

کنترل نیمه فعال سازه‌ی جداساز لرزه‌یی
با استفاده از جداسازهای لغزشی انحناء متغیر

Original Article

سعید تقی‌زاده (دانشجوی دکتری)

عباس کریم‌الدین* (دانشیار)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی، مشهد

یکی از انواع رایج جداگرها، جداگرهای اصطکاکی پاندولی هستند. پژوهش‌ها نشان می‌دهند که استفاده از آن‌ها در زلزله‌های میدان نزدیک پاسخ‌ها همراه با تشدید خواهد بود. در سال‌های اخیر، پژوهشگران خاصیت تطبیق‌پذیری غیرفعال را در جداگرهای مذکور جای داده‌اند تا مشکل ایجاد پدیده تشدید در پاسخ‌های جداگر حل شود. در جداسازهای تطبیق‌پذیر به دلیل کاهش یافتن نیروی بازگرداندگی، جابه‌جایی جداساز افزایش می‌یابد. در نوشتار حاضر، دو نوع جداگر انحناء متغیر به نام‌های سیستم اصطکاکی پاندولی انحناء متغیر (VCFPS) و جداگر پاندولی بسامد متغیر (VFPI) در سازه‌ی معیار جداساز لرزه‌یی استفاده شده است. زلزله‌های اعمال شده در سازه‌ی مذکور در دو جهت افقی بوده و از مؤلفه‌ی قائم زلزله صرف‌نظر شده است. مدل سازه‌ی معیار جداساز لرزه‌یی به صورت سه بعدی است که در هر طبقه سه درجه آزادی دارد. تحلیل دینامیکی سازه‌ی معیار با روش شتاب میانگین ثابت نیومارک بتا انجام شده است. جداسازهای لرزه‌یی به صورت یکنواخت در سازه قرار گرفته و بررسی‌ها با استفاده از معیارهای ارزیابی و تاریخچه‌ی پاسخ سازه انجام شده است. مشاهده می‌شود که جداسازهای لغزشی متغیر به دلیل تغییر یافتن در خصوصیات جداساز نسبت به جداسازهای اصطکاکی پاندولی عملکرد بهتری دارند. به منظور کاهش دادن جابه‌جایی جداساز لرزه‌یی از روش کنترل نیمه فعال با استفاده از میراگر MR و کنترلر شبکه‌ی عصبی موجکی استفاده شده است. ولتاژ میراگر MR توسط الگوریتم کنترل محاسبه شده است تا نیروی کنترل بهینه‌ی سازه ایجاد شود. کنترلر ذکر شده توسط الگوریتم ژنتیک بهینه می‌شود. نتایج عددی نشان می‌دهند که استفاده از کنترل نیمه فعال برای کاهش جابه‌جایی جداساز لرزه‌یی در مقایسه با افزایش ضریب اصطکاکی سطح لغزش و کنترل غیرفعال مؤثرتر است.

واژگان کلیدی: جداساز لرزه‌یی انحناء متغیر (VCFPS)، جداساز لرزه‌یی بسامد متغیر (VFPI)، سازه‌ی معیار جداساز لرزه‌یی، کنترل نیمه فعال، شبکه‌ی عصبی موجک.

saeed.taghezadeh@mail.um.ac.ir
a-karam@um.ac.ir

۱. مقدمه

جداسازهای لرزه‌یی به عنوان یکی از قابل اعتمادترین وسایل برای حفاظت ساختمان‌ها در برابر زلزله شناخته شده‌اند. جداسازهای لرزه‌یی، لایه‌ی انعطاف‌پذیری (لایه با سختی جانبی کم) بین روسازه و پی سازه ایجاد می‌کنند که باعث می‌شود بسامد مد اول سازه از بسامد غالب زلزله فاصله گیرد و به این ترتیب مانع انتقال انرژی زلزله به سازه می‌شوند. سیستم‌های جداساز لرزه‌یی عموماً به دو دسته‌ی الاستومریک و لغزشی تقسیم‌بندی می‌شوند. در کاربردهای مهندسی زلزله، سیستم‌های جداساز لغزشی

ساده‌تر و قابل اعتمادتر شناخته شده‌اند. سیستم‌های جداساز لغزشی حساسیت کمتری به آثار لنگرهای پیچشی در ساختمان‌های نامنظم دارند.^[۱] بسیاری از مطالعاتی که تاکنون انجام شده‌اند، بر روی بررسی پاسخ‌های لرزه‌یی سازه‌ی مجهز به سیستم جداساز لغزشی و جابه‌جایی جداساز متمرکز شده‌اند.^[۲-۱۱] از میان سیستم‌های جداساز لغزشی، سیستم‌های اصطکاکی - پاندولی (FPS) رواج بیشتری دارند. سیستم‌های مذکور از یک سطح کروی تشکیل شده‌اند. سطح کروی با ایجاد نیروی بازگرداندگی باعث می‌شود جابه‌جایی باقیمانده در جداساز کاهش یابد. نیروی تولیدشده توسط جداسازهای FPS مستقل از بسامد زلزله است. بنابراین جداساز ممکن است برای برخی از زلزله‌های خاص (زلزله‌هایی که محتوای

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۴/۱۰/۱۳۹۵، اصلاحیه ۲۱/۳/۱۳۹۶، پذیرش ۳/۴/۱۳۹۶.

DOI:10.24200/J30.2018.1931.2020

جداسازهای MRE^۴ است. در جداسازهای MRE، به جای استفاده از ورقه‌های الاستومریک از ورقه‌های Elastomer MR استفاده می‌شود که به صورت یک در میان با ورقه‌های فلزی روی هم قرار می‌گیرند و با اعمال جریان الکتریکی، میدان مغناطیسی ایجاد می‌شود. با ایجاد میدان مغناطیسی، ورقه‌های MRE همانند میراگر MR عمل می‌کنند و با تغییر میدان مغناطیسی سختی و میرایی جداساز تغییر می‌کند. به دلیل خاصیت تطبیق پذیری و تغییر سختی و میرایی، جداساز MRE قابلیت تطبیق با زلزله‌های سطح سرویس، طرح و بیشترین زلزله‌ی متصور را دارد. پژوهش بر روی جداساز MRE هنوز در مراحل ابتدایی و آزمایشگاهی است.^[۱۹]

جداسازهای پاندولی بسامد متغیر (VFPI)^۵،^[۲۰] و سیستم‌های پاندولی اصطکاکی انحناء متغیر (VCFPS)^۶،^[۲۱] دو نوع از سیستم‌های لغزشی انحناء متغیر هستند. با توجه به مطالعات صورت گرفته مشاهده شده است که سیستم‌های VFPI و VCFPS در زلزله‌های میدان نزدیک، عملکرد بهتری نسبت به زلزله‌های میدان دور دارند و البته جابه‌جایی جداساز را افزایش می‌دهند و در مقابل شتاب، دررفت و برش روسازه را کاهش می‌دهند. که البته می‌توان برای کاهش جابه‌جایی جداساز از میراگرهای کمکی نظیر میراگرهای MR، ویسکوزو غیره استفاده کرد.

سازه‌ی معیار جداساز لرزه‌یی، ساختمان بیمارستان USC در کالیفرنیاست که پلان طبقات اول تا ششم به صوت L شکل و پلان طبقه‌های ۷ و ۸ آن به صورت مستطیل است. مدل سه بعدی اجزاء محدود سازه‌ی بیمارستان در نرم‌افزار متلب^۷ در سال ۲۰۰۴ تهیه شده است. سازه‌ی ذکر شده توسط کمیته‌ی کنترل سازه‌ی ASCE به عنوان سازه‌ی معیار جداساز لرزه‌یی انتخاب شده است، تا نتایج پژوهشگران با استفاده از سیستم‌های کنترل پیشنهادی و همچنین سیستم‌های جداساز مختلف، با یکدیگر قابل مقایسه باشد. در پژوهش حاضر، جداسازهای VFPI و VCFPS در سازه‌ی معیار جداساز لرزه‌یی بررسی شده‌اند. به منظور کاهش دادن جابه‌جایی جداساز لرزه‌یی و بهبود عملکرد رفتار سازه، از سیستم کنترل نیمه فعال شبکه‌ی عصبی موجکی و میراگر MR برای کنترل سازه و همچنین برای آموزش شبکه‌ی عصبی موجکی از الگوریتم ژنتیک استفاده شده است.

۲. سازه‌ی معیار جداساز لرزه‌یی

سازه‌ی معیار، یک ساختمان ۸ طبقه با مهاربندهای فلزی به طول ۸۲٫۴ متر، عرض ۵۴٫۳ متر و ارتفاع متوسط طبقات ۴٫۰۴ متر است که شبیه ساختمان بیمارستانی در لس آنجلس - کالیفرنیاست. پلان طبقات اول تا ششم، L شکل و طبقات هفتم و هشتم مستطیل شکل هستند. سقف طبقات به صورت عرشه‌ی فولادی است که به صورت یک کف صلب عمل می‌کند. مهاربندهای فلزی در پیرامون سازه تعبیه شده‌اند. جداسازهای لرزه‌یی سازه‌ی معیار در تراز پایه‌ی سازه قرار داده شده‌اند. روسازه بر روی پی بتن مسلحی قرار دارد که توسط لایه‌های جداساز از زمین جدا می‌شود. سازه از المان‌های خطی تیر، ستون، مهاربند و دال صلب تشکیل شده است. هر طبقه‌ی روسازه، ۳ درجه آزادی و مجموعاً ۲۴ درجه آزادی دارد. سیستم جداساز هم ۳ درجه آزادی دارد که مجموعاً سازه و سیستم جداساز ۲۷ درجه آزادی دارند. روسازه به صورت سیستم کشسان خطی با رفتار پیچش - جانبی عمل می‌کند. میرایی روسازه در تمام مدها ۵٪ است. زمان تناوب طبیعی سازه برای ۳ مد اول در جدول ۱ ارائه شده است. در شکل ۱، مدل سه بعدی سازه‌ی معیار و

