر ولتاژ قابل اعمال به میراگر مورد استفاده به ترتیب صفر و ۹ ولت می باشد. برای تعیین میزان ولتاژ ورودی به میراگر در روش کنترلی نیمه فعال از استراتژی کنترلی اسکای هوک روشن-خاموش^۵ استفاده شده است [۲۶]. مبنای کار این روش کنترلی به این شرح است که چنانچه جهت نیروی میراگر خلاف جهت حرکت زیرسیستم جرمی باشد، از ولتاژ حداکثر برای ایجاد نیروی

¹ Bouc Wen Model

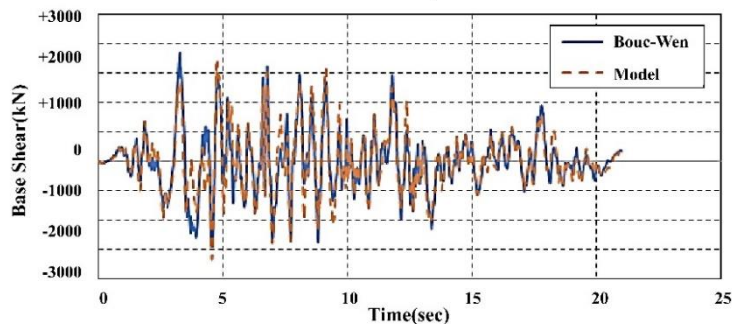
² Passive-Off

³ Passive-On

⁴ Semi-Active

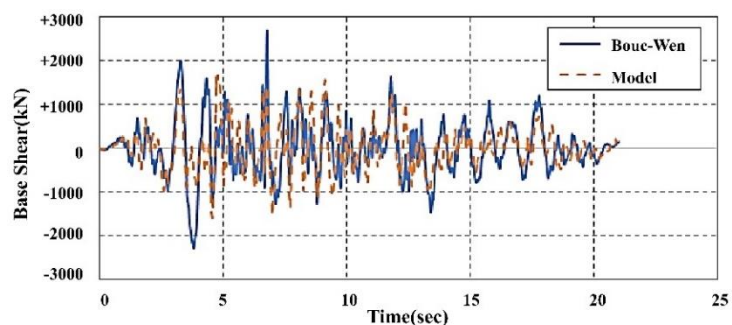
⁵ Sky-Hook On/Off

Total Base Shear: ST-5, Passive-off



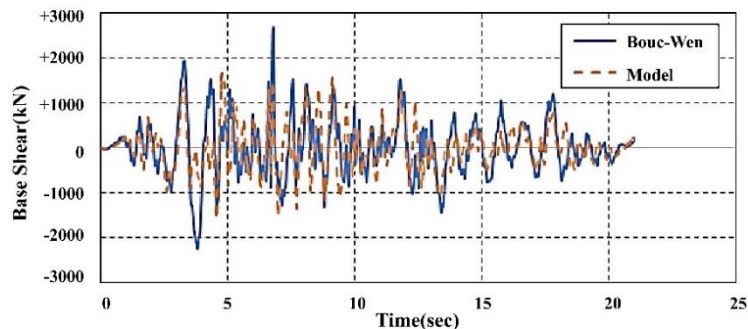
شکل ۸- برش پایه سازه جداسازی شده با استفاده از میراگر MR تحت الگوریتم کنترلی Passive-Off

Total Base Shear: ST-5, Passive-on



شکل ۹- برش پایه سازه جداسازی شده با استفاده از میراگر MR تحت الگوریتم کنترلی Passive-On

Total Base Shear: ST-5, Semi-Active



شکل ۱۰- برش پایه سازه جداسازی شده با استفاده از میراگر MR تحت الگوریتم کنترلی Semi-Active

سبب شده که محققین مدل‌های ساده تر و قابل کاربردی را برای بیان رفتار این میراگرها ارائه دهند. در این تحقیق از یک مدل چند جمله ای غیرخطی که وابسته به سرعت و جابجایی میراگر است، استفاده شده است. روابط مربوط به این مدل برای چهار ناحیه با توجه به تغییرات سرعت و جابجایی تعریف شده است. برای سنجش دقت مدل پیشنهادی، از نتایج تست‌های آزمایشگاهی میراگر MR تحت بارهای سینوسی استفاده شد. نتایج بیانگر دقت بسیار بالای مدل پیشنهادی در محاسبه نیروی میراگر در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی است. برای بررسی کاربرد عملی مدل پیشنهادی، یک سازه ۵ طبقه

