

تهیه ی طیف عملکرد برای طراحی دستگاه های سختی منفی و کاربرد آن در پل های تحت اثر زلزله

محمد موبزی ثانی (دانشجوی دکتری)

عباس کرم الدین* (دانشیار)

دانشکده ی فنی و مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی، مشهد

مهندسی عمران شریف (پیاو ۱۴۰۲)
دوری ۲ - ۳۹، شماره ۱، ص. ۳-۱۳، (پژوهشی)

در نوشتار حاضر، طیف عملکرد برای سازه های یک درجه آزادی برشی مجهز به دو نوع از دستگاه سختی منفی غیرفعال ارائه شده است. با استفاده از روش تحلیل تاریخچه ی زمانی غیرخطی برای پارامترهای مکانیکی مختلف دستگاه های سختی منفی، طیف عملکرد برای سازه های با دوره ی تناوب 0.5 تا 2.5 ثانیه برای هر دو نوع دستگاه به دست آمده است. برای انجام این کار، ۱۲ رکورد زلزله با طیف طراحی آیین نامه ی ایران (استاندارد ۲۸۰۰) انطباق داده شده اند. از پارامترهای نسبت نیروی تسلیم دستگاه و سازه، به نیروی تسلیم سازه و همچنین نسبت سختی دستگاه به سازه برای تهیه ی طیف های عملکرد استفاده شده است. همچنین، برای بررسی کارایی طیف عملکرد در طراحی پارامترهای دستگاه سختی منفی و آثار آن در کاهش پاسخ سازه ها، از سازه ی پل بزرگراهی معیار استفاده شده است. پارامترهای هدف به دست آمده، نشان دهنده ی نتایج مطلوب طیف عملکرد در طراحی سیستم های سختی منفی و کاهش پاسخ هاست.

واژگان کلیدی: طیف عملکرد، سختی منفی، پل بزرگراهی معیار، کنترل غیرفعال.

۱. مقدمه

یکی از چالش آمیزترین مسائل در طراحی سازه ها، طراحی در برابر بارهای لرزه یی است. از آنجایی که زلزله ها در زمان های مختلف ماهیت دینامیکی و عدم قطعیت بالایی دارند، طراحی سازه در برابر زلزله، اهمیت بسیاری دارد. پژوهشگران همواره به دنبال مؤثرترین راه برای حفاظت از سازه ها در برابر زلزله بوده اند. بنابراین دانش کنترل سازه برای بررسی و بهبود رفتار سازه در برابر زلزله ایجاد شده است. برای اولین بار در سال ۱۹۷۲، کنترل سازه توسط یاتو^[۱] پیشنهاد شد، که پتانسیل زیادی برای کاهش ارتعاش ها در سازه های عمرانی مختلف تحت بارگذاری دینامیکی نشان داده است. در پنج دهه ی گذشته، تلاش های زیادی برای توسعه ی مفهوم کنترل سازه به عنوان یک فناوری قابل اجرا در سازه ها صورت گرفته است. بر همین اساس، سیستم های کنترل به دستگاه های کنترل غیرفعال، فعال و نیمه فعال طبقه بندی شده اند.

در دو دهه ی اخیر، در زمینه ی پژوهش های کنترل سازه، ایده های جدید بسیاری برای کاهش آسیب به سازه ها و کاهش جابه جایی ماندگار ارائه شده است. دو ایده ی

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۴۰۱/۳/۲۴، اصلاحیه ۱۴۰۱/۸/۹، پذیرش ۱۴۰۱/۸/۲۳.

DOI:10.24200/J30.2022.60333.3096

استناد به این مقاله:

موبزی ثانی، محمد و کرم الدین، عباس (۱۴۰۲). «تهیه ی طیف عملکرد برای طراحی دستگاه های سختی منفی و کاربرد آن در پل های تحت اثر زلزله»، مهندسی عمران شریف،

(۱) ۳۹-۲، ص. ۳-۱۳

mmsani.pe@gmail.com
a-karam@um.ac.ir

جالب در این زمینه، دستگاه های مرکزگرا^۲ و سختی منفی^۳ هستند، که مورد توجه پژوهشگران بوده اند. هر دو سیستم مرکزگرا و سختی منفی بر اساس کاهش یا حذف جابه جایی های غیرکشسان باقیمانده پس از زلزله در سازه ایجاد شده اند، تا امکان بهره برداری از سازه پس از زلزله با کمترین هزینه انجام شود. تفاوت دو روش اخیر، در عملکرد آنها برای رسیدن به هدف ذکر شده است. سیستم های مرکزگرا، عمدتاً توسط برخی از عناصر پیش تنیده، سعی در کاهش پاسخ ها و بازگرداندن سازه به حالت اولیه ی خود دارند. در مقابل، در روش سختی منفی، با افزودن یک دستگاه اضافی به سازه، مانند میراگرها، با ایجاد نقطه ی تسلیم مجازی، سطح نیروها در سازه و به دنبال آن آسیب در سازه کاهش می یابد. ویژگی اصلی روش سختی منفی، کاهش نیرو و شتاب وارد بر سازه است. به طور کلی، در اثر زلزله های شدید، جابه جایی های سازه ها وارد ناحیه ی غیرخطی رفتار سازه می شوند، که منجر به تغییر شکل ماندگار در سازه می شود. با افزودن یک سیستم سختی منفی به سازه، سختی مجموع سازه و سیستم دارای سختی منفی کاهش می یابد. بنابراین، سازه در نقطه ی مجازی، کمتر از تسلیم واقعی سازه، رفتار غیرخطی و مجازی از خود نشان می دهد. در نتیجه ی کاهش سختی، دوره ی تناوب سازه افزایش می یابد، که منجر به کاهش نیرو و شتاب مطلق وارد شده به سازه می شود، اما در مقابل به دلیل کاهش سختی، جابه جایی

سازه افزایش می‌یابد. بنابراین، سازه‌ی اصلی، رفتار غیرخطی کم یا نسبتاً خطی از خود نشان می‌دهد و آسیب در آن بسیار کاهش می‌یابد. برای حل مشکل افزایش جابه‌جایی در سازه از سیستم‌های اتلاف انرژی، مانند میراگرهای ویسکوز، به موازات سیستم سختی منفی استفاده می‌شود.

روش سختی منفی به‌صورت: غیرفعال، فعال و نیمه‌فعال قابل اجراست. اولین بار ایمر (۲۰۰۵)، یک جداگر با قابلیت سختی منفی را ارائه کرد.^[۲] ناگاراچایه^۵ و همکارانش (۲۰۱۱-۲۰۱۴)، نیز یک دستگاه سختی منفی با استفاده از یک فنر فشرده ارائه دادند، که سختی منفی واقعی را تولید می‌کرد.^[۶-۳] عطاری (۲۰۱۵)، با استفاده از چند چرخ‌دنده، یک دستگاه سختی منفی دورانی را ایجاد کرد.^[۷] توکویا^۶ (۲۰۱۵)، یک جداگر با قابلیت سختی منفی را برای سازه‌ی پل‌های راه‌آهن معرفی کرد.^[۸] لیو و ژو^۷ (۲۰۱۵)، ابتدا یک دستگاه سختی منفی برای کنترل ارتعاش کابل‌ها در پل‌های معلق^[۹] و سپس یک سیستم جدید با استفاده از فنرهای فشرده و آلیاژهای حافظه‌دار^۸ ارائه کردند، که دو قابلیت سختی منفی و مرکزگر را هم‌زمان ارائه می‌کرد.^[۱۰] هوان لی^۹ (۲۰۲۱)، یک دستگاه سختی منفی تطبیقی اصلاح شده با توانایی ارائه‌ی سختی منفی جانبی و میرایی غیرخطی با پیکربندی فنرهای خطی و میراگرهای ویسکوز خطی برای رفع مشکل در بسامدهای بالا پیشنهاد کرد.^[۱۱] سان^{۱۰} (۲۰۲۱)، نشان داد عملکرد لرزه‌ی سازه‌های مجهز به کمر بند خربایی میرا شده‌ی معمولی با ترکیب سختی منفی به موازات میراگر ویسکوز بهبود می‌یابد.^[۱۲] ژاو و وانگ^{۱۱} (۲۰۲۲)، یک سیستم جداساز تقویت شده با سختی منفی جدید (NSAS-IS) را برای ارتقاء عملکرد لرزه‌ی سازه‌های اطراف راکتور هسته‌ی ارائه کرده‌اند.^[۱۳] نقیب‌الاسلام (۲۰۲۲)، یک ترکیب جدید از میراگرهای سختی منفی واقعی (NSDs) و دستگاه‌های اینترتر (Inerter) را به عنوان میراگرهای موازی (NSID)^{۱۲} برای کنترل پاسخ سازه‌های جداسازی شده استفاده کرده است.^[۱۴] تمامی دستگاه‌های اشاره شده، سختی منفی را به روش غیرفعال تولید می‌کنند.