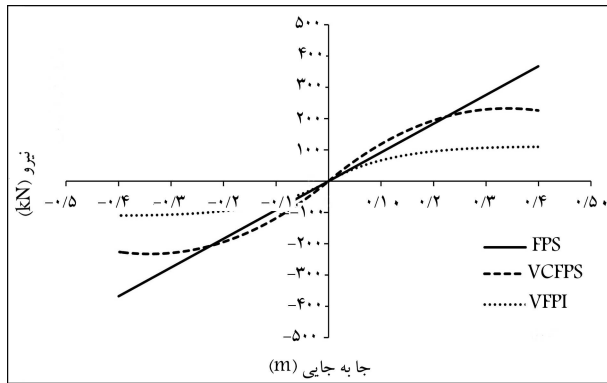
بسامدی آن‌ها با بسامد طراحی جداساز نزدیک باشد) نتواند عملکرد مطلوبی داشته باشد. در چنین مواقعی برای کاهش جابه‌جایی جداساز یا می‌توان از ضریب اصطکاک بیشتری برای طراحی جداساز استفاده کرد و یا شعاع انحناء سطح کروی جداساز را کم کرد. در هر صورت کاهش دادن جابه‌جایی جداساز با دو روش ذکر شده منجر به افزایش پاسخ‌های روسازه، نظیر: شتاب، دررفت و برش سازه می‌شود. کاهش شعاع انحناء جداساز باعث افزایش سختی جداساز و نیز افزایش مقدار نیروی بازگرداندگی و در نهایت، باعث افزایش شتاب و دیگر پاسخ‌های سازه می‌شود.

امروزه ایده‌ی استفاده از جداسازهای با خاصیت تطبیق پذیری غیرفعال پیشنهاد شده است. در سیستم‌های مذکور، سطح لغزش وابسته به جابه‌جایی جداساز است و شعاع انحناء برخلاف جداسازهای FPS که ثابت است، متغیر است و در آن‌ها به دلیل کاهش نیروی بازگرداندگی، جابه‌جایی جداساز را افزایش می‌دهند. کاهش یافتن نیروی بازگرداندگی منجر به بهبود پاسخ‌های شتاب، دررفت و سایر پاسخ‌های روسازه می‌شود. یک نمونه از سیستم‌های جداساز با خاصیت تطبیق پذیری غیرفعال، جداگرهای اصطکاکی پاندولی چندسطحی^۸ است. در جداگرهای اصطکاکی پاندولی چند سطحی، سطح لغزش از چند سطح با شعاع انحناء مختلف ساخته شده است که باعث می‌شود جداساز لرزه‌یی تحت شدت‌های مختلف زلزله (سطح سرویس، سطح طرح و بیشترین زلزله‌ی متصور) بهترین رفتار را از خود نشان دهد. برای اینکه جداساز لرزه‌یی جابه‌جایی‌های ناشی از زلزله‌های بزرگ را کنترل کند و همچنین عملکرد خوبی در زلزله‌های کوچک و متوسط داشته باشد، باید در مقابل زلزله‌های کوچک بسیار سخت باشد و میرایی کمی از خود نشان دهد و در مقابل زلزله‌های طرح، کمی نرم و با میرایی بیشتری عمل کند و همچنین در مقابل بیشترین زلزله‌ی متصور، کاملاً سخت و با میرایی زیادتری عمل کند. تمامی خصوصیات مطرح شده در جداگرهای چندسطحی مشاهده می‌شود که در مقایسه با سایر جداسازهای تطبیق پذیر از لحاظ طراحی، تولید و اجرا با مشکل کمتری مواجه خواهد شد. ولی تغییرات سختی به صورت پله پله و یا به عبارتی، غیرپیوسته انجام می‌شود و این زمانی است که سطح لغزش از یک سطح به سطح دیگر با شعاع متفاوت نسبت به سطح قبلی منتقل می‌شود.^[۱۲]

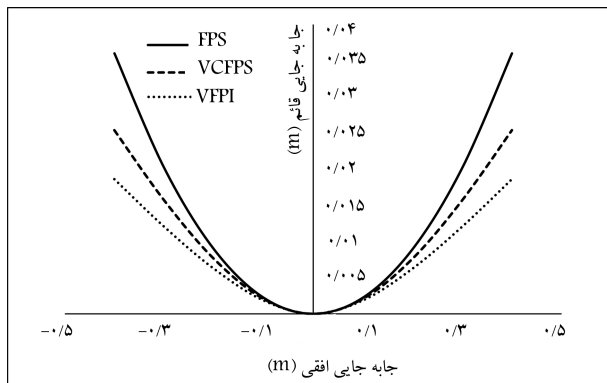
نوعی دیگر از جداسازهای تطبیق پذیر، جداگرهای اصطکاکی با ضریب اصطکاک متغیر^۹ هستند که در آن‌ها، ضریب اصطکاک سطح کروی تغییر می‌کند و تابعی بر حسب جابه‌جایی است. برای متغیر کردن ضریب اصطکاک در سطح کروی، زبری آن به صورت تدریجی در سطح کروی افزایش می‌یابد. تغییر ضریب اصطکاک در سطح کروی باعث ایجاد میرایی متغیر در سطح آن می‌شود. زمانی که مفصل لغزنده بر روی سطح کروی حرکت می‌کند، در شروع حرکت، درصد میرایی کم و همگام با افزایش جابه‌جایی درصد میرایی افزایش می‌یابد.^[۱۳-۱۵] نمونه‌ی دیگر از جداسازهای تطبیق پذیر، جداسازهای با انحناء متغیر^۳ هستند که در آن‌ها، شعاع سطح لغزش متغیر است. با توجه به اینکه سختی جداگرهای اصطکاکی به صورت معکوس به شعاع انحناء سطح وابسته است، با تغییر شعاع انحناء سختی نیز تغییر می‌کند. لذا می‌توان گفت که جداگر اصطکاکی با انحناء متغیر، سختی تطبیق پذیری دارد، که به صورت پیوسته بر حسب جابه‌جایی مفصل لغزشی در روی سطح تغییر می‌کند.^[۱۶] در پژوهشی در سال ۲۰۱۲،^[۱۸] رفتار ۲ مدل از جداساز اصطکاکی با انحناء متغیر بر روی سازه‌ی معیار جداساز لرزه‌یی بررسی و با استفاده از سیستم کنترل غیرفعال افزایش جابه‌جایی پایه کنترل شده است، که منجر به افزایش برش پایه، شتاب و جابه‌جایی نسبی طبقات می‌شود. نمونه‌ی دیگر از جداسازهای تطبیق پذیر،

جدول ۱. زمان تناوب سازی معیار جداساز لرزه‌یی. [۲۵]

مد	شمال - جنوب			شرقی - غربی			پیچشی		
	۱	۲	۳	۱	۲	۳	۱	۲	۳
زمان تناوب	۰٫۷۸	۰٫۲۷	۰٫۱۵	۰٫۸۹	۰٫۲۸	۰٫۱۵	۰٫۶۶	۰٫۲۱	۰٫۱۲



شکل ۳. نمودار نیروی بازگرداندندگی جداسازهای لرزه‌یی.



شکل ۴. نمودار سطح لغزش جداسازهای لرزه‌یی.

کاهش نیروی بازگرداندندگی، جابه‌جایی پایه افزایش می‌یابد.

۱.۲. مدل‌سازی سیستم کنترل

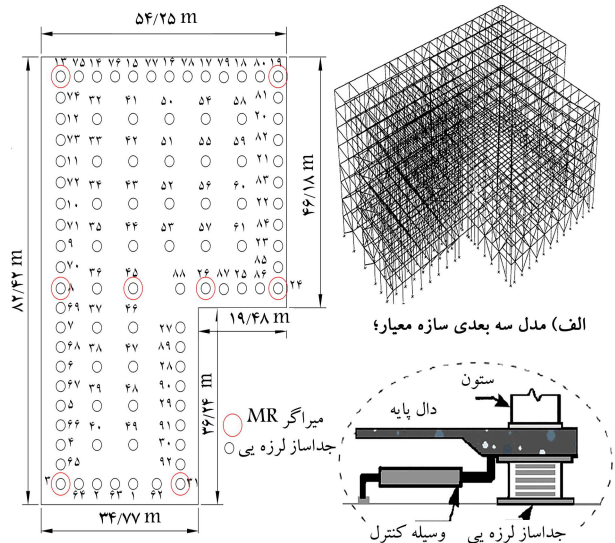
معادله‌ی حرکت کشسان روسازه به صورت رابطه‌ی ۱ است:

$$M\ddot{U} + C\dot{U} + KU = -MR_{inf}(\ddot{U}_g + \ddot{U}_b) \quad (1)$$

که در آن، M ماتریس جرم روسازه با اندازه‌ی 24×24 ، C ماتریس میرایی روسازه در حالت تکیه‌گاه ثابت با اندازه‌ی 24×24 ، K ماتریس سختی روسازه در حالت تکیه‌گاه ثابت با اندازه‌ی 24×24 و R_{inf} ماتریس تأثیر زلزله با اندازه‌ی 24×3 هستند. \ddot{U} و \dot{U} به ترتیب شتاب، سرعت و جابه‌جایی طبقات با اندازه‌ی 24×1 ، \ddot{U}_g بردار شتاب پایه با اندازه‌ی 3×1 و \ddot{U}_b بردار شتاب زمین با اندازه‌ی 3×1 هستند. معادله‌ی حرکت پایه‌ی روسازه به صورت رابطه‌ی ۲ است:

$$R_{inf}^T M [\ddot{U} + R_{inf}(\ddot{U}_g + \ddot{U}_b)] + M_b(\ddot{U}_g + \ddot{U}_b) + f_B = 0 \quad (2)$$

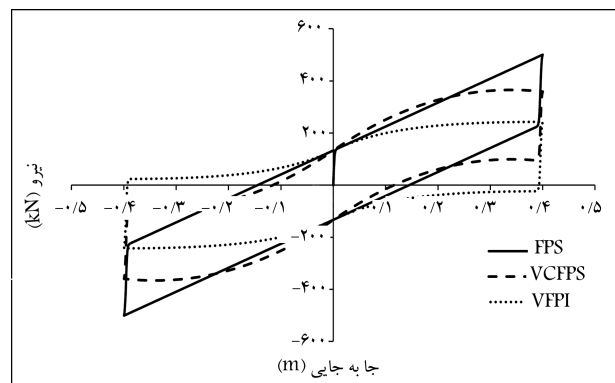
که در آن، M_b ماتریس جرم دال پایه با اندازه‌ی 3×3 و f_B بردار نیروهای ۹۲ عدد جداساز لرزه‌یی است که در مرکز جرم دال پایه وارد می‌شود و اندازه‌ی آن 3×1



ج) نمایش پلان تراز پایه سازه معیار و محل قرارگیری جداسازها و میراگرهای MR.