۵- بحث و نتیجه گیری:

مدلسازی رفتار غیرخطی میراگرهای MR یکی از چالش‌های موجود برای ارائه مدل‌های رفتاری این میراگرها می باشد. در این راستا مدل‌های پارامتری و ناپارامتری مختلفی برای این میراگرها ارائه شده است. در بین مدل‌های پارامتری، مدل اصلاح شده بوکون^۱ بیشترین کاربرد را در بین محققان داشته است. زمانبر بودن استفاده از مدل‌های پارامتری و مشکلات مربوط به واگرایی در اثر استفاده از این مدل‌ها

^۱ Bouc Wen Model

[9] Wen YK. Method for Random Vibration of Hysteretic Systems. *Journal of the Engineering Mechanics Division*. 1976; 102(2): 249-263.

<https://doi.org/10.1061/JMCEA3.0002106>

[10] Spencer BF, Dyke SJ, Sain MK, Carlson JD. Phenomenological model for magnetorheological dampers. *Journal of Engineering Mechanics*. 1997; 123: 230-238.

[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(1997\)123:3\(230\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(1997)123:3(230))

[11] Song X, Ahmadian M, Southward SC. Modeling magnetorheological dampers with application of nonparametric approach. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. 2005; 16: 421-432.

<https://doi.org/10.1177/1045389X05051071>

[12] Bajkowski J, Nachman J, Shillor M, Sofonea M. A model for a magnetorheological damper. *Mathematical and Computer Modelling*. 2008; 48: 56-68.

<https://doi.org/10.1016/j.mcm.2007.08.014>

[13] Metered H, Bonello P, Oyadiji SO. The experimental identification of magnetorheological dampers and evaluation of their controllers. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2010; 24: 976-94.

<https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2009.09.005>

[14] Yang MG, Li CY, Chen ZQ. A new simple non-linear hysteretic model for MR damper and verification of seismic response reduction experiment. *Engineering Structures*. 2013; 52: 434-445.

<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2013.03.006>

[15] Arias Montiel M, Floreán Aquino KH, Francisco Agustín E, Piñón López DM, Santos Ortiz RJ, Santiago Marcial BA. Experimental Characterization of a Magnetorheological Damper by a Polynomial Model. 2015 International Conference on Mechatronics, Electronics and Automotive Engineering (ICMEAE); Cuernavaca, Morelos, Mexico; November 24-27, 2015.

<https://doi.org/10.1109/ICMEAE.2015.31>

[16] Yu J, Dong X, Zhang Z. A novel model of magnetorheological damper with hysteresis division. *Smart Materials and Structures*. 2017; 26(10): 1-15.

<https://doi.org/10.1088/1361-665x/aa87d6>

[17] Rahmat Mohd S, Hudha K, Abd Kadir Z, Amer Noor H, Abd Rahman Muhammad Luqman H, Abdullah S. Modelling and validation of magneto-rheological fluid damper behaviour under impact loading using interpolated multiple adaptive neuro-fuzzy inference system. *Multidiscipline Modeling in Materials and Structures*. 2020; 16(6): 1395-1415. <https://doi.org/10.1108/MMMS-10-2019-0187>

جداسازی شده به روش جرمی قائم مورد بررسی قرار گرفت. میراگرهای مورد استفاده در این سازه از نوع میراگر MR با ظرفیت ۱۰۰ تن می باشد. مقایسه پاسخ های مربوط به جابجایی و برش پایه سازه جداسازی شده باتوجه به استفاده از مدل پیشنهادی و مدل اصلاح شده بوکون، بیانگر دقت و سرعت بالای مدل پیشنهادی برای استفاده در این سازه ها می باشد. استفاده از این مدل سبب کاهش زمان تحلیل و حذف مشکلات واگرایی نتایج نسبت به مدل اصلاح شده بوکون می باشد.

۶- مراجع

[۱] عبدی، محمدشاهرخ؛ نکویی، مسعود؛

جعفری صحنه سرابی، محمدعلی. کاربرد میراگرهای MR در کنترل لرزه‌های سازه‌ها به روش جداسازی جرمی قائم. فصلنامه علوم و مهندسی زلزله، دوره ۸، شماره ۲، مرداد ۱۴۰۰: ۵۷-۶۶.