ایمر (۲۰۰۳)، حلقه‌ی هیستریزس سختی شبه‌منفی در کاهش پاسخ لرزه‌ی مؤثر را برای اولین بار ارائه داد.^[۱۵] لی^{۱۳} (۲۰۲۱)، یک سیستم سختی منفی جدید پیشنهاد کرده است که سختی منفی تطبیقی و ویژگی‌های میرایی را ادغام می‌کند.^[۱۶] ژیانگ شی^{۱۴} (۲۰۲۱)، یک روش جدید جداسازی ارتعاش مبتنی بر فنر سختی منفی غیرفعال (NSS) و یک دستگاه نیمه‌فعال را با هدف دستیابی به عملکرد جداسازی فعال با استفاده از روش نیمه‌فعال کم توان پیشنهاد کرده است.^[۱۷] سالواتوره^{۱۵} (۲۰۲۲)، سختی منفی توسط مکانیسم‌های دارای دو وضعیت پایدار همراه با سوپرکشسانی قابل تنظیم توسط سیم‌های آلیاژ حافظه‌ی (SMA) را ارائه کرده است، که می‌تواند اعطاف‌پذیری دینامیکی یک سازه را در زمینه‌ی جداسازی ارتعاش افزایش دهد.^[۱۸] لی (۲۰۲۲)، یک میراگر سختی منفی شبه‌فعال جدید برای حفاظت لرزه‌ی مؤثر و مقاوم با ادغام عنصر سختی منفی و عنصر میرایی قابل کنترل با هم، پیشنهاد داده است.^[۱۹] در منابع فارسی نیز پژوهش‌هایی بر روی سختی منفی صورت پذیرفته است، که به جهت اختصار فقط به ذکر منبع آنها اکتفا شده است.^[۲۰ و ۲۱]

با توجه به ویژگی‌های بسیار خوب سیستم سختی منفی، یکی از مسائل مهم در این زمینه، نحوه‌ی طراحی و ظرفیت مورد نیاز سیستم‌های سختی منفی با توجه به ویژگی‌های دینامیکی سازه‌ی اصلی است. امروزه برای طراحی‌های سازه‌های جدید، استانداردهایی مانند: ASCE-۷، ASCE-۴۱ و FEMA۴۵۰^[۲۲-۲۴]، ضوابطی را برای طراحی و کنترل سیستم‌های میرایی ارائه کرده‌اند، اما استانداردهای مذکور بر تحلیل سیستم‌های میرایی تمرکز دارند و مبتنی بر آزمون و خطا هستند. بنابراین لازم است روش مناسبی برای انتخاب پارامترهای بهینه در طراحی و تولید ظرفیت مناسب

برای یک دستگاه کنترل با توجه به رفتار سازه ارائه شود. یکی از روش‌های مؤثر و مناسب در ارائه‌ی پارامترهای بهینه‌ی مناسب برای سیستم‌های کنترلی، استفاده از طیف عملکرد برای تعیین رفتار یک سیستم در پارامترهای مختلف است. طیف عملکرد به عنوان یک ابزار گرافیکی، نشان‌دهنده‌ی تأثیر سیستم کنترلی با پارامترهای مختلف در سازه‌ی اصلی است. روش طراحی مبتنی بر طیف عملکرد (گوا و کریستوپولوس)،^[۲۵ و ۲۶] پاسخ‌های سیستم یک درجه آزادی دوخطی را شامل: بیشینه‌ی جابه‌جایی، جابه‌جایی باقیمانده، بیشینه‌ی برش پایه و شتاب به پارامترهای قابل تنظیم میراگر مرتبط می‌کند. طیف‌های مذکور، امکان مقایسه‌ی پارامترهای مختلف برای دستیابی به اهداف عملکرد را بدون نیاز به طراحی کامل و فرایند تکراری فراهم می‌کنند. طیف عملکرد (P-Spectra) برای میراگرهای ویسکوز، ویسکوکشسان، اصطکاکی و فولادی بررسی و توسعه یافته است،^[۲۵ و ۲۶] ولی تاکنون طیف عملکرد برای سیستم‌های سختی منفی تهیه نشده است.

۲. معرفی سیستم

ویژگی اصلی روش سختی منفی، کاهش نیرو و تغییر شکل دائمی در سازه است. سیستم‌های سختی منفی متفاوتی توسط پژوهشگران پیشنهاد شده است. در مطالعه‌ی حاضر، از دو نوع دستگاه سختی منفی برای تولید طیف عملکرد استفاده شده است.

۱.۲. دستگاه سختی منفی (NSD)^{۱۷}

ناگاراچایه^{۱۸} و همکارانش،^[۶-۳] اولین بار مفهوم سختی منفی واقعی را برای کاربردهای سازه‌ی معرفی کردند. سختی منفی واقعی، نیازی به منبع تغذیه خارجی ندارد و کاملاً از فنر تشکیل می‌شود و یک سختی منفی کشسان غیرخطی واقعی ایجاد می‌کند. دستگاه سختی منفی توسعه یافته توسط ناگاراچایه و همکارانش، در شکل ۱ مشاهده می‌شود. دستگاه سختی منفی، شامل یک فنر پیش‌فشرده در مرکز دستگاه، فنرهای gap در پایین و ترکیبی از عناصر قاب و صفحاتی است که قطعات را در کنار هم نگه می‌دارد. هنگامی که دستگاه تغییر شکل می‌دهد، فنر از پیش فشرده شده، نیرویی در جهت حرکت یا نیروی منفی ایجاد می‌کند. همچنین نمودار شماتیک دستگاه در وضعیت تغییر شکل یافته پس از جابه‌جایی بالای دستگاه در شکل ۲ مشاهده می‌شود.

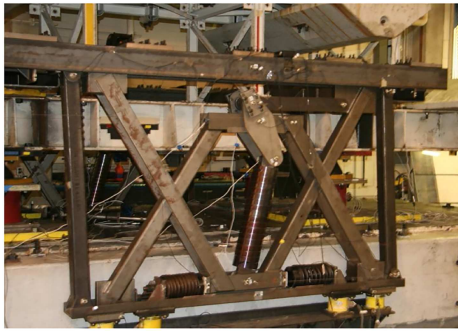
بر اساس معادلات تعادل، l_s طول فنر تغییر شکل یافته به صورت رابطه‌ی ۱ است:

$$l_s = \sqrt{\left(l_p + l_1 - l_1 \sqrt{1 - \left(\frac{u}{l_1}\right)^2}\right)^2 + u^2 \left(1 + \frac{l_1}{l_2}\right)^2} \quad (1)$$

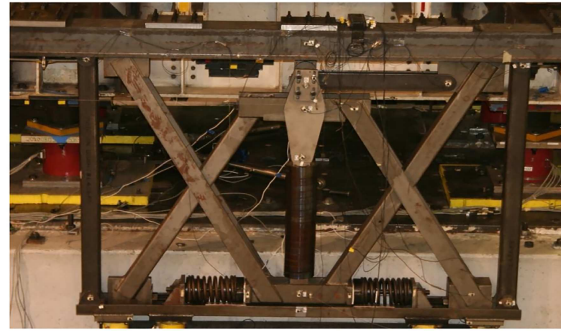
شکل نهایی رابطه‌ی نیروی تولید شده توسط NSD به صورت تابعی از تغییر شکل دستگاه به صورت رابطه‌ی ۲ نوشته می‌شود:

$$F_{NSD} = - \left(\frac{P_{in} + K_s l_p}{l_s} - K_s \right) \left(\frac{l_1}{l_2} \right) \left(2 + \frac{l_2}{l_1} + \frac{l_p + l_1}{\sqrt{l_1^2 - u^2}} \right) u + F_g \quad (2)$$

که در آن، F_g نیروی فنر gap است، که برای جابه‌جایی یکنواخت مثبت به صورت

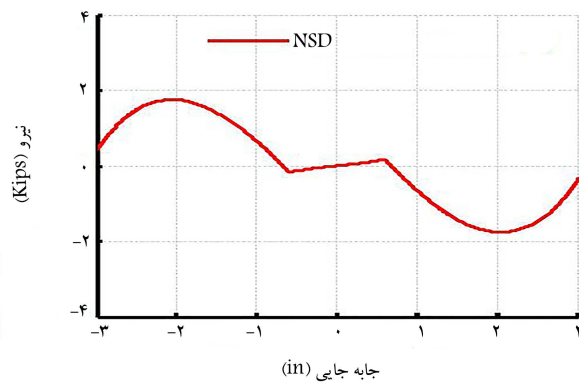


ب) تغییر شکل یافته.

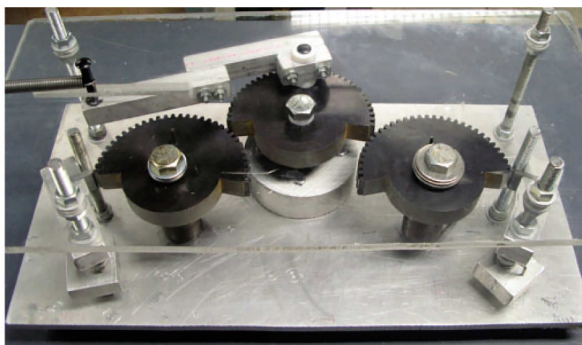


الف) تغییر شکل نیافته؛

شکل ۱. دستگاه سختی منفی NSD. [۵]



شکل ۳. نمودار نیرو - جابه جایی NSD. [۴]

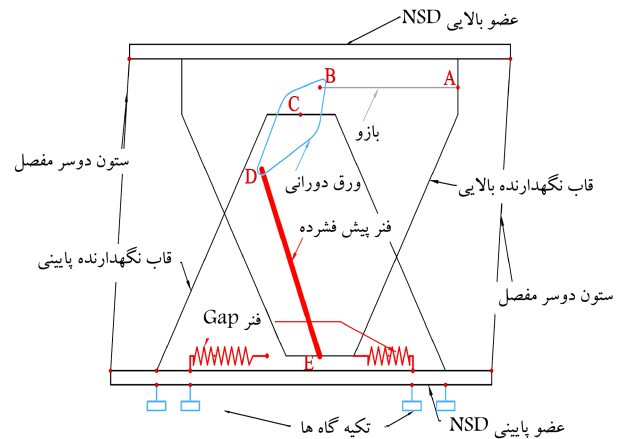


شکل ۴. نمونه‌ی RBMAP-S ساخته شده اولیه. [۷]

۲.۲. دستگاه سختی منفی دورانی (RBMAP - S) [۱۹]

نوید عطاری و همکاران (۲۰۱۵)، یک دستگاه غیرفعال مکانیکی تطبیقی (RBMAP - S) پیشنهاد کرده‌اند، که می‌تواند در هنگام زلزله، سختی منفی در سازه ایجاد و حرکت انتقالی یک سازه را به حرکت دورانی تبدیل کند. [۷] در شکل ۴، دستگاه متشکل از سه چرخ‌دنده مشاهده می‌شود. چرخ‌دنده‌ی اولیه به وسیله‌ی یک بازوی اتصال مفصلی به سازه متصل می‌شود و دو چرخ‌دنده‌ی ثانویه، برای کنترل حرکت چرخ‌دنده‌ی اولیه و در نتیجه تأثیر در پاسخ سازه طراحی شده است. در شکل ۵، طرح کلی دستگاه مشاهده می‌شود.