ب) نمایش برش از اتصال وسایل کنترل؛

شکل ۱. نمایش مدل ۳ بعدی سازه محک جداساز لرزه‌یی و محل قرارگیری وسایل کنترل.



شکل ۲. نمودار نیرو - جابه‌جایی جداسازهای لرزه‌یی.

نمای برش از اتصال وسایل کنترل و محل قرارگیری جداسازهای لرزه‌یی و میراگرهای MR در سازه معیار مشاهده می‌شود. [۲۵-۲۸]

تعداد جداسازهای لرزه‌یی در تراز پایه‌ی سازه معیار، ۹۲ عدد است. به منظور کاهش جابه‌جایی پایه از ۱۶ عدد میراگر MR استفاده شده است که ۸ عدد در جهت محور x و ۸ عدد در جهت محور y هستند. میراگرهای MR در تراز پایه‌ی سازه (محل جداسازهای لرزه‌یی) قرار گرفته‌اند. وزن سازه معیار جداساز لرزه‌یی $w = 202000 \text{ KN}$ است. در شکل ۲، نمودار نیرو - جابه‌جایی جداسازهای لرزه‌یی و در شکل ۳، نمودار نیروی بازگرداندندگی جداسازهای لرزه‌یی در اثر تحریک هارمونیک نشان داده شده است. در شکل ۴، نیز سطح لغزش سیستم‌های جداساز مشاهده می‌شود. در سیستم‌های جداساز تطبیق‌پذیر به دلیل

جدول ۲. زلزله‌های سازه‌ی محک. [۲۵]

زلزله	سال وقوع	ایستگاه	بزرگی (Mw)
نورث‌ریچ	۱۹۹۴/۰۱/۱۷	نیوهال	۶٫۷
نورث‌ریچ	۱۹۹۴/۰۱/۱۷	سیلمار	۶٫۷
امپریال ولی	۱۹۴۰/۰۵/۱۹	السنتر	۷٫۰
نورث‌ریچ	۱۹۹۴/۰۱/۱۷	رینلدی	۶٫۷
کوبه	۱۹۹۵/۰۱/۱۶	کچما	۶٫۹
تایوان	۱۹۹۹/۰۹/۲۰	تی‌سی‌یو ۶۸	۷٫۶
ترکیه	۱۹۹۲/۰۳/۱۳	ارزینکن	۶٫۹

صرف‌نظر شده است. در جدول ۲، زلزله‌های مورد استفاده در سازه‌ی محک نشان داده شده است که هر کدام از آن‌ها دو مؤلفه‌ی موازی گسل (FP) و عمود بر گسل (FN) و با دو مؤلفه‌ی شرقی - غربی (EW) و شمالی - جنوبی (NS) دارند.

۳.۲. معیار ارزیابی

برای بررسی همه‌جانبه‌ی الگوریتم‌های کنترل در سازه‌ی معیار، پاسخ‌های سازه نرمالیزه می‌شوند که از آن‌ها به معیارهای ارزیابی نام برده می‌شود. ۸ معیار ارزیابی که به صورت J۱ تا J۸ نشان داده می‌شوند، در سازه‌ی معیار استفاده می‌شود. معیارهای اول تا ششم (J۱-J۶) از تقسیم بیشینه‌ی کمیت موردنظر (برش پایه‌ی سازه، برش روسازه، جابه‌جایی پایه‌ی سازه، جابه‌جایی نسبی طبقات، شتاب طبقات و نیروی وسایل کنترل) در حالت کنترل‌شده به حالت بدون جداساز لرزه‌یی به دست می‌آید و ۲ معیار (J۷ و J۸) پاسخ‌های جذر متوسط مربعات^۸، جابه‌جایی پایه و شتاب طبقات را حساب می‌کنند. در جدول ۳، جزئیات بیشتر معیارهای ارزیابی ارائه شده است. در جدول ۴، بیشینه‌ی مقدار پاسخ‌های سازه‌ی معیار در حالت بدون جداساز ارائه شده است.

۳. مدل‌سازی جداساز لرزه‌یی

۱.۳. جداساز VFPI

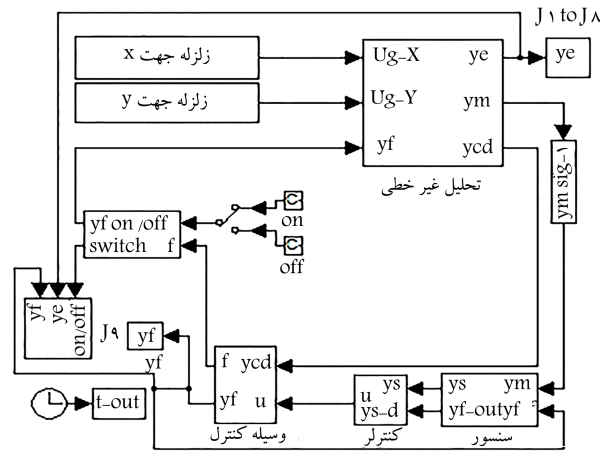
هندسه‌ی سطح لغزش جداساز لرزه‌یی VFPI از معادله‌ی بیضی تبعیت می‌کند و مطابق رابطه‌ی ۴ به دست می‌آید. در جداسازهای مذکور مشاهده می‌شود که با افزایش جابه‌جایی پایه و زیاد شدن شعاع انحنا، نیروی بازگرداندندگی، مقدار شتاب، و دررفت طبقات کاهش می‌یابد.^{[۲۰] [۲۱]} جداساز VFPI به دلیل وابستگی به زمان تناوب و مکانیزم هندسی آن در کاهش نیروی بازگرداندندگی، مرابایی دو جداساز P-F و FPS را در خود جای داده است. سختی جداساز VFPI از رابطه‌ی ۵ به دست می‌آید:

$$y(x) = b \left(1 - \frac{\sqrt{d^2 + 2d|z_b|}}{d + |z_b|} \right) \quad (4)$$

$$k_b(z_b) = m\omega_b^2(z_b) \quad (5)$$

که در آن، از رابطه‌ی ۶ به دست می‌آید:

$$\omega_b^2(z_b) = \frac{\omega_i^2}{(1+r)^2 (\sqrt{1+2r})} \quad (6)$$



شکل ۵. دیاگرام بلوک مدل‌سازی کنترل ارتعاش. [۲۵]

است. معادلات اخیر را می‌توان در فضای حالت به صورت رابطه‌ی ۳ بازنویسی کرد:

$$\begin{bmatrix} M & MR_{inf} \\ R_{inf}^T M & R_{inf}^T MR_{inf} + M_b \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{U} \\ \dot{U}_b \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{U} \\ \dot{U}_b \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} U \\ U_b \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} 0 \\ f_B \end{Bmatrix} = - \begin{bmatrix} MR_{inf} \\ R_{inf}^T MR_{inf} + M_b \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{U}_g \end{Bmatrix} \quad (3)$$

دستگاه معادله‌ی ۳ توسط روش میانگین ثابت نیومارک بتا حل می‌شود. گام‌های زمانی ۰٫۰۰۱، ۰٫۰۰۱، ۰٫۰۰۱ ثانیه است.^[۲۱] سیستم کنترل در محیط نرم‌افزار متلب شبیه‌سازی شده است. محیط نرم‌افزار متلب به دلیل امکانات قوی ریاضی و جعبه ابزارهای مختلف، مانند: جعبه ابزارهای سیستم‌های فازی، شبکه‌ی عصبی، و الگوریتم‌های ژنتیک برای شبیه‌سازی سیستم کنترل بسیار مناسب است. علاوه بر این، نرم‌افزار SIMULINK در محیط متلب، امکان خوبی را برای شبیه‌سازی ذکرشده به صورت گرافیکی، با استفاده از بلوک‌های محاسباتی که در محیط متلب وجود دارد، فراهم می‌آورد. شکل ۵، نمودار شبیه‌سازی سیستم کنترل سازه را در محیط نرم‌افزار SIMULINK نشان می‌دهد. در شکل ۵، زلزله‌های جهت x و y به سازه وارد می‌شود. در بلوک تحلیل دینامیکی غیرخطی، معادلات در فضای حالت حل می‌شوند و پاسخ‌های سازه به دست می‌آیند. ye بخشی از پاسخ‌های سازه است که در محاسبه‌ی معیارهای ارزیابی استفاده می‌شود. ym پاسخ‌هایی از سازه هستند که در الگوریتم کنترل استفاده می‌شوند و باید توسط حسگرهای سازه اندازه‌گیری شوند که با خروجی ys نشان داده می‌شوند. yed مقدار جابه‌جایی و سرعت وسایل کنترل است. u خروجی کنترلر است که بیانگر ولتاژ میراگرهای MR و yf نیروی کنترل است (جهت اطلاعات بیشتر به منابع ۲۵ الی ۲۸ مراجعه شود).