<https://doi.org/10.48303/bese.2021.242931>

[2] Carlson JD, Catanzarite DM, Clair KAS. Commercial Magneto-Rheological Fluid Devices. *International Journal of Modern Physics B*. 1996; 10(23n24): 2857-2865.

<https://doi.org/10.1142/s0217979296001306>

[3] Pourshayan AE, Rabbani A, Farahani S, Rabbani Y, Ahmadi Danesh Ashtian H, Shariat M, Gholi Nejad M, Emami Satellou AA. Modeling and Simulation of the Magnetorheological Fluid Sleeve Valve. *Iranian Journal of Chemical Engineering*. 2021; 18(1): 25-35.

<https://doi.org/10.22034/ijche.2021.131248>

[4] Rossi A, Orsini F, Scorza A, Botta F, Belfiore NP, Sciuto SA. A Review on Parametric Dynamic Models of Magnetorheological Dampers and Their Characterization Methods. *Actuators*. 2018; 7(2): 16. <https://doi.org/10.3390/act7020016>

[5] Stanway R, Sproston JL, Stevens NG. Non-linear identification of an electrorheological vibration damper. *IFAC Identification and System Parameter Estimation*. 1985; 18(5): 195-200.

[https://doi.org/10.1016/S1474-6670\(17\)60558-5](https://doi.org/10.1016/S1474-6670(17)60558-5)

[6] Stanway R, Sproston JL, Stevens NG. Non-linear modelling of an electro-rheological vibration damper. *Journal of Electrostatics*. 1987; 20: 167-84. [https://doi.org/10.1016/0304-3886\(87\)90056-8](https://doi.org/10.1016/0304-3886(87)90056-8)

[7] Gamota DR, Filisko FE. Dynamic mechanical studies of electrorheological materials: Moderate frequencies. *Journal of Rheology*. 1991; 35: 399-425.

<https://doi.org/10.1122/1.550221>

[8] Li WH, Yao GZ, Chen G, Yeo SH, Yap FF. Testing and steady state modelling of a linear MR damper under sinusoidal loading. *Smart Materials and Structures*. 2000; 9: 95-102.

<https://doi.org/10.1088/0964-1726/9/1/310>

- [18] Milanchian R, Hosseini M, Nekooei M. Vertical isolation of a structure based on different states of seismic performance. *Earthquakes and Structures*. 2017; 13(2): 103-118.
<https://doi.org/10.12989/eas.2017.13.2.103>
- [19] Abdi MS, Nekooei M, Jafari MA. Numerical Investigation of a New Method for Seismic Control of Structures. *KSCE Journal of Civil Engineering*. 2021; 25(1): 162-172.
<https://doi.org/10.1007/s12205-020-2368-0>
- [20] Nekooei M, Rahgozar N, Rahgozar N. Vertical seismic isolated rocking-core system. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Structures and Buildings*. 2021; 174(8): 627-636.
<https://doi.org/10.1680/jstbu.19.00158>
- [21] Nekooei M, Ziyaeifar M. Vertical seismic isolation of structures. *Journal of Applied Sciences*. 2008; 8: 4656-4661.
<https://doi.org/10.3923/jas.2008.4656.4661>
- [22] Milanchian R, Hosseini M. Study of vertical seismic isolation technique with nonlinear viscous dampers for lateral response reduction. *Journal of Building Engineering*. 2019; 23: 144-154.
<https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.01.026>
- [23] Abdi MS, Nekooei M, Jafari MA. Seismic control of multi-degrees-of-freedom structures by vertical mass isolation method using MR dampers. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*. 2024; 23(2): 503-510.
<https://doi.org/10.1007/s11803-024-2251-y>
- [24] Uz ME, Hadi MNS. Optimal design of semi active control for adjacent buildings connected by MR damper based on integrated fuzzy logic and multi-objective genetic algorithm. *Engineering Structures*. 2014; 69: 135-48.
<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.03.006>
- [25] Ancheta TD, Darragh RB, Stewart JP, Seyhan E, Silva WJ, Chiou BS, Wooddell KE, Graves RW, Kottke AR, Boore DM, Kishida T, Donahue JL. NGA-West2 Database. *Earthquake Spectra*. 2014; 30(3): 989-1005.
<https://doi.org/10.1193/070913EQS197M>
- [26] Karnopp D, Crosby MJ, Harwood RA. Vibration Control Using Semi-Active Force Generators. *Journal of Engineering for Industry*. 1974; 96(2): 619-626.
<https://doi.org/10.1115/1.3438373>