دستگاه اولیه‌ی ارائه شده دو مشکل داشته است، که توسط عطاری اصلاح شده است: ۱. درگیر شدن ناگهانی چرخ‌دنده‌ی ثانویه، ۲. ناپایداری در جابه‌جایی‌های



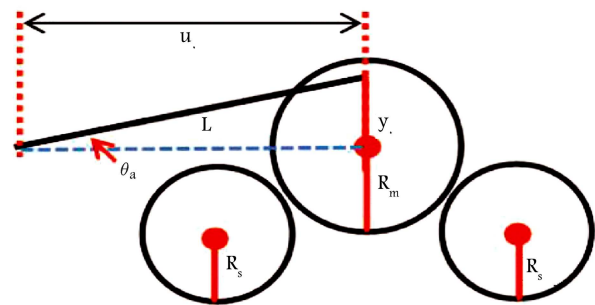
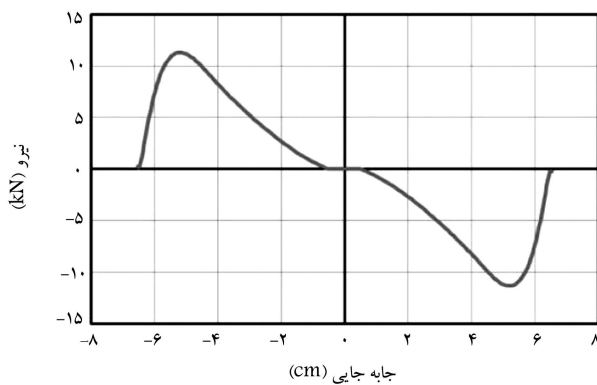
شکل ۲. وضعیت شماتیک دستگاه سختی منفی NSD در حالت تغییر شکل یافته. [۴]

رابطه‌ی ۳ است:

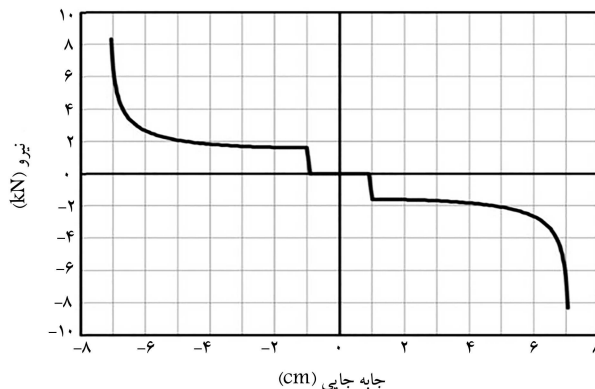
$$F_g = \begin{cases} K_{g1}u & 0 \leq u \leq d_{gap} \\ K_{g1}d_{gap} + K_{g2}(u - d_{gap}) & u > d_{gap} \end{cases} \quad (3)$$

که در آن، l_p طول فنر پیش‌فشرده در زمانی است که NSD تغییر شکل نیافته است، l_1 فاصله‌ی بین دو نقطه‌ی C، D و l_2 فاصله‌ی نقاط B و C است. u جابه‌جایی کل دستگاه و P_{in} نیروی پیش‌فشرده‌ی فنر است و باید مقدار مثبت داشته باشد، K_{s1} سختی فنر فشرده، K_{g1} و K_{g2} سختی‌های فنرهای gap در پایین دستگاه و d_{gap} یک جابه‌جایی مشخص در فنر gap در حالتی است که باز می‌شود.

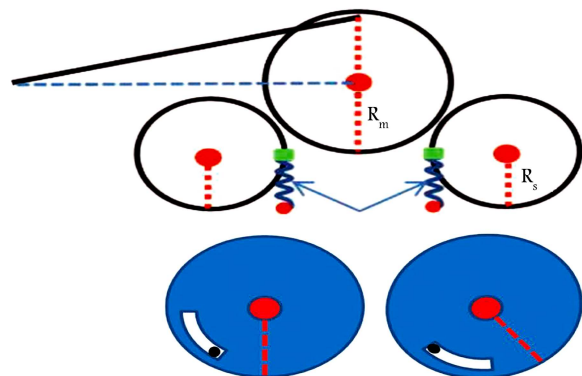
بازوی AB، یک جابه‌جایی در بالا (نقطه‌ی B) ایجاد می‌کند، که ورق دورانی حول نقطه‌ی C می‌چرخد. از آن‌جا که ورق چرخشی حول نقطه‌ی C دوران می‌کند، نقطه‌ی D در جهت خلاف حرکت جابه‌جایی اعمال شده حرکت می‌کند. نقطه‌ی E به صورت کاملاً صلب به بالای دستگاه متصل است و بنابراین، جابه‌جایی برابر با جابه‌جایی اعمال شده دارد. با توجه به حرکت نقاط D و E، فنر فشرده چرخش می‌یابد و نیروی فشرده‌ی آن، باعث جابه‌جایی بیشتر می‌شود. همان‌طور که دستگاه تغییر شکل می‌دهد، فنر باز می‌شود و بنابراین نیروی فشرده‌ی آن کاهش می‌یابد؛ در حالی که زاویه‌ی آن افزایش و مقدار سختی تولید شده توسط دستگاه کاهش می‌یابد. در نهایت، کاهش سختی تدریجی اخیر، منجر به سختی مثبت در جابه‌جایی‌های بزرگ می‌شود. در شکل ۳، نمودار نیرو - جابه‌جایی NSD مشاهده می‌شود.



شکل ۵. طرح کلی دستگاه سختی منفی RBMAP-S [۷]



شکل ۶. نمودار نیرو- جابه‌جایی RBMAP - S در حالت اولیه [۷]



شکل ۷. موقعیت فنر انتقالی و پیچشی افزوده شده. بالا: فنر انتقالی، پایین: فنر پیچشی [۷]

بزرگ. در شکل ۶، نمودار نیرو- جابه‌جایی دستگاه در حالت اولیه شکل ۴ و ناپایداری به وجود آمده مشاهده می‌شود. عطاری برای رفع مشکل مذکور، اول یک فنر انتقالی خطی به محیط چرخ‌دنده‌ی ثانویه و برای مشکل دوم، یک فنر پیچشی دیگر به چرخ‌دنده‌ی ثانویه متصل کرد، که اتصال مذکور به چرخ‌دنده‌ی ثانویه از طریق یک شکاف قوسی شکل انجام شده است. در شکل ۷، موقعیت فنر انتقالی و پیچشی افزوده شده به دستگاه مشاهده می‌شود.

مشابه NSD، معادلات نیرو- جابه‌جایی (معادلات ۴ الی ۷) برای RBMAP - S ارائه شده‌اند:

$$u = \sqrt{L^2 - y^2} \cos^2 \theta_m + y \sin \theta_m - u_0 \quad (4)$$

$$F_x = \frac{\left(T_s - K_s \frac{R_m}{R_s} (\theta_m - \theta_0) \right) \frac{R_m}{R_s}}{y \cos \theta_m} \sqrt{L^2 - y^2} \cos^2 \theta_m \quad (5)$$

شکل ۸. نمودار نیرو- جابه‌جایی RBMAP-S در حالت اصلاح شده [۷]

$$F_a = k_a L \theta = k_a R_s \sqrt{3 - 2(\sin \theta_s + \cos \theta_s)} \quad (6)$$

$$M_a = k_a R_s^2 [\cos^2 \theta_s - \sin^2 \theta_s] \sqrt{3 - 2(\sin \theta_s + \cos \theta_s)} \quad (7)$$

که در آنها، L طول بازوی اتصال، θ_m دوران چرخ‌دنده‌ی اصلی، u_0 فاصله‌ی اولیه بین نقطه‌ی اتصال دستگاه به سازه و مرکز چرخ‌دنده‌ی اصلی، θ_s میزان دوران لازم برای درگیر شدن چرخ‌دنده‌های ثانویه با چرخ‌دنده‌ی اولیه، y فاصله‌ی بین نقطه‌ی اتصال بازوی چرخ‌دنده‌ی اصلی و مرکز چرخ‌دنده‌ی اصلی، T_s گشتاور چرخ‌دنده‌های ثانویه، k_s سختی پیچشی فنر، R_m شعاع چرخ‌دنده‌ی اصلی، R_s طول اولیه‌ی فنر افزوده شده یا شعاع چرخ‌دنده‌ی ثانویه، θ_s دوران چرخ‌دنده‌ی ثانویه، k_a سختی محوری فنر افزوده شده، F_a نیروی محوری فنر افزوده شده و M_a گشتاور ایجاد شده توسط F_a است. در شکل ۸، نمودار نیرو- جابه‌جایی RBMAP-S در حالت اصلاح شده مشاهده می‌شود.