۲.۲. تحریک‌های لرزه‌یی و شدت آن‌ها

در سازه‌ی معیار جداساز لرزه‌یی، ۷ زلزله‌ی میدان نزدیک در نظر گرفته شده است، که در دو جهت افقی به طور هم‌زمان با شدت واقعی به سازه اعمال می‌شوند. برخی پژوهشگران،^{[۲۹] [۳۰]} نشان دادند که برای سازه‌هایی که زمان تناوب اصلی آن‌ها در محدوده‌ی بلند است، صرف‌نظر کردن از مؤلفه‌ی قائم زلزله، خطای زیادی در پاسخ‌ها ایجاد نمی‌کند. در سازه‌ی معیار جداساز لرزه‌یی از اثر مؤلفه‌ی قائم زلزله

جدول ۳. معیارهای ارزیابی سازه‌ی معیار جداساز لرزه‌ی [۲۵]

بیشترین جابه‌جایی پایه	بیشترین برش سازه	بیشترین برش پایه
$J_3 = \frac{\max \ x_b(t)\ }{\max \ \hat{x}_b(t)\ }$	$J_2 = \frac{\max \ V_1(t)\ }{\max \ \hat{V}_1(t)\ }$	$J_1 = \frac{\max \ V_0(t)\ }{\max \ \hat{V}_0(t)\ }$
بیشترین نیروی کنترل	بیشترین شتاب طبقات	بیشترین جابه‌جایی نسبی
$J_6 = \frac{\max \ f_d(t)\ }{\max \ V_0(t)\ }$	$J_5 = \frac{\max \ \sigma_f(t)\ }{\max \ \hat{\sigma}_f(t)\ }$	$J_4 = \frac{\max \ d_f(t)\ }{\max \ \hat{d}_f(t)\ }$
جذر متوسط مربعات شتاب طبقات	جذر متوسط جابه‌جایی پایه	
$J_8 = \frac{\max \ \sigma_a(t)\ }{\max \ \hat{\sigma}_a(t)\ }$	$J_7 = \frac{\max \ \sigma_f(t)\ }{\max \ \hat{\sigma}_f(t)\ }$	

جدول ۴. بیشینه‌ی مقدارهای پاسخ سازه‌ی معیار در حالت بدون جداساز لرزه‌ی [۴]

زلزله	برش پایه (KN)	برش طبقه (KN)	جابه‌جایی پایه (m)	دریفت طبقات (m)	بیشینه‌ی		
					شتاب مطلق طبقه (m/s ²)	نیروی کنترل	جابه‌جایی پایه
نیوהל	۲۰۰۱۰۰	۱۹۷۰۱۰	۱	۰٫۶۵۸	۲۳٫۹۷۸۹	۱	۳٫۵۴۳۷
سیلمار	۱۹۹۱۲۰	۱۶۹۲۷۰	۱	۰٫۴۵۵	۱۷٫۸۳۱۶	۱	۲٫۹۷۴۴
السنتر	۷۴۱۵۶	۶۷۳۷۱	۱	۰٫۲۴۷	۷٫۸۲۸۵	۱	۲٫۲۳۴۹
رینلدی	۲۶۴۹۴۰	۲۵۱۷۱۰	۱	۰٫۹۱۳	۲۷٫۵۲۱۷	۱	۵٫۶۹۰۹
کوبه	۲۷۰۲۰۰	۲۶۸۰۰۰	۱	۰٫۸۶۵	۲۸٫۱۴۱۷	۱	۵٫۱۰۹۸
جی جی جی	۱۲۹۷۴۰	۱۲۱۳۳۰	۱	۰٫۳۷۲	۱۱٫۷۳۰۳	۱	۲٫۷۰۵۶
ارزینکن	۱۲۵۴۸۰	۱۲۴۷۲۰	۱	۰٫۳۹۶	۱۸٫۶۳۶۸	۱	۲٫۹۱۴

که در آن، z_b, r, ω_i^2 از روابط ۷ الی ۹ به دست می‌آیند:

هیستریک هستند که از معادله‌ی Bouc-Wen در رابطه‌ی ۱۳ به دست می‌آیند:

$$U^y \begin{Bmatrix} \dot{z}_x \\ \dot{z}_y \end{Bmatrix} = \alpha \begin{Bmatrix} \dot{x}_b \\ \dot{y}_b \end{Bmatrix}$$

$$- \begin{pmatrix} z_x^i (\gamma \operatorname{sgn}(\dot{x}_b z_x) + \beta) & z_x z_y (\gamma \operatorname{sgn}(\dot{y}_b z_y) + \beta) \\ z_x z_y (\gamma \operatorname{sgn}(\dot{x}_b z_x) + \beta) & z_y^i (\gamma \operatorname{sgn}(\dot{y}_b z_y) + \beta) \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x}_b \\ \dot{y}_b \end{Bmatrix} \quad (13)$$

$$z_b = \sqrt{(x_b^i + y_b^i)} \quad (7)$$

$$r = \frac{z_b}{d} \quad (8)$$

$$\omega_i^2 = \frac{bg}{d^i} \quad (9)$$

$$T_i = 2\pi \sqrt{\frac{d^i}{bg}} \quad (10)$$

که در آن، $x_b, y_b, z_b, \dot{x}_b, \dot{y}_b$ جابه‌جایی جداساز و سرعت جداساز در جهت‌های x, y و U^y جابه‌جایی نقطه‌ی تسلیم هستند. با توجه به اینکه رفتار جداسازهای لغزشی به صورت خمیری صلب^{۱۰} است و سختی اولیه‌ی بزرگ دارند، مقدار U^y در رابطه‌ی ۱۳ عدد کوچکی در نظر گرفته می‌شود که در نوشتاری در سال ۲۰۱۰^[۱]، 3.5 mm پیشنهاد شده است. در پژوهش حاضر نیز همین مقدار در نظر گرفته شده است. پارامترهای α, β, γ برای کنترل شکل حلقه‌های هیستریک هستند، تا مدل‌سازی جداساز به مدل‌های آزمایشگاهی نزدیک شود. در نوشتار حاضر، $\alpha = 1, \beta = 0.9, \gamma = 0.1$ در نظر گرفته شده است.^[۱۸] در طراحی جداسازهای VFPI، یکی از پارامترهای مهم تعیین نرخ تغییرات بسامد جداساز (FVF) است. با افزایش مقدار FVF سطح لغزش جداساز مسطح‌تر می‌شود که باعث کاهش نیروی بازگرداندندگی و افزایش جابه‌جایی جداساز می‌شود که به عبارت دیگر، رفتار جداساز تبدیل به جداساز $P - F$ می‌شود. هر چه مقدار FVF کمتر باشد، رفتار جداساز به جداساز FPS نزدیک‌تر خواهد بود. وقتی FVF خیلی بزرگ شود، به این معنی است که مقدار پارامتر d نزدیک صفر ($FVF = \frac{1}{d}$) می‌شود که در واقع نرخ کاهش بسامد خیلی سریع صورت می‌گیرد و به سمت صفر میل می‌کند و سطح لغزش به صورت مسطح است (مشابه جداساز $P - F$) به طور مشابه، وقتی FVF خیلی کوچک شود، به این معنی است که مقدار d مقدار

در رابطه‌ی ۵، m جرم سازه است. همچنین در روابط اخیر، b و d شعاع‌های کوچک‌تر و بزرگ‌تر بیضی در سطح لغزش، x_b و y_b به ترتیب جابه‌جایی جداساز در دو جهت x و y, z_b جابه‌جایی شعاعی جداساز، r پارامتر بدون بعد و $\omega_b(z_b)$ بسامد جداساز VFPI است که به هندسه‌ی سطح لغزش وابسته است، بسامد اولیه‌ی جداساز زمان تناوب اولیه‌ی جداساز VFPI هستند. مقدار $\frac{1}{d}$ بیانگر نرخ تغییرات بسامد جداساز است. این پارامتر با FVF^۹ تعریف می‌شود. در محاسبه‌ی نیروی اصطکاک جداسازهای لغزشی، آثار هیستریک را باید لحاظ کرد. بنابراین در محاسبه‌ی نیروی اصطکاک جداسازها می‌توان از مدل هیستریک Bouc-Wen استفاده کرد. نیروی جداساز لرزه‌ی VFPI در جهت‌های x و y به صورت روابط ۱۱ و ۱۲ به دست می‌آیند:

$$F_x = k_b(z_b) x_b + \mu w z_x \quad (11)$$

$$F_y = k_b(z_b) y_b + \mu w z_y \quad (12)$$

که در آن‌ها، μ ضریب اصطکاک سطح لغزش، w وزن سازه و z_x و z_y ضرایب

بزرگی است، که در واقع تغییر بسامد خیلی کند صورت می‌گیرد و می‌توان از اثر آن چشم‌پوشی کرد و بسامد را تقریباً عدد ثابتی در نظر گرفت. در چنین حالتی جاساز به صورت جاساز FPS رفتار می‌کند. بنابراین، مقدار بهینه‌ی برای مقدار پارامتر FVF لازم است، تا جاساز بتواند رفتار مناسبی که مرایای هر دو سیستم $P - F$ و FPS را داشته باشد، نشان دهد. برخی پژوهش‌ها،^[۱۸] نشان داده‌اند که با انتخاب $FVF = ۱$ جاساز عملکرد مطلوبی دارد. در پژوهش حاضر، زمان تناوب اولیه‌ی جاساز ۳ ثانیه و مقدار $b = ۰٫۴۴۷ m$ و $d = ۱ m$ در نظر گرفته شده است.