۳. تهیه طیف عملکرد برای طراحی NSD و

RBMAP - S

یکی از مشکلات مهندسان برای استفاده از سیستم‌های کنترل در سازه‌ها، انتخاب پارامترهای بهینه برای یک هدف عملکردی معین است. استانداردهای موجود، از جمله: FEMA ۴۵۰ [۱۹] و ASCE ۷ [۱۷]، برای طراحی سازه‌های مجهز به میراگر، متکی به فرایند آزمون و خطا هستند، که بر تعیین عملکرد یک سازه‌ی مجهز به میراگر متمرکز است و روش آموزنده‌ی برای تعیین طراحی بهینه نیست. طراحی سیستم‌های میرایی غیرفعال، شامل تنظیم پارامترهای سازه‌ی است که پاسخ‌های چندگانه‌ی مورد نیاز را در سطوح مختلف خطر برآورده سازد. طیف عملکرد از منحنی‌های پاسخ برای مقادیر مختلف پارامترهای سیستم استفاده می‌کند و پاسخ‌های سیستم یک درجه‌ی آزادی غیرخطی ایده‌آل، شامل: بیشینه‌ی جابه‌جایی، بیشینه‌ی برش و شتاب پایه را به پارامترهای قابل کنترل دستگاه و سازه ارتباط می‌دهد.

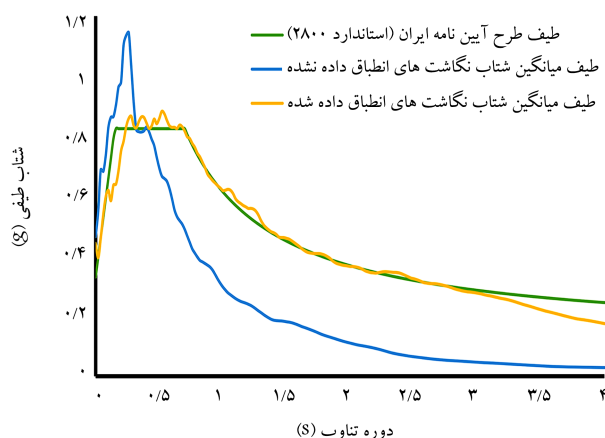
گو و کریستوپولوس، [۲۰، ۲۶] برای اولین بار طیف عملکردی را برای میراگرهای هیستریزیس و ویسکوکشسان پیشنهاد کرده‌اند.

برای رسم طیف عملکرد یک سیستم، سازه به صورت یک سیستم یک درجه‌ی آزادی الاستوخمیری دوخطی با نسبت سختی ثانویه ۵٪ سختی اولیه مدل‌سازی می‌شود که در آن، m جرم سازه‌ی یک درجه‌ی آزادی، T_f دوره‌ی تناوب سازه و V_f نسبت مقاومت برشی سازه V_{bf} به برش پایه‌ی کشسان $S_a(T_f, \xi)m$ هستند.

$$V_f = V_{bf} / S_a(T_f, \xi) m \quad (8)$$

جدول ۱. فهرست شتاب‌نگاشت‌های استفاده شده در تحلیل‌های تاریخی‌های زمانی غیرخطی. [۲۳]

ردیف	اطلاعات شتاب نگاشت‌ها		فاصله از منبع (Km)		اطلاعات ثبت شده		
	نام رکورد	بزرگا (Mw)	نوع گسل	فاصله‌ی رومرکزی	عمق کانونی	بیشینه‌ی شتاب (g)(PGA)	بیشینه‌ی سرعت (cm/s)(PGV)
۱	Northridge	۶٫۷	معکوس	۱۳٫۳	۱۷٫۲	۰٫۵۲	۶۳
۲	Duzce	۷٫۱	امتداد لغز	۴۱٫۳	۱۲	۰٫۸۲	۶۲
۳	Imperial Valley	۶٫۵	امتداد لغز	۲۹٫۴	۱۲٫۵	۰٫۳۸	۴۲
۴	Kobe	۶٫۹	امتداد لغز	۸٫۷	۷٫۱	۰٫۵۱	۳۷
۵	Kocaeli	۷٫۵	امتداد لغز	۹۸٫۲	۱۵٫۴	۰٫۳۶	۵۹
۶	Landers	۷٫۳	امتداد لغز	۸۲٫۱	۱۹٫۷	۰٫۴۲	۴۲
۷	Loma Prieta	۶٫۹	امتداد لغز	۳۱٫۴	۱۲٫۸	۰٫۵۶	۴۵
۸	Manjil	۷٫۴	امتداد لغز	۴۰٫۴	۱۲٫۶	۰٫۵۱	۵۴
۹	Superstition	۶٫۵	امتداد لغز	۱۱٫۲	۱۱٫۲	۰٫۴۵	۳۶
۱۰	Chi Chi	۷٫۶	معکوس	۷۷٫۵	۲۶	۰٫۵۱	۳۹
۱۱	San Fernando	۶٫۶	معکوس	۳۹٫۵	۲۲٫۸	۰٫۲۱	۱۹
۱۲	Friuly	۶٫۵	معکوس	۲۰٫۲	۱۵٫۸	۰٫۳۵	۳۱



شکل ۹. طیف طرح آیین‌نامه‌ی ایران برای زمین نوع III و پهنه با خطر نسبی زیاد (سبز) و طیف میانگین شتاب‌نگاشت‌های استفاده شده در تحلیل تاریخی‌های زمانی غیرخطی انطباق داده نشده (آبی) و انطباق داده شده (زرد) برای دوره‌ی تناوب ۱٫۵ ثانیه.

برای کسب نتایج با دقت مورد نظر، باید شتاب‌نگاشت‌ها به مقیاس در آورده شوند. بر اساس آیین‌نامه‌ی طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله‌ی ایران (ویرایش چهارم استاندارد ۲۸۰۰)، فقط روش مقیاس شتاب‌نگاشت‌ها ارائه شده است. روش دیگری که در آیین‌نامه‌های دیگر، از جمله ۱۶-ASCEV،^[۲۵] ارائه شده است، روش انطباق شتاب‌نگاشت با یک طیف طراحی هدف است، که روش‌های مختلفی برای انجام آن پیشنهاد شده است؛ که از جمله‌ی آن‌ها، روش انطباق در حوزه‌ی زمان است، که شتاب‌نگاشت‌ها در نرم‌افزار SeismoMatch با استفاده از الگوریتم پیشنهادی آبراهامسون^{۲۱} (۱۹۹۲)،^[۲۹] در بازه‌ی ۰٫۵T تا ۲T با طیف طراحی استاندارد ۲۸۰۰ انطباق داده شده‌اند. طیف آیین‌نامه‌ی ایران بر اساس زمین نوع III و پهنه با خطر نسبی زیاد (A = ۰٫۳) ترسیم شده است. در شکل ۹، طیف طراحی استاندارد شماره‌ی ۲۸۰۰ و طیف میانگین انطباق داده شده و انطباق داده نشده‌ی ۱۲ شتاب‌نگاشت انتخابی

که در آن، $S_a(T_f, \xi)$ شتاب طیفی در دوره‌ی تناوب T_f و میرایی ذاتی ξ است و V_{bf} مقاومت سیستم الاستوخمیری معادل است. بنابراین، مقدار V_{bf} به جابه‌جایی هدف و سختی ثانویه‌ی سیستم بستگی دارد. با توجه به رفتار غیرخطی سیستم‌های NSD و RBMAP-S نشان داده شده در بخش قبل، پارامترهای α و β برای رسم طیف عملکرد مطابق روابط ۹ و ۱۰ تعریف می‌شوند:

$$\alpha = K_s / K_f \quad (۹)$$

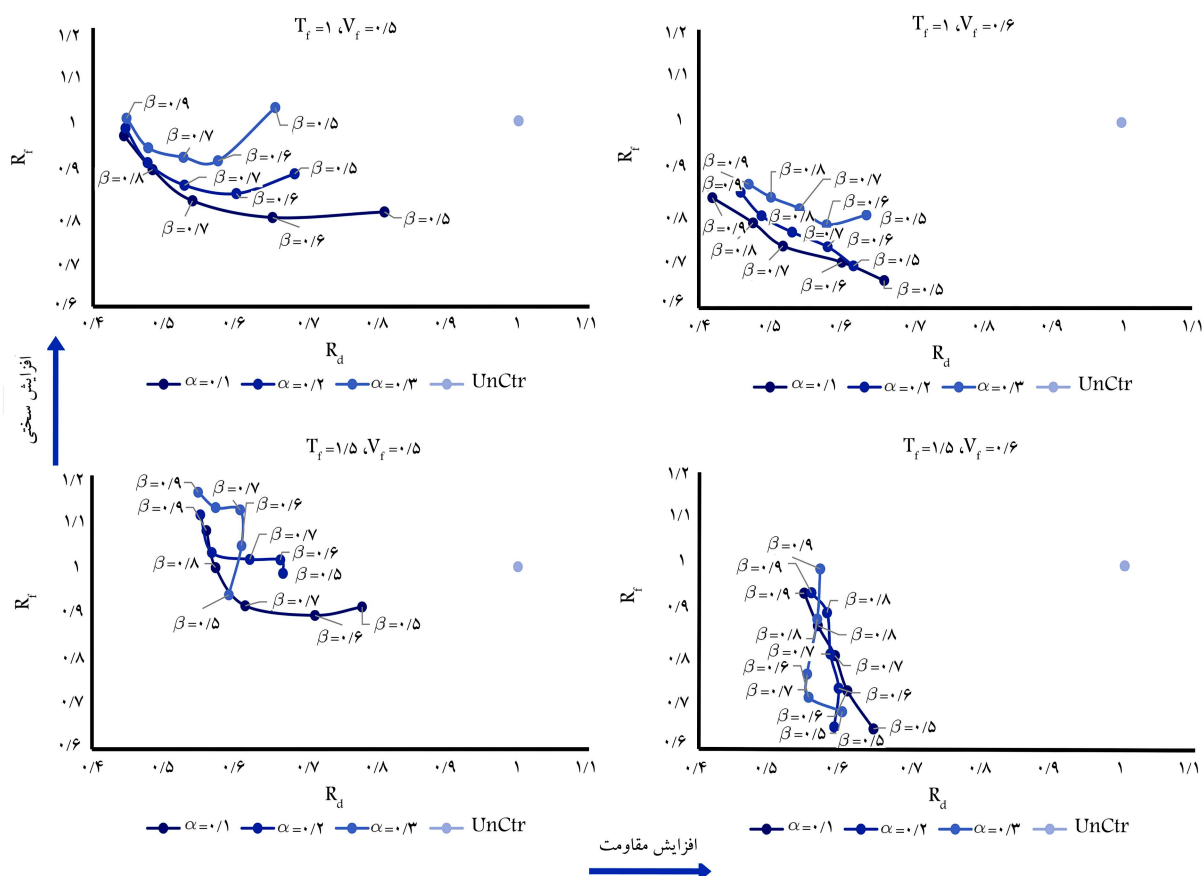
$$\beta = F_{yn} / F_{yo} \quad (۱۰)$$

که در آنها، K_s سختی فنر فشرده، K_f سختی سازه‌ی یک درجه آزادی، F_{yn} نیروی تسلیم سیستم سختی منفی و سازه F_{yo} نیروی تسلیم سازه هستند. در مورد سیستم RBMAP-S، به جای استفاده از پارامتر α از پارامتر θ ، که میزان دوران اولیه‌ی فنر پیچشی را نشان می‌دهد، استفاده می‌شود. همچنین پارامترهای بدون بُعد R_d و R_f (مطابق روابط ۱۱ و ۱۲)، برای به دست آوردن نسبت جابه‌جایی و نیروی تسلیم و کارایی عملکرد سیستم در نظر گرفته شده‌اند:

$$R_d = D_{N+f} / D_f \quad (۱۱)$$

$$R_f = F_{N+f} / F_f \quad (۱۲)$$

که در آنها، R_d و R_f نسبت بیشینه‌ی جابه‌جایی و برش پایه‌ی سازه‌ی مجهز به سیستم سختی منفی به بیشینه‌ی جابه‌جایی و برش پایه‌ی سازه، $D_{(N+f)}$ و $F_{(N+f)}$ به ترتیب بیشینه‌ی جابه‌جایی و برش پایه‌ی سازه‌ی مجهز به سیستم سختی منفی، D_f و F_f به ترتیب بیشینه‌ی جابه‌جایی و برش پایه‌ی سازه‌ی اولیه هستند. طیف عملکرد، نموداری است که پاسخ‌های نرمال شده‌ی R_f را در برابر R_d به‌ازاء پارامترهای مختلف α و β برای V_f های مختلف ترسیم می‌کند. طیف عملکرد با استفاده از پاسخ‌های میانگین تحلیل تاریخی‌های زمانی غیرخطی توسط ۱۲ شتاب‌نگاشت رسم می‌شود. شتاب‌نگاشت‌ها مبتنی بر موارد میدان دور معرفی شده در دستورالعمل FEMAP - ۶۹۵ انتخاب شده‌اند.^[۲۷] در جدول ۱، فهرست شتاب‌نگاشت‌ها و ویژگی‌های آن‌ها، از قبیل: نوع گسل، فاصله‌ی سایت تا کانون زلزله و بیشینه‌ی شتاب ثبت شده (PGA) را که در مطالعه‌ی حاضر استفاده شده‌اند، ارائه شده است.



شکل ۱. ماتریس نمودارهای طیف عملکرد برای سخت‌شوندگی و افزایش مقاومت سازه‌ی مجهز به سیستم سختی منفی NSD.

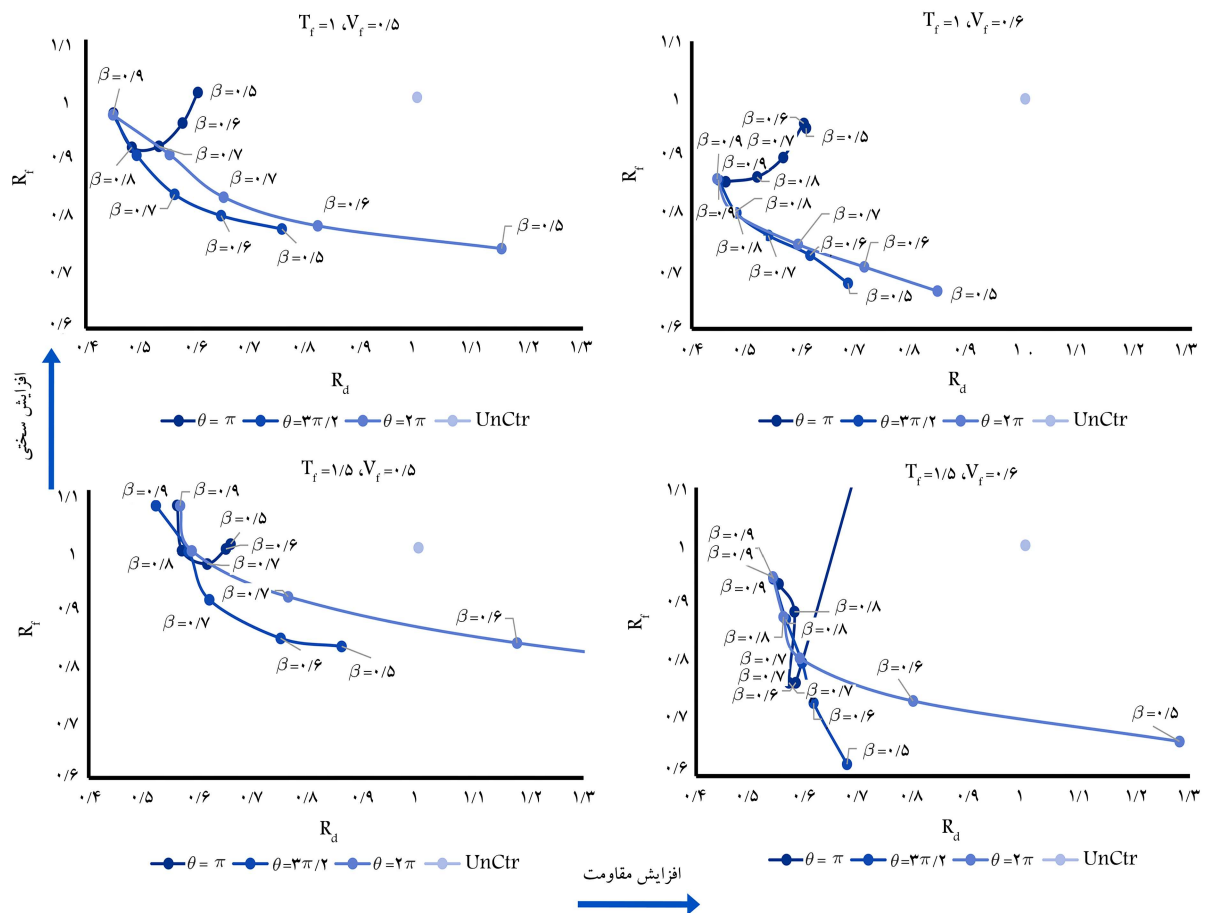
۴. بررسی طیف عملکرد بر روی پل بزرگراهی معیار

برای کنترل نتایج به دست آمده در مرحله‌ی قبل و استفاده از طیف‌های عملکرد رسم شده، از یک پل بزرگراه معیار واقع شده در کالیفرنیا استفاده شده است. آگراوال و تان^[۳۰] (۲۰۰۴)، مدل پل بزرگراهی را ارائه کرده‌اند، که تقاطع جدید ۵/۹۱ بوده و در منطقه‌ی اورنج در جنوب کالیفرنیا واقع شده است. در شکل ۱۲، تصویر پل به همراه پلان و برش پل مشاهده می‌شود. پل مذکور، یک پل جعبه‌یی با تیرهای بتنی پیش‌تنیده با دو دهانه‌ی پیوسته است، که دو دهانه دارد و طول هر دهانه، ۵۸/۵ متر بر روی یک بزرگراه چهارخطه با دو تکیه‌گاه ۳۳ درجه است. عرض عرشه در امتداد دهانه‌ی شرقی، ۱۲/۹۵ متر و ۱۵ متر در جهت غرب است. عرشه توسط یک پایه‌ی پیش‌تنیده به طول ۳۱/۴ متر و ۶/۹ متر نگهداری می‌شود، که بر روی دو گروه شمع قرار دارد و هر گروه از ۴۹ شمع اصطکاکی بتنی تشکیل شده است. ارتفاع ستون‌ها تقریباً ۶/۹ متر است. عرشه‌ی پل با استفاده از ۴ تکیه‌گاه الاستومری غیرلرزه‌یی در هر تکیه‌گاه جداسازی می‌شود و در مجموع ۸ عدد جداگر بین تکیه‌گاه‌های انتهایی و عرشه نصب شده‌اند. در مدل ایجاد شده از پل، برای جایگزینی ۸ تکیه‌گاه الاستومری غیرلرزه‌یی از جداسازهای لاستیکی سرب‌بی استفاده شده است، زیرا جداگرهای لرزه‌یی می‌توانند عملکرد لرزه‌یی را بهبود بخشند. با این حال، در مطالعه‌ی حاضر، دستگاه‌های کنترلی سختی منفی بین عرشه و تکیه‌گاه‌های انتهایی پل نصب شدند تا عملکرد آن‌ها بررسی شود. برای مدل‌سازی در محیط متلب^{۲۳}، جرم و سختی المان‌ها در گره‌های سازه متمرکز شدند تا ماتریس‌های سختی و جرم کلی در متلب ایجاد شوند. سپس عناصر غیرخطی

مشاهده می‌شود. طیف میانگین اخیر برای سازه‌های با دوره‌ی تناوب ۱/۵ ثانیه انطباق داده شده است. تحلیل‌های تاریخیچه‌ی زمانی برای $V_f = 0.7 - 0.4$ ، $T_f = 0.5 - 2$ و $\beta = 0.9 - 0.5$ ، $\alpha = 0.1 - 0.3$ است.