۲.۳. جاساز $VCFPS$

مکانیزم عملکرد جاساز $VCFPS$ مشابه جاساز FPS است، با این تفاوت که شعاع انحنای تغییر در جابه‌جایی جاساز تغییر می‌کند (با افزایش جابه‌جایی جاساز، شعاع انحنای بیشتر می‌شود). تغییر در شعاع انحنای جاساز باعث می‌شود که بسامد جاساز از بسامد زلزله فاصله گیرد و پدیده‌ی تشدید در سازه اتفاق نیفتد.^[۲۴-۲۲] هندسه‌ی جاسازهای $VCFPS$ مطابق رابطه‌ی ۱۴ است:

$$y = R - \sqrt{R^2 - z_b^2} - f(z_b) \quad (۱۴)$$

که در آن، R شعاع انحنای در مرکز سطح لغزش جاساز $VCFPS$ و z_b جابه‌جایی شعاعی جاساز است که از رابطه‌ی ۷ به دست می‌آید. $f(z_b)$ تابعی است که تغییرات شعاع انحنای را توصیف می‌کند و تابع $f(z_b)$ به صورت رابطه‌ی ۱۵ تعریف می‌شود:

$$f(z_b) = E \operatorname{sgn}(z_b) z_b^2 \quad (۱۵)$$

که در آن، E از رابطه‌ی ۱۶ به دست می‌آید:

$$E = \left(\frac{\frac{w r_0}{\sqrt{R^2 - r_0^2}} - \frac{\mu w}{\cos \theta}}{\Psi w \operatorname{sgn}(r_0) r_0^2} \right) \quad (۱۶)$$

که در آن‌ها، r_0 جابه‌جایی لغزش و w وزن سازه است. همچنین، θ زاویه‌ی است که جاساز در فاصله‌ی r_0 می‌سازد و μ ضریب اصطکاک سطح لغزش است. نیرویی که جاساز $VCFPS$ ایجاد می‌کند و جداگر را از فاصله‌ی r_0 به حالت اولیه باز می‌گرداند، می‌توان به صورت روابط ۱۱ و ۱۲ تبدیل کرد، با این تفاوت که سختی جاساز ($K_b(z_b)$) به صورت رابطه‌ی ۱۷ تبدیل شود:^[۱۸]

$$k_b(z_b) = \left(\frac{w}{\sqrt{R^2 - z_b^2}} - \frac{\operatorname{sgn}(z_b) z_b \left(\frac{w r_0}{\sqrt{R^2 - r_0^2}} - \frac{\mu w}{\cos \theta} \right)}{\operatorname{sgn}(r_0) r_0^2} \right) \quad (۱۷)$$

یکی از پارامترهای مهم جاساز $VCFPS$ ، مقدار جابه‌جایی از مرکز جاساز (r_0) است که عملاً محدوده‌ی طراحی جداگر را تعیین می‌کند؛ لذا، باید به نحو مناسبی انتخاب شود. در پژوهش حاضر، زمان تناوب اولیه‌ی جاساز ۳ ثانیه و مقدار $R = ۲٫۲۳۹ m$ و $r_0 = ۰٫۸ m$ در نظر گرفته شده است.

۴. تبدیل موجک

در ۱۰ سال اخیر، پژوهشگران به توسعه و کاربرد شبکه‌های عصبی موجکی در زمینه‌های مختلف مهندسی، پزشکی، اقتصادی و غیره پرداخته‌اند. از کاربردهای

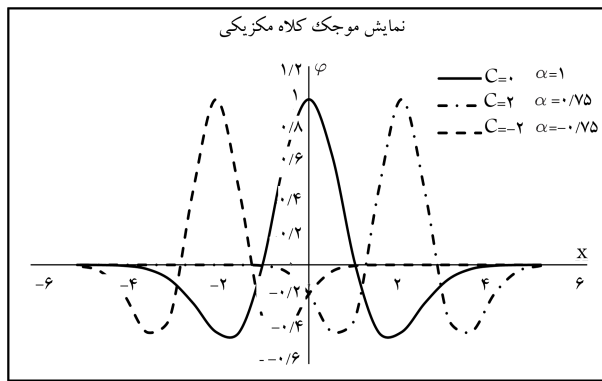
تبدیل موجک در واقع نوع تکامل‌یافته‌ی تبدیل فوری است. تبدیل فوری فقط یک تبدیل بسامدی است، یعنی فقط بیان‌کننده‌ی این مطلب است که بسامد f در سیگنال مورد نظر وجود دارد یا خیر، اما هیچ نوع اطلاعاتی در مورد بازه‌ی زمانی متناظر با پدیداری آن بسامد در اختیار نمی‌گذارد. تبدیل موجک از یک رویکرد جایگزین برای تحلیل سیگنال‌ها استفاده می‌کند که اصطلاحاً آنالیز چند وضوحی^[۳۱] نامیده می‌شود. منظور از آنالیز چند وضوحی، تحلیل سیگنال در بسامدهای مختلف با وضوح‌های متفاوت است. هدف آنالیز چند وضوحی، ارائه‌ی وضوح زمانی مناسب و وضوح بسامدی نادقیق در بسامدهای بالا و در مقابل، وضوح بسامدی خوب و وضوح زمانی ضعیف در بسامدهای پایین است. این رویکرد به ویژه در کاربردهایی که سیگنال مورد تحلیل، مؤلفه‌های بسامد بالا در مدت زمان کوتاه دارد و مؤلفه‌های بسامد پایین آن‌ها برای بازه‌های بلند زمانی باقی می‌ماند، مفید است. به ویژه اینکه اکثر قریب به اتفاق سیگنال‌هایی که در عمل با آن‌ها مواجه هستیم، از این نوع هستند. بر این اساس، تبدیل موجک پیوسته به صورت رابطه‌ی ۱۸ تعریف می‌شود:

$$CWT_x^\psi(\tau, s) = \frac{1}{\sqrt{|s|}} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \psi\left(\frac{t - \tau}{s}\right) dt \quad (۱۸)$$

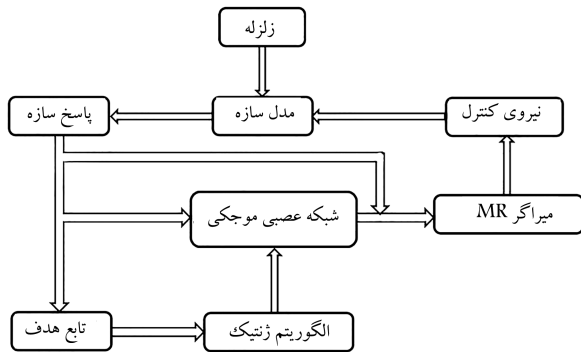
که در آن، $x(t)$ پارامترهای سیگنال مورد نظر، τ و s به ترتیب پارامترهای انتقال^[۳۲] و مقیاس^[۳۳] ψ تابع پنجره (تابع موجک) هستند. مفهوم انتقال دقیقاً مشابه با مفهوم انتقال زمانی در تبدیل فوری است که میزان جابه‌جایی پنجره را معلوم می‌کند و وضوح اطلاعات زمانی تبدیل را در بر دارد. بر خلاف تبدیل فوری زمان کوتاه، در تبدیل موجک مستقیماً پارامتر بسامد وجود ندارد، بلکه پارامتر مقیاس وجود دارد، که به طور معکوس با بسامد ارتباط دارد.^[۳۱] مقیاس‌گذاری موجک به طور ساده به مفهوم کشیدن یا فشردن آن است.

۵. شبکه‌ی عصبی موجکی

شبکه‌های عصبی موجکی، شبکه‌هایی جلو سو هستند که در لایه‌ی پنهان آن‌ها از توابع موجک استفاده شده است. ساختار شبکه‌ی عصبی موجکی در شکل ۶ مشاهده می‌شود. شبکه‌ی مذکور یک تقریب مناسب برای مسائل غیرخطی است. یک لایه‌ی پنهان می‌تواند جهت نگاشت یک تابع دلخواه به هر درجه‌ی از دقت مناسب باشد.^[۳۳-۳۲] شبکه‌ی عصبی موجکی، شبکه‌ی سه لایه است که شامل D ورودی (در لایه‌ی ورودی)، M تابع موجک در لایه‌ی میانی و یک نرون در لایه‌ی خروجی است. معادله‌ی نهایی شبکه بین خروجی و ورودی را می‌توان در رابطه‌ی



شکل ۷. نمایش تابع موجک کلاه مکزیکویی.



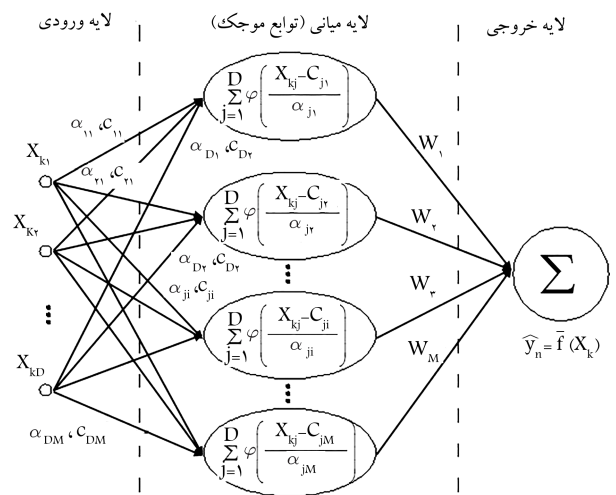
شکل ۸. ساختار مدل آموزش شبکه‌ی عصبی.

موجک‌های مختلفی می‌توان برای شبکه‌ی عصبی موجکی استفاده کرد. در پژوهش حاضر، از توابع موجک کلاه مکزیکویی استفاده شده است. از مزایای توابع کلاه مکزیکویی، ساده بودن بیان تحلیلی آن در آنالیز چند وضوحی سری زمانی، فشردگی نبودن و اضمحلال سریع، قابلیت مشتق‌پذیری و محاسبات کارآمد است. [۳۳] تابع کلاه مکزیکویی به صورت رابطه‌ی ۲۱ بیان می‌شود و در شکل ۷، تابع کلاه مکزیکویی نشان داده شده است. در رابطه‌ی ۲۱، c ضریب انتقال، a ضریب مقیاس و x سیگنال ورودی هستند.

$$\varphi(z) = (1 - z^2) \exp\left(-\frac{z^2}{\gamma}\right), z = \left(\frac{x - c}{a}\right) \quad (21)$$

در پژوهش حاضر، با استفاده از سعی و خطا جهت رسیدن به نتیجه‌ی مطلوب، از ۱۰ تابع موجک استفاده شده است. در شکل ۸، ساختار کلی مدل مورد استفاده مشاهده می‌شود.

شبکه‌ی عصبی مورد استفاده، ۲۳۱ مجهول دارد. مجهولات شبکه توسط الگوریتم ژنتیک تعیین می‌شوند. تعداد اعضاء جمعیت الگوریتم ژنتیک، ۶۰ عضو انتخاب شده و انتخاب جمعیت اولیه به‌طور تصادفی بوده است. احتمال ادغام ۸۰٪ و احتمال جهش ۲۰٪ است. تابع شایستگی الگوریتم ژنتیک بر مبنای کمینه‌سازی جابه‌جایی پایه در سازه‌ی معیار تعیین شده است. برای ارزیابی شایستگی، ابتدا وزن‌های شبکه‌ی عصبی و ضرایب موجک به صورت تصادفی تعیین و به دنبال آن، سازه تحت اثر زلزله‌ی آموزش قرار داده می‌شود. پاسخ‌های سازه پس از نرمال شدن و اعمال نویز به شبکه‌ی عصبی وارد می‌شوند. در پایان مدت زلزله‌ی آموزش، معیار ارزیابی به دست می‌آید. تابع هدف به صورت مجموع معیارهای ارزیابی J_1 و J_2 و J_3 تعیین و از آن برای تعیین شایستگی اعضا استفاده شده است. همچنین برای آموزش کنترل‌ر از زلزله‌ی الاسترو با شدت ۲ برابر استفاده شده است.



شکل ۶. ساختار شبکه‌ی عصبی موجکی. [۳۳]

۱۹ نشان داد:

$$\bar{f}(x_k) = \sum_{i=1}^M \omega_i \sum_{j=1}^D \varphi\left(\frac{x_{kj} - c_{ji}}{\alpha_{ji}}\right) \quad (19)$$

که در آن، ω_i وزن‌ها در لایه‌ی مخفی (لایه‌ی میانی) و ضرایب c_{ji} و α_{ji} به ترتیب ضرایب انتقال و مقیاس توابع موجک هستند. x_{kj} ورودی ژام شبکه و φ تابع موجک است، که در رابطه‌ی ۲۰ ارائه شده است:

$$\varphi(z_{ji}) = |\alpha_{ji}|^{-\frac{1}{\gamma}} (1 - z_{ji}^2) e^{-\frac{z_{ji}^2}{\gamma}} \quad z_{ji} = \frac{x_{kj} - c_{ji}}{\alpha_{ji}} \quad (20)$$

همان‌طور که پیشتر اشاره شد، در شبکه‌های عصبی موجکی، توابع موجک در لایه‌ی پنهان شبکه‌ی عصبی قرار می‌گیرند و هر تابع موجک، یک ضریب انتقال و یک ضریب مقیاس دارد. با توجه به اینکه شبکه‌ی عصبی از چند تابع موجک تشکیل شده است؛ بنابراین شبکه‌ی مذکور، مقادیر مختلفی برای ضرایب انتقال و ضرایب مقیاس دارد. به عبارت دیگر، شبکه‌ی عصبی موجک موقعیت‌های مختلف مکانی - زمانی و همچنین مقیاس‌های مختلفی دارد که این امر باعث می‌شود شبکه‌ی عصبی در شناخت سیگنال توانایی بیشتری داشته باشد. از طرفی دیگر مشاهده می‌شود که در شبکه‌های عصبی، آثار نامطلوب و اختلال‌ها در میان نرون‌های شبکه کاهش می‌یابد. همچنین افزایش دقت در تقریب‌سازی دارند و روند آموزش شبکه سریع‌تر انجام می‌پذیرد. آنچه بیان شد، بیانگر خاصیت چند وضوحی تابع موجک و تأثیر آن در شبکه‌ی عصبی است، که وجه تمایز شبکه‌های ذکر شده با سایر شبکه‌های عصبی است. [۳۳-۳۴]

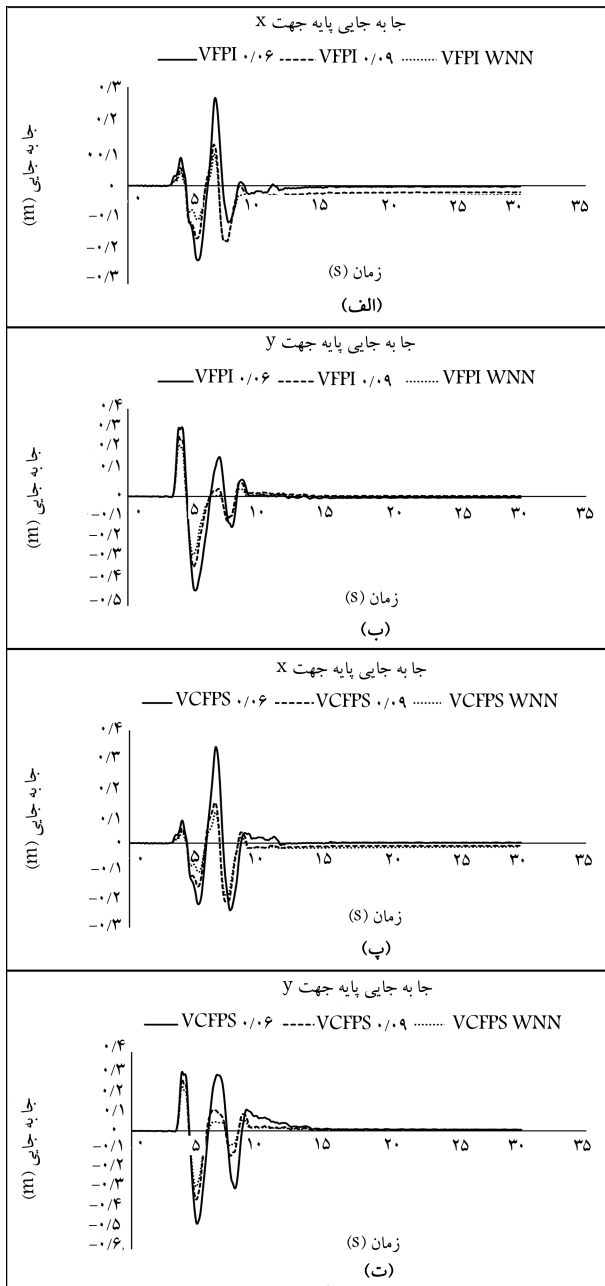
۶. الگوریتم کنترل پیشنهادی

در پژوهش حاضر، از دو کنترل‌ر عصبی موجکی استفاده شده است که توسط الگوریتم ژنتیک آموزش داده می‌شوند. هر کدام از کنترل‌رها، وظیفه‌ی کنترل حرکت سازه در یک راستا را به عهده دارند. شتاب زمین، شتاب پایه‌ی سازه، شتاب طبقات، جابه‌جایی پایه‌ی سازه و شتاب وسایل کنترل، ورودی‌های هر شبکه‌ی عصبی موجک در جهت‌های x و y هستند و خروجی شبکه‌ی ولتاژ، میراگرهای MR هستند که در محل تراز جداسازها و در دو جهت x و y قرار گرفته‌اند.

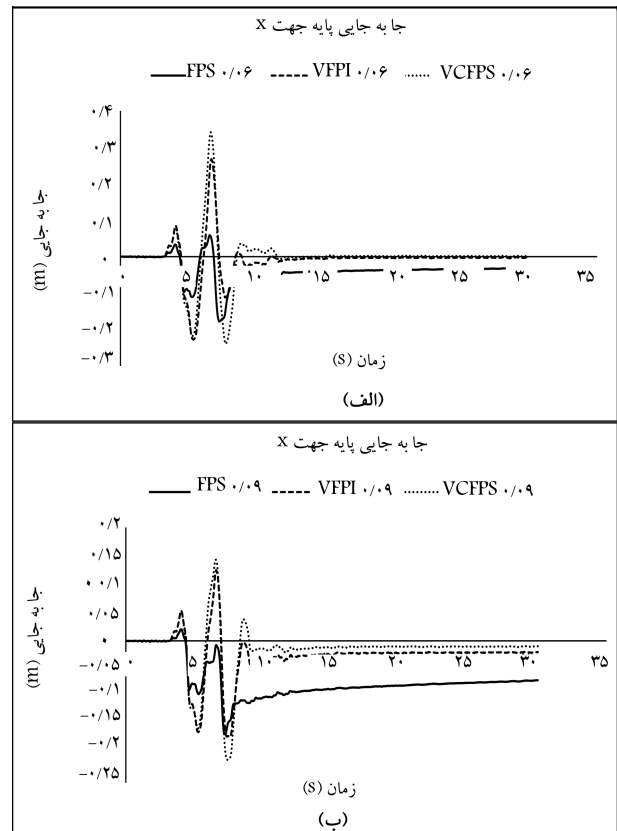
۷. نتایج عددی

کنترلر پیشنهادی پس از آموزش، در سازه‌ی معیار جداساز لرزه‌یی استفاده شده است. در شکل‌های ۹ و ۱۰، تاریخچه‌ی پاسخ جابه‌جایی زلزله‌های سیلمار و کوبه برای ۳ سیستم جداساز لرزه‌یی FPS، VFPI و VCFPS نشان داده شده است (اعداد ۰/۰۶ و ۰/۰۹ بیانگر ضریب اصطکاک سطح لغزش است).