طیف عملکرد دو نوع سیستم سختی منفی NSD و RBMAP-S برای ۱/۵، $T_f = 1.0$ و $V_f = 0.5, 0.6$ در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ ترسیم شده‌اند. برای جلوگیری از جابه‌جایی‌های زیاد سازه در اثر کاهش سختی و جلوگیری از ناپایداری سیستم، یک میراگر ویسکوز با نسبت میرایی ۲۰٪ به موازات سیستم سختی منفی استفاده شده است. نقطه‌ی $R_d = R_f = 1/0$ عملکرد قاب بدون سیستم کنترلی است، که به صورت یک نقطه به نمایش گذاشته شده است.

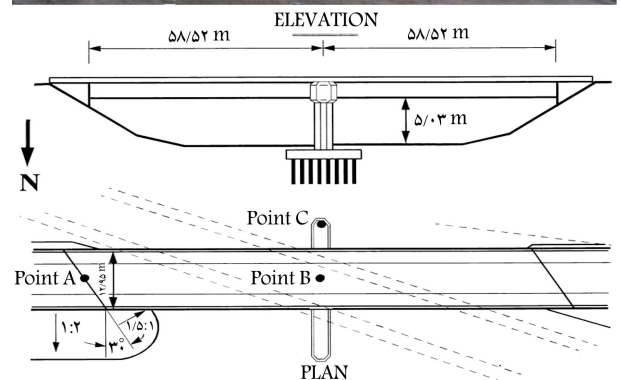
شکل‌های ۱۰ و ۱۱ به شکل ماتریس مرتب شده‌اند، که امکان بررسی دامنه‌ی وسیع‌تری از احتمالات را فراهم می‌کنند. همان‌طور که در طیف عملکرد در شکل ۱۰ ملاحظه می‌شود، در سیستم NSD، تغییر پارامتر α تأثیر کمی در مشخصات سیستم دارد و تغییرات β ، پاسخ را بیشتر کنترل می‌کند؛ بنابراین، پارامتر اصلی در طراحی NSD، نیروی پیش‌فشارده‌ی فتر است. همچنین در طیف عملکرد سیستم RBMAP-S در شکل ۱۱، علاوه بر β ، نقش θ نیز در طراحی سیستم مؤثر است. با افزایش مقاومت و سختی سازه، تأثیر سیستم کنترلی افزایش می‌یابد. با افزایش سختی، تأثیر میراگر ویسکوز در کاهش جابه‌جایی کاهش می‌یابد. با استفاده از طیف‌های عملکرد با توجه به مشخصات سازه و پاسخ هدف می‌توان مشخصات سیستم کنترلی را بدون نیاز به سعی و خطا به دست آورد.



شکل ۱۱. ماتریس نمودارهای طیف عملکرد برای سخت‌شوندگی و افزایش مقاومت سازه‌ی مجهز به سیستم سختی منفی S – RBMAP.

به مدل پل اضافه شده‌اند. به هر جرم متمرکز گره‌ی عرشه و کوله، ۶ درجه آزادی دینامیکی اختصاص داده شده است. عرشه‌ها و کوله‌ها، با فرض صلب بودن، با استفاده از المان‌های سه درجه آزادی (دو انتقالی و یک پیچشی) مدل شده‌اند. رفتار لنگر-انحنای غیرخطی دو ستون مرکزی با یک مدل دوخطی مدل‌سازی شده است. برای ساده‌سازی، روابط نیرو-تغییر مکان برای رفتار محوری، برشی و پیچشی خطی فرض شده و فقط دو رابطه‌ی لنگرخمش - انحنای دوخطی در نظر گرفته شده است. همچنین اندرکشی بین بار محوری و لنگرخمش در حین زلزله در نظر گرفته نشده است. علاوه بر این، پاسخ‌های غیرخطی در هر دو جهت مستقل در نظر گرفته شده‌اند. مدل غیرخطی کامل پل، ۴۳۰ درجه آزادی دارد، که برای ارزیابی پل استفاده می‌شود. از ارائه‌ی مدل غیرخطی پل به دلیل اختصار خودداری و فقط منبع آن ذکر شده است.^[۳۰]

از آن‌جا که پاسخ‌های پل معیار، در دسترس بوده و نتایج آن بررسی شده است، به دلیل اختصار از ارائه‌ی نتایج راستی‌آزمایی آن خودداری شده است.^[۳۰] برای بررسی عملکرد پل بزرگراهی معیار و به دست آوردن مشخصات دینامیکی پل، آنالیز مودال بر روی پل صورت گرفته و در جدول ۲، مشخصات مدهای غالب پل ارائه شده است؛ که مطابق آن، اولین مود غالب انتقالی سازه‌ی پل، مود ۴ با دوری تناوب ۰/۵۹ ثانیه است. بنابراین، می‌توان از طیف عملکرد با دوری تناوب ۰/۵ ثانیه با دقت مناسبی استفاده کرد. سختی اولیه، ۵۰۰۰ KN/m و مقاومت تسلیم ۳۳۳/۳۳ KN بوده است. لذا با توجه به مشخصات سازه براساس دوری تناوب و طیف طراحی، مقدار $V_f = ۰/۵۷$ به دست آمده است. همچنین با درون‌یابی



شکل ۱۲. (الف) پل بزرگراهی معیار، (ب) پلان و برش پل.^[۲۶]

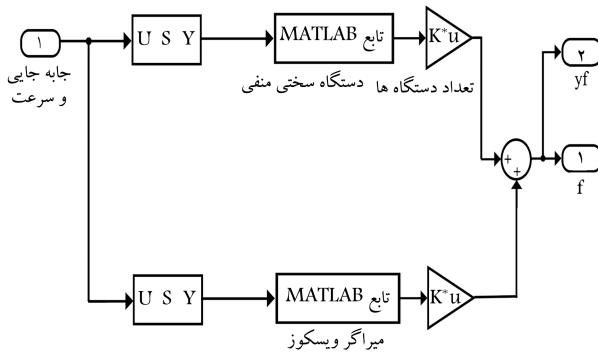
جدول ۲. مشخصات مدهای غالب پل بزرگراهی. [۲۶]

شماره ی مود	نوع مود	دوره ی تناوب (ثانیه)
۱	پیچشی	۰/۸۱
۲	پیچشی + عمودی	۰/۷۸
۳	عمودی	۰/۶۵
۴	انتقالی	۰/۵۹
۵	عمودی	۰/۵۶

جدول ۳. فهرست معیارهای ارزیابی. [۲۶]

نرم پاسخ	پاسخ حداکثر
برش پایه $J_e = \max \left\{ \frac{\max_t \ F_{bi}(t)\ }{\ F_{ob}^{max}\ } \right\}$	برش پایه $J_1 = \max \left\{ \frac{\max_{i,t} F_{bi}(t) }{F_{ob}^{max}} \right\}$
لنگر واژگونی $J_v = \max \left\{ \frac{\max_t \ M_{bi}(t)\ }{\ M_{ob}^{max}\ } \right\}$	لنگر واژگونی $J_r = \max \left\{ \frac{\max_{i,t} M_{bi}(t) }{M_{ob}^{max}} \right\}$
جابه جایی در وسط دهانه $J_\lambda = \max \left\{ \max_t \left\ \frac{y_{mi}(t)}{y_{0m}^{max}} \right\ \right\}$	جابه جایی در وسط دهانه $J_r = \max \left\{ \max_{i,t} \left \frac{y_{mi}(t)}{y_{0m}^{max}} \right \right\}$
شتاب در وسط دهانه $J_\lambda = \max \left\{ \max_t \left\ \frac{\ddot{y}_{mi}(t)}{\ddot{y}_{0m}^{max}} \right\ \right\}$	شتاب در وسط دهانه $J_r = \max \left\{ \max_{i,t} \left \frac{\ddot{y}_{mi}(t)}{\ddot{y}_{0m}^{max}} \right \right\}$
جایجایی جداساز $J_{\lambda,1} = \max \left\{ \max_t \left\ \frac{y_{bi}(t)}{y_{ob}^{max}} \right\ \right\}$	جایجایی جداساز $J_o = \max \left\{ \max_{i,t} \left \frac{y_{bi}(t)}{y_{ob}^{max}} \right \right\}$

دستگاه های کنترل



شکل ۱۳. مدل NSD در محیط SIMULINK.

متلب انجام شده و نتایج معیارهای ارزیابی به دست آمده است. در شکل ۱۳، مدل دستگاه کنترل در محیط SIMULINK مشاهده می شود.

در جدول های ۴ و ۵، نیز نتایج معیارهای ارزیابی برای سیستم های سختی منفی در دو نوع سیستم NSD و RBMAP-S ارائه شده است. همان طور که ملاحظه می شود، دستگاه سختی منفی NSD، ۳۳٪ و سیستم RBMAP-S، ۲۱٪ میزان برش پایه را کاهش داده اند. همچنین دستگاه سختی منفی NSD باعث کاهش ۳۳٪ و سیستم RBMAP-S، ۲۰٪ در میزان لنگر واژگونی شده اند. جابه جایی در وسط دهانه ی دستگاه سختی منفی NSD، ۳۵٪ و در وسط دهانه ی سیستم RBMAP-S، ۲۷٪ کاهش و نیز شتاب در وسط دهانه ی دستگاه سختی منفی NSD، ۱۵٪ کاهش و در وسط دهانه ی سیستم RBMAP-S، ۱۸٪ افزایش یافته است. در نتیجه، در مقایسه بین دو دستگاه اخیر، دستگاه NSD عملکرد بهتری در کنترل پاسخ های پل از خود نشان داده است.

۵. نتیجه گیری

در نوشتار حاضر، طیف عملکرد برای دو نوع دستگاه سختی منفی به صورت فنر پیش فشرده ی خطی و دورانی ارائه شده است. طیف مذکور در دوره های تناوب ۰/۵ تا ۲/۵ ثانیه، که دوره ی تناوب غالب سازه هاست، بر اساس پارامترهای دینامیکی مختلف دستگاه سختی منفی ترسیم شده است. پارامترهای مذکور، شامل نسبت نیروی تسلیم شونده ی مجموع دستگاه سختی منفی به نیروی تسلیم سازه ی اولیه در هر دو سیستم است. علاوه بر این، نسبت سختی فنر فشرده به سختی سازه در سیستم NSD و میزان زاویه ی دوران اولیه ی فنر پیچشی در RBMAP-S نیز به عنوان پارامترهای کنترلی در نظر گرفته شده است. ماتریس نمودارهای طیف عملکرد برای دوره ی تناوب ۱/۵ ثانیه برای هر دستگاه ترسیم شده است. با توجه به نمودارهای ترسیم شده ملاحظه می شود که پارامترهای انتخابی دستگاه تا حد مطلوبی عملکرد دستگاه را به نمایش می گذارند و می توان بر اساس طیف عملکرد ارائه شده، به طراحی دستگاه های سختی منفی بدون سعی و خطا پرداخت. بر اساس طیف های ترسیم شده ملاحظه می شود که سیستم NSD عمدتاً توسط β یعنی نیروی پیش فشرده ی فنر دستگاه کنترل می شود، ولی در سیستم RBMAP-S علاوه بر β ، نقش θ در کنترل سازه و نیز انتخاب میزان دوران اولیه ی فنر پیچشی در عملکرد دستگاه تأثیرگذار هستند. با افزایش مقاومت و سختی سازه، تأثیر سیستم کنترلی افزایش یافته است. می توان نتیجه گرفت که با افزایش سختی، تأثیر

از طیف های عملکرد با $V_f = 0.5$ ، $V_f = 0.6$ ، می توان پارامترهای طراحی سیستم های سختی منفی را به دست آورد. با استفاده از طیف های عملکرد برای سیستم NSD، $\beta = 0.7$ و $\alpha = 0.3$ برای سیستم RBMAP-S، $\beta = 0.7$ و $\theta = 3\pi/2$ ، مشخصات اختیار شده اند. بنابراین، بر اساس پارامترهای اخیر و روابط ۹ و ۱۰، مشخصات دستگاه های سختی منفی طراحی شده است.

برای ارزیابی عملکرد لبرزه یی پل تحت ۱۲ شتاب نگاشت انتخابی و مقایسه ی رفتار پل قبل و بعد از استفاده از سیستم های سختی منفی، مجموعه یی از چند معیار ارزیابی برای بررسی اثربخشی دستگاه ها توسعه داده شده است. ۵ معیار ارزیابی اول، برای اندازه گیری کاهش در مقادیر پاسخ پیشینه ی پل معیار تعریف شده اند، که فهرست آن ها در جدول ۳ ارائه شده است.

مجموعه ی دوم، از ۵ معیار براساس نرم پاسخ ها در کل مدت زمان یک زلزله است. مقدار نرم پاسخ به صورت رابطه ی ۱۳ است:

$$\|.\| = \sqrt{\frac{1}{t_f} \int_0^{t_f} (.)^2 dt} \quad (13)$$

مدل سازی پل و سیستم های سختی منفی در محیط SIMULINK در نرم افزار

جدول ۴. نتایج معیارهای ارزیابی پل بزرگراهی معیار بر اساس سیستم کنترل سختی منفی NSD.

میانگین	نام رکورد											معیار ارزیابی
	Fruiuly	San Fernando	Chi Chi	Superstition	Manjil	Loma Prieta	Landers	Kocaeli	Kobe	Imperial Valley	Duzce	Northridge
۰/۶۷۰	۰/۷۵۱	۱/۰۴۹	۰/۴۷۹	۰/۶۱۱	۰/۶۶۰	۰/۷۹۷	۰/۴۰۴	۰/۴۴۸	۰/۸۷۲	۰/۵۶۳	۰/۸۵۲	۰/۵۵۱
۰/۶۷۰	۰/۸۱۰	۱/۰۲۹	۰/۴۸۶	۰/۵۹۵	۰/۶۵۰	۰/۷۹۸	۰/۴۱۰	۰/۴۳۵	۰/۸۶۵	۰/۵۴۳	۰/۸۸۹	۰/۵۳۴
۰/۶۵۳	۰/۶۸۱	۰/۹۹۰	۰/۷۴۱	۰/۷۷۹	۰/۶۷۲	۰/۸۰۰	۰/۳۶۶	۰/۳۵۰	۰/۶۴۸	۰/۳۲۹	۰/۷۹۵	۰/۶۸۵
۰/۸۵۶	۱/۰۵۹	۰/۸۰۳	۰/۶۳۶	۱/۰۶۶	۰/۸۶۴	۰/۷۸۸	۰/۵۸۵	۰/۵۷۹	۰/۷۷۲	۱/۰۲۴	۱/۲۴۸	۰/۸۴۵
۰/۶۵۲	۰/۶۶۹	۰/۹۹۹	۰/۷۱۴	۰/۷۸۰	۰/۶۷۵	۰/۸۴۰	۰/۳۶۲	۰/۳۳۸	۰/۶۵۲	۰/۳۲۲	۰/۷۸۸	۰/۶۸۳
۰/۵۸۸	۰/۳۹۱	۱/۲۵۸	۰/۵۵۴	۰/۶۱۷	۰/۴۶۷	۰/۶۳۲	۰/۳۰۸	۰/۴۹۸	۰/۹۰۰	۰/۳۸۸	۰/۵۸۶	۰/۴۵۵
۰/۵۸۴	۰/۳۸۷	۱/۲۵۷	۰/۵۵۱	۰/۶۰۸	۰/۴۶۲	۰/۶۲۶	۰/۳۰۹	۰/۴۹۲	۰/۸۹۷	۰/۳۸۲	۰/۵۸۲	۰/۴۵۲
۰/۷۶۶	۰/۶۱۸	۲/۶۵۱	۱/۱۲۵	۰/۷۷۰	۰/۴۹۱	۰/۶۵۱	۰/۳۳۸	۰/۳۱۳	۰/۸۸۱	۰/۱۸۹	۰/۷۵۱	۰/۵۱۶
۰/۹۲۰	۱/۰۴۲	۰/۹۷۱	۰/۸۲۸	۱/۱۱۸	۰/۹۸۸	۰/۹۰۶	۰/۶۰۵	۰/۷۶۵	۰/۹۳۳	۰/۹۰۷	۱/۱۱۳	۰/۸۶۵
۰/۷۶۶	۰/۶۰۸	۲/۶۸۳	۱/۱۴۲	۰/۷۸۸	۰/۴۸۹	۰/۶۱۸	۰/۳۳۶	۰/۳۰۳	۰/۸۸۴	۰/۱۸۱	۰/۷۴۳	۰/۵۱۳

جدول ۵. نتایج معیارهای ارزیابی پل بزرگراهی معیار بر اساس سیستم کنترل سختی منفی RBMAP - S.