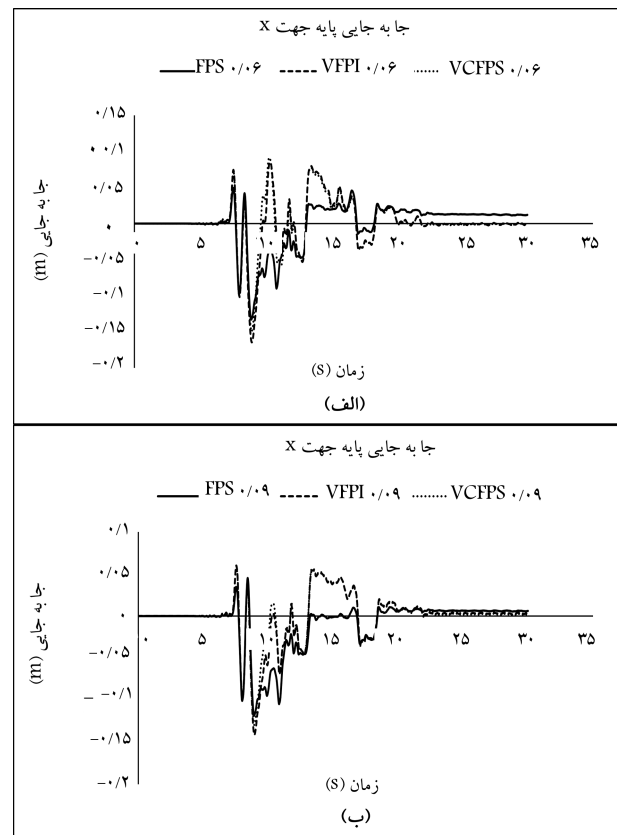
شکل‌های ۱۱ و ۱۲، کاهش جابه‌جایی پایه توسط افزایش ضریب اصطکاک سطح لغزش و کنترل نیمه فعال WNN را نشان می‌دهند. با مقایسه‌ی تاریخچه‌ی پاسخ جابه‌جایی پایه مشاهده می‌شود که در صورت استفاده از جداسازهای تطبیق‌پذیر، مقدار جابه‌جایی پایه افزایش می‌یابد که می‌توان با زیاد کردن ضریب اصطکاک سطح



شکل ۱۱. مقایسه‌ی تاریخچه‌ی پاسخ جابه‌جایی پایه‌ی زلزله‌ی سیلمار.



شکل ۹. تاریخچه‌ی پاسخ جابه‌جایی پایه‌ی زلزله‌ی سیلمار.



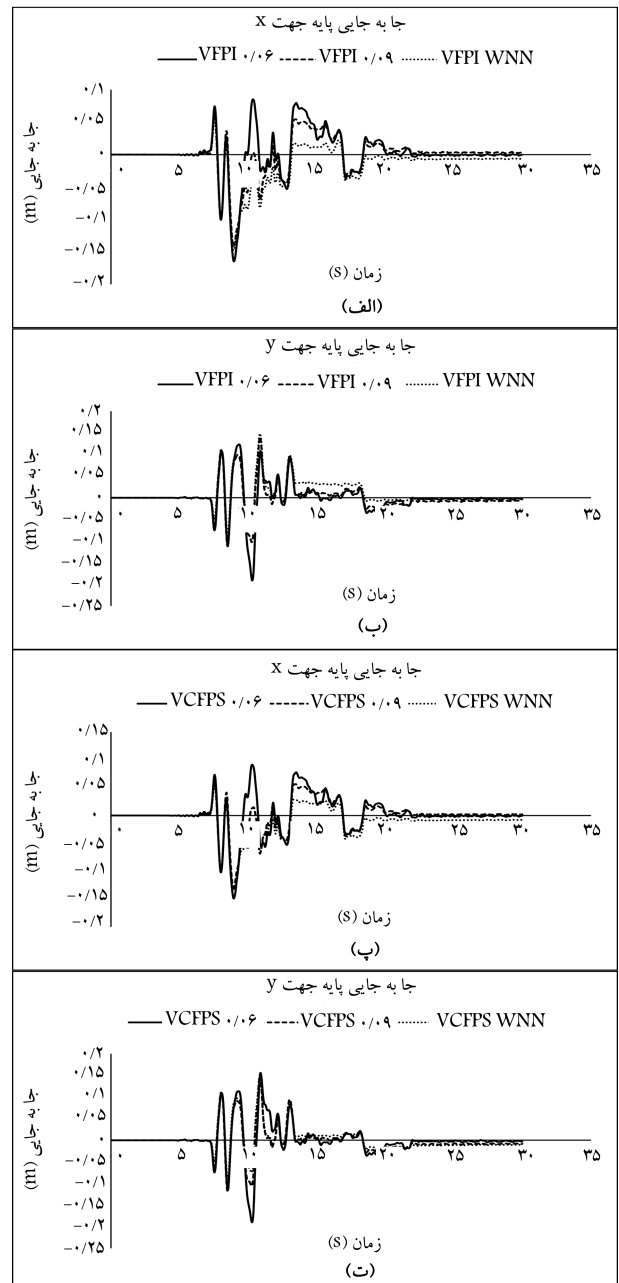
شکل ۱۰. تاریخچه‌ی پاسخ جابه‌جایی پایه‌ی زلزله‌ی کوبه.

با بررسی معیارهای ارزیابی مشاهده می‌شود که جداسازهای VFPI و VCFPS به دلیل کاهش یافتن نیروی بازگرداندنگی، جابه‌جایی پایه را افزایش و جابه‌جایی نسبی طبقات و شتاب طبقات را کاهش می‌دهند. در جدول‌های ۱۴ و ۱۵، برای دو زلزله‌ی سیلمار و کوبه معیارهای ارزیابی مقایسه شده است که مشاهده می‌شود کنترلر عملکرد مناسب‌تری در کاهش برش پایه، جابه‌جایی پایه، جابه‌جایی نسبی طبقات، و شتاب طبقات در مقایسه با سایر حالت‌ها دارد. در جدول‌های ۱۶ تا ۱۸ حالت‌های مختلف سیستم کنترل با جداساز FPS مقایسه شده است.

در مقایسه‌ی کنترل نیمه‌فعال شبکه‌ی عصبی مویج با کنترل غیرفعال میراگر ویسکوز مشاهده می‌شود که برش پایه به طور متوسط در کنترل نیمه‌فعال تمام زلزله‌ها ۲۷٪ کاهش و جابه‌جایی پایه در تمام زلزله‌ها به جز زلزله‌های جی و آرژینکن کاهش یافته است، که به طور متوسط برای تمام زلزله‌ها ۲۰٪ افزایش یافته است، شتاب بام به طور متوسط برای تمام زلزله‌ها ۶٪ افزایش و جابه‌جایی نسبی طبقات به طور متوسط برای تمام زلزله‌ها ۲۷٪ کاهش یافته است.

۸. نتیجه‌گیری

جداسازهای اصطکاکی پاندولی، یکی از انواع رایج جداسازها هستند، که در آن‌ها به دلیل ثابت بودن شعاع انحنا، سختی و بسامد ثابتی دارند. مطالعات نشان می‌دهند که در بعضی از زلزله‌ها که بسامد زلزله با بسامد طراحی سیستم جداساز نزدیک باشد، امکان ایجاد پدیده‌ی تشدید در سازه‌ی مجهز به سیستم مذکور وجود دارد. در سال‌های اخیر، پژوهشگران خاصیت تطبیق‌پذیری غیرفعال را در این جداگر جای داده‌اند تا مشکل ایجاد پدیده‌ی تشدید در پاسخ‌های جداگر حل شود. جهت بررسی سیستم‌های جداساز، سازه‌ی معیار جداساز لرزه‌ی توسط کمیته‌ی کنترل سازه معرفی شده است تا پژوهشگران انواع سیستم‌های جداساز و سیستم‌های کنترلی پیشنهادی را در سازه‌ی مذکور استفاده کنند تا نتایج آن‌ها قابل مقایسه با یکدیگر باشند. در نوشتار حاضر، از جداسازهای لرزه‌ی تطبیق‌پذیر در سازه‌ی معیار جداساز لرزه‌ی استفاده شده است، تا عملکرد جداسازهای تطبیق‌پذیر با جداسازهای اصطکاکی پاندولی، که قبلاً در سازه‌ی مذکور بررسی شده‌اند، مقایسه شود. اثر اندرکنش دوجانبه در رفتار جداسازها در نظر گرفته شده است. در جداسازهای تطبیق‌پذیر به دلیل کاهش نیروی بازگرداندنگی، جابه‌جایی پایه نسبت به جداساز اصطکاکی پاندولی به طور متوسط ۴۷٪ افزایش یافته است، علاوه بر این، شتاب طبقات و جابه‌جایی نسبی طبقات به ترتیب به طور متوسط ۲۲٪ و ۱۹٪ کاهش یافته‌اند. بنابراین کنترل جابه‌جایی پایه در جداسازهای مذکور اهمیت دارد. جهت کاهش جابه‌جایی پایه در جداسازهای اصطکاکی پاندولی می‌توان ضریب اصطکاک سطح لغزش را افزایش داد. مشاهده می‌شود که با افزایش ضریب اصطکاک سطح لغزش از ۰/۰۶ به مقدار ۰/۰۹، جابه‌جایی پایه در جداساز تطبیق‌پذیر نسبت به جداساز اصطکاک پاندولی به طور متوسط ۲۵٪ افزایش و شتاب و جابه‌جایی نسبی طبقات نیز به ترتیب ۱۱٪ و ۱۵٪ افزایش یافته‌اند. چنانچه برای کاهش جابه‌جایی پایه از میراگر ویسکوز استفاده شود، مشاهده می‌شود که جابه‌جایی پایه در جداساز تطبیق‌پذیر نسبت به جداساز اصطکاک پاندولی به طور متوسط ۲۲٪ کاهش می‌یابد و شتاب و جابه‌جایی نسبی طبقات به ترتیب به طور متوسط ۱۴٪ کاهش و ۴۱٪ افزایش می‌یابد. در نوشتار حاضر، جهت کنترل سازه‌ی معیار جداساز لرزه‌ی از الگوریتم کنترل نیمه‌فعال شبکه‌ی عصبی مویج استفاده شده است. شبکه‌های عصبی مویج در بسیاری از زمینه‌های مختلف مهندسی، پزشکی و اقتصادی کاربرد



شکل ۱۲. مقایسه‌ی تاریخیچه‌ی پاسخ جابه‌جایی پایه‌ی زلزله‌ی کوبه.