میانگین	نام رکورد											معیار ارزیابی
	Fruiuly	San Fernando	Chi Chi	Superstition	Manjil	Loma Prieta	Landers	Kocaeli	Kobe	Imperial Valley	Duzce	Northridge
۰/۷۸۸	۰/۸۲۷	۱/۱۰۳	۰/۵۵۹	۰/۶۱۱	۰/۷۲۸	۱/۰۹۷	۰/۴۴۱	۰/۵۶۴	۰/۸۷۲	۰/۶۹۱	۱/۳۱۶	۰/۶۵۱
۰/۸۰۱	۰/۸۱۱	۱/۰۸۴	۰/۵۶۳	۰/۶۰۱	۰/۷۲۰	۱/۰۹۴	۰/۴۵۲	۰/۵۷۳	۰/۸۶۰	۰/۷۱۸	۱/۴۳۹	۰/۶۹۷
۰/۶۲۷	۰/۶۷۸	۰/۸۳۲	۰/۷۲۳	۰/۷۰۶	۰/۶۸۸	۱/۰۵۶	۰/۲۵۶	۰/۳۵۸	۰/۶۰۸	۰/۳۷۲	۰/۶۶۷	۰/۵۸۴
۱/۱۸۵	۰/۹۹۵	۰/۸۲۷	۰/۸۵۱	۱/۵۴۲	۱/۲۳۸	۱/۴۸۰	۰/۵۸۸	۰/۸۸۳	۱/۶۱۱	۱/۰۹۸	۱/۳۴۷	۱/۷۵۸
۰/۶۳۴	۰/۶۷۵	۰/۸۵۰	۰/۷۴۰	۰/۶۹۲	۰/۶۹۰	۱/۰۵۰	۰/۲۶۸	۰/۳۴۳	۰/۵۸۴	۰/۳۷۰	۰/۷۸۹	۰/۵۶۰
۰/۷۸۶	۰/۴۱۴	۱/۴۹۳	۰/۶۲۶	۰/۶۴۴	۰/۴۳۶	۱/۲۲۰	۰/۳۵۶	۰/۵۶۰	۰/۴۷۸	۰/۵۷۶	۱/۹۷۱	۰/۶۶۱
۰/۷۸۳	۰/۴۱۱	۱/۴۹۲	۰/۶۲۳	۰/۶۳۷	۰/۴۳۱	۱/۲۱۳	۰/۳۵۷	۰/۵۵۶	۰/۴۷۲	۰/۵۷۲	۱/۹۶۷	۰/۶۵۹
۰/۸۹۸	۰/۷۳۳	۲/۹۳۹	۱/۱۴۴	۰/۶۹۶	۰/۶۶۰	۱/۷۶۷	۰/۱۵۶	۰/۳۰۵	۰/۵۰۰	۰/۳۶۶	۱/۱۳۱	۰/۳۸۳
۱/۰۱۳	۱/۰۶۳	۱/۰۱۸	۰/۹۲۲	۱/۱۴۸	۱/۰۳۱	۱/۱۰۲	۰/۶۰۶	۰/۸۷۳	۱/۲۱۷	۰/۹۴۱	۱/۱۸۶	۱/۰۵۵
۰/۹۰۶	۰/۷۴۳	۲/۹۶۷	۱/۲۰۲	۰/۶۹۳	۰/۷۰۳	۱/۶۹۹	۰/۱۸۴	۰/۳۰۲	۰/۴۹۰	۰/۳۶۶	۱/۱۴۲	۰/۳۸۱

روش طراحی، با استفاده از پارامترهای بهینه، نتایج مطلوب تری از حالتی که از طیف عملکرد استفاده نمی‌شود، به دست می‌آید. همچنین در بررسی حاضر، دستگاه NSD عملکرد بهتری در کاهش پاسخ‌ها نسبت به دستگاه RBMAP-S نشان داده است. با استفاده از سیستم سختی منفی به همراه میراگر ویسکوز، می‌توان هم‌زمان مقدار برش پایه، لنگر واژگونی و جابه‌جایی سازه را تا حدود ۳۰٪ کاهش داد، که این خود باعث کاهش خسارت در این زیرساخت حیاتی می‌شود.

میراگر ویسکوز در کاهش جابه‌جایی کاهش می‌یابد. برای بررسی عملکرد سیستم ذکر شده در کنترل رفتار سازه‌ی پل، مدل سیستم‌های سختی منفی به همراه میراگر ویسکوز در ابتدا با توجه به مشخصات دینامیکی پل از روی طیف عملکرد طراحی شده و سپس بر اساس پارامترهای به دست آمده بر روی پل بزرگراهی جداسازی شده معیار در نرم‌افزار متلب مدل‌سازی شده است. نتایج نشان داد که استفاده از طیف عملکرد، روشی آسان و کاربردی برای طراحی سیستم‌های کنترلی، از جمله سیستم سختی منفی است؛ که علاوه بر حذف سعی و خطا از

پانویس‌ها

1. Yao
2. Self-Centring
3. Negative Stiffness

4. Iemura
5. Nagarajaiah
6. Tokooya
7. Liu & Zhou
8. Shape Memory Alloy
9. Huan Li

10. Sun
11. Zhao & Wang
12. Negative Stiffness Inerter Damper
13. Li
14. Xiang shi
15. Salvatore
16. Guo & Christopoulos
17. Negative Stiffness Device
18. Nagarajaiah
19. Rotation-Based Mechanical Adaptive Passive Device
20. Guo & Christopoulos
21. Abrahamson
22. Agrawal & Tan
23. MATLAB

منابع (References)

1. Yao, J.T.P. "Concept of structural control", *Journal of the Structural Division*, **98**(7), pp.1567-1574 (1972).
2. Iemura, H. and Igarashi, A. "Negative stiffness friction damping for seismically isolated structures", *Structural Control and Health Monitoring*, **13**(2-3), pp.775-791 (2005).
3. Pasala, D.T.R. and Nagarajaiah, S. "A New structural modification approach for seismic protection using negative stiffness device", *15 WCEE* (2012).
4. Sarlis, A.A. and Nagarajaiah, S. "Negative stiffness device for seismic protection of structures - an analytical and experimental study", *3rd ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering* (2011).
5. Sarlis, A.A. and Nagarajaiah, S. "Negative stiffness device for seismic protection of structures", *Journal of Structural Engineering*, **139**(7), pp.1124-1133 (2012).
6. Attary, N., Symans, M. and Nagarajaiah, S. "Numerical simulations of a highway bridge structure employing passive negative stiffness device for seismic protection", *Earthquake Engng Struct. Dyn.*, **44**(6), pp. 973-995 (2014).
7. Attary, N., Symans, M. and Nagarajaiah, S. "Development of a rotation-based negative stiffness device for seismic protection of structures", *Journal of Vibration and Control*, pp. 1-15 (2015).
8. Toyooka, A., Motoyama, H., Kouchiyama, O. and et al. "Development of autonomous negative stiffness damper for reducing absolute responses", *QR of RTRI*, **56**(4), pp. 284-290 (2015).
9. Zhou, P. and Li, H. "Modeling and control performance of a negative stiffness damper for suppressing stay cable vibrations", *Structural Control and Health Monitoring*, **23**(4), pp. 764-782 (2015).
10. Liu, M. and Zhou, P. "Novel self-centering negative stiffness damper based on combination of shape memory alloy and prepressed springs", *Journal of Aerospace Engineering*, **31**(6), 1950058 (2018).
11. Li, H. and Li, J. "Modified adaptive negative stiffness device with variable negative stiffness and geometrically nonlinear damping for seismic protection of structures", *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, **21**(08), 2150107 (2021).
12. Sun, F. and Wang, M. "Multi-objective optimal design and seismic performance of negative stiffness damped outrigger structures considering damping cost", *Engineering Structures*, **229**, 111615 (2021).
13. Zhao, Z. and Wang, Y. "Seismic performance upgrading of containment structures using a negative-stiffness amplification system", *Engineering Structures*, **262**, 114394 (2022).
14. Naqeeb Ul Islam, R. and Jangid, S. "Optimum parameters and performance of negative stiffness and inerter based dampers for base-isolated structures", *Bulletin of Earthquake Engineering* (2022).
15. Iemura, H. and Pradono, M.H. "Application of pseudo-negative stiffness control to the benchmark cable-stayed bridge", *Journal of Structural Control*, **10**(3-4), pp.187-203 (2003).
16. Li, H. and Askari, M. "A novel structural seismic protection system with negative stiffness and controllable damping", *Structural Control and Health Monitoring*, **28**(10), e2810 (2021).
17. Shi, X. and Zhao, F. "High-performance vibration isolation technique using passive negative stiffness and semiactive damping", *Earthquake Engineering and Resilience*, **36**(8), pp. 1034-1055 (2021).
18. Salvatore, A. and Carboni, B. "Nonlinear dynamic response of an isolation system with superelastic hysteresis and negative stiffness", *Nonlinear Dynamics*, **107**, pp. 1765-1790 (2022).
19. Li, H. and Li, J. "A quasi-active negative stiffness damper for structural vibration control under earthquakes", *Mechanical Systems and Signal Processing*, **173**, 109071 (2022).
20. Ejabati, S.M. and Bahar, A. "Passive control of isolator-based structures using negative stiffness device", *2ed International Conference on Geotechnics and Seismic Engineering*, (In Persian) (1393/2015).
21. Tehranizadeh, M. and Taghikhani, T. "Performance of semi-active control systems in seismic protection of sensitive equipment using negative stiffness algorithm", *The 4th National Congress of Civil Engineering* (In Persian) (1386/2008).
22. ASCE/SEI 7-16. "Minimum design loads and associated criteria for buildings and other structures", American Society of Civil Engineers (2016).
23. ASCE/SEI 41-17. "Seismic evaluation and retrofit of existing buildings", American Society of Civil Engineers (2017).
24. FEMA450. "NEHRP recommended provisions for seismic regulations for new buildings and other structures", Building Seismic Safety Council National Institute of Building Sciences, Washington D.C. (2003).
25. Guo, J.W.W. and Christopoulos, C. "Performance spectra based method for the seismic design of structures equipped with passive supplemental damping systems", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **4**(6), pp. 9.0-90 (2012).
26. Guo, J.W.W. and Christopoulos, C. "A procedure for generating performance spectra for structures equipped with passive supplemental dampers", *Earthquake Engng Struct. Dyn.*, **42**(9), pp. 1321-1338 (2013).

27. FEMA P695. "Quantification of building seismic performance factors", Federal Emergency Management Agency (2009).
28. Iranian Building Codes And Standards. "Iranian code of practice for seismic resistant design of buildings", Standard No.2800 4th Edition (2014).
29. Abrahamson, N.A. "Non-Stationary spectral matching", Seismological Research Letters, **63.1**(20), p.30 (1992).
30. Agrawal, A., Tan, P., Nagarajaiah, S. and et al. "Benchmark structural control problem for a seismically excited highway bridge, Part I: phase I problem definition", *National Science Foundation Grant*, **16**(5), pp. 509-529 (2009).