لغزش و یا سیستم کنترل، جابه‌جایی پایه را کنترل کرد (در سیستم کنترل نیمه‌فعال، ضریب اصطکاک ۰/۰۶ است). برای بررسی دقیق‌تر عملکرد سیستم‌های جداساز لرزه‌ی VFPI و VCFPS و همچنین عملکرد کنترلر WNN می‌توان معیارهای ارزیابی را بررسی کرد. در جدول‌های ۵ تا ۱۱، معیارهای ارزیابی سازه‌ی معیار ارائه شده‌اند.

در پژوهشی در سال ۲۰۱۲^[۱۸]، به صورت کنترل غیرفعال، پاسخ‌های سازه‌ی کنترل شده است. ۱۶ عدد میراگر ویسکوز در پایه‌ی سازه در محل‌های میراگر MR در دو جهت x و y استفاده شده است. نتایج معیارهای ارزیابی در جدول‌های ۱۲ و ۱۳ نشان داده شده است. همچنین در جدول‌های ۱۴ و ۱۵، معیارهای ارزیابی زلزله‌های سیلمار و کوبه برای حالت‌های مختلف سیستم کنترل مقایسه شده‌اند.

جدول ۵. معیارهای ارزیابی جداساز *FPS* با ضریب اصطکاک ۰.۰۶.

ارزینکن	جی جی	کوبه	رینلدی	السنترو	سیلمار	نیوهال	FPX-FNY
۰٫۳۷	۰٫۵۴	۰٫۱۲	۰٫۱۸	۰٫۳۲	۰٫۲۴	۰٫۱۸	J_1
۰٫۳۱	۰٫۴۸	۰٫۱۲	۰٫۱۷	۰٫۳۵	۰٫۲۶	۰٫۱۶	J_2
۰٫۳۸	۰٫۷۳	۰٫۱۵	۰٫۳۳	۰٫۵۵	۰٫۳۶	۰٫۲۰	J_3
۰٫۲۵	۰٫۴۱	۰٫۱۵	۰٫۱۳	۰٫۴۸	۰٫۲۸	۰٫۲۰	J_4
۰٫۲۴	۰٫۵۵	۰٫۲۲	۰٫۲۶	۰٫۶۸	۰٫۳۵	۰٫۲۸	J_5
۰٫۲۳	۰٫۳۴	۰٫۱۶	۰٫۲۴	۰٫۱۲	۰٫۲۴	۰٫۱۸	J_6
۰٫۱۰	۰٫۱۰	۰٫۰۴	۰٫۰۷	۰٫۰۳	۰٫۰۷	۰٫۰۴	J_7
۰٫۳۲	۰٫۳۷	۰٫۲۴	۰٫۲۱	۰٫۵۱	۰٫۳۵	۰٫۳۲	J_8

جدول ۶. معیارهای ارزیابی جداساز *VFPI* با ضریب اصطکاک ۰.۰۶.

ارزینکن	جی جی	کوبه	رینلدی	السنترو	سیلمار	نیوهال	FPX-FNY
۰٫۲۷	۰٫۲۷	۰٫۱۰	۰٫۱۳	۰٫۲۹	۰٫۱۸	۰٫۱۶	J_1
۰٫۲۳	۰٫۲۶	۰٫۱۰	۰٫۱۲	۰٫۳۱	۰٫۲۰	۰٫۱۵	J_2
۰٫۴۶	۱٫۴۰	۰٫۲۰	۰٫۴۰	۰٫۰۷	۰٫۴۸	۰٫۲۵	J_3
۰٫۱۸	۰٫۲۵	۰٫۱۱	۰٫۰۹	۰٫۴۰	۰٫۲۱	۰٫۱۶	J_4
۰٫۱۳	۰٫۳۲	۰٫۱۸	۰٫۱۸	۰٫۷۰	۰٫۲۵	۰٫۳۱	J_5
۰٫۱۷	۰٫۱۷	۰٫۱۴	۰٫۱۸	۰٫۱۱	۰٫۱۷	۰٫۱۵	J_6
۰٫۱۱	۰٫۲۰	۰٫۰۵	۰٫۱۷	۰٫۰۳	۰٫۱۰	۰٫۰۹	J_7
۰٫۲۵	۰٫۱۸	۰٫۲۱	۰٫۱۶	۰٫۴۶	۰٫۲۹	۰٫۲۹	J_8

جدول ۷. معیارهای ارزیابی جداساز *VCFPS* با ضریب اصطکاک ۰.۰۶.

ارزینکن	جی جی	کوبه	رینلدی	السنترو	سیلمار	نیوهال	FPX-FNY
۰٫۳۵	۰٫۳۷	۰٫۱۲	۰٫۱۷	۰٫۳۰	۰٫۲۴	۰٫۱۸	J_1
۰٫۲۹	۰٫۳۳	۰٫۱۱	۰٫۱۶	۰٫۳۱	۰٫۲۵	۰٫۱۶	J_2
۰٫۵۰	۰٫۹۹	۰٫۱۹	۰٫۴۱	۰٫۰۷	۰٫۵۲	۰٫۲۳	J_3
۰٫۲۳	۰٫۳۱	۰٫۱۱	۰٫۱۱	۰٫۴۰	۰٫۲۲	۰٫۱۶	J_4
۰٫۱۶	۰٫۳۴	۰٫۱۷	۰٫۱۷	۰٫۷۰	۰٫۲۵	۰٫۲۵	J_5
۰٫۲۲	۰٫۲۴	۰٫۱۶	۰٫۲۳	۰٫۱۱	۰٫۲۴	۰٫۱۸	J_6
۰٫۱۲	۰٫۱۴	۰٫۰۴	۰٫۱۶	۰٫۰۲	۰٫۱۲	۰٫۰۸	J_7
۰٫۲۷	۰٫۲۲	۰٫۲۱	۰٫۱۷	۰٫۴۶	۰٫۳۰	۰٫۲۹	J_8

جدول ۸. معیارهای ارزیابی جداساز *VFPI* با ضریب اصطکاک ۰.۰۹.

ارزینکن	جی جی	کوبه	رینلدی	السنترو	سیلمار	نیوهال	FPX-FNY
۰٫۳۵	۰٫۳۷	۰٫۱۳	۰٫۱۶	۰٫۳۸	۰٫۲۲	۰٫۱۹	J_1
۰٫۲۸	۰٫۳۳	۰٫۱۳	۰٫۱۴	۰٫۴۶	۰٫۲۴	۰٫۲۱	J_2
۰٫۳۹	۱٫۲۸	۰٫۱۵	۰٫۳۹	۰٫۰۴	۰٫۳۶	۰٫۱۷	J_3
۰٫۳۲	۰٫۳۶	۰٫۱۸	۰٫۱۴	۰٫۵۹	۰٫۳۰	۰٫۲۱	J_4
۰٫۲۶	۰٫۵۲	۰٫۲۶	۰٫۲۶	۰٫۷۷	۰٫۴۷	۰٫۳۵	J_5
۰٫۲۱	۰٫۲۳	۰٫۱۷	۰٫۲۰	۰٫۱۴	۰٫۲۱	۰٫۱۹	J_6
۰٫۰۸	۰٫۴۶	۰٫۰۳	۰٫۰۷	۰٫۰۲	۰٫۰۷	۰٫۰۴	J_7
۰٫۳۵	۰٫۴۲	۰٫۲۸	۰٫۲۲	۰٫۶۰	۰٫۳۹	۰٫۳۶	J_8

جدول ۹. معیارهای ارزیابی جداساز *VCFPS* با ضریب اصطکاک ۰٫۰۹.

ارزینکن	جی جی	کوبه	رینلدی	السنتر	سیلمار	نیوهال	FPX-FNY
۰٫۴۳	۰٫۴۸	۰٫۱۴	۰٫۲۰	۰٫۳۹	۰٫۲۸	۰٫۲۱	J _۱
۰٫۳۶	۰٫۴۵	۰٫۱۳	۰٫۱۷	۰٫۴۶	۰٫۲۹	۰٫۲۰	J _۲
۰٫۳۶	۰٫۶۵	۰٫۱۴	۰٫۴۰	۰٫۰۳	۰٫۳۶	۰٫۱۶	J _۳
۰٫۳۴	۰٫۴۱	۰٫۱۷	۰٫۱۴	۰٫۵۹	۰٫۳۳	۰٫۲۲	J _۴
۰٫۳۱	۰٫۴۵	۰٫۲۶	۰٫۲۵	۰٫۷۷	۰٫۴۲	۰٫۳۴	J _۵
۰٫۲۶	۰٫۲۹	۰٫۱۹	۰٫۲۵	۰٫۱۴	۰٫۲۷	۰٫۲۱	J _۶
۰٫۱۰	۰٫۱۵	۰٫۰۳	۰٫۰۷	۰٫۰۲	۰٫۰۷	۰٫۰۳	J _۷
۰٫۳۵	۰٫۴۴	۰٫۲۸	۰٫۲۱	۰٫۶۰	۰٫۳۸	۰٫۳۶	J _۸

جدول ۱۰. معیارهای ارزیابی جداساز *VFPI* با ضریب اصطکاک ۰٫۰۶ و کنترلر *WNN*.

ارزینکن	جی جی	کوبه	رینلدی	السنتر	سیلمار	نیوهال	FPX-FNY
۰٫۳۰	۰٫۳۵	۰٫۱۲	۰٫۱۵	۰٫۳۶	۰٫۲۰	۰٫۱۷	J _۱
۰٫۲۷	۰٫۳۳	۰٫۱۲	۰٫۱۴	۰٫۳۸	۰٫۲۱	۰٫۱۸	J _۲
۰٫۳۷	۰٫۹۵	۰٫۱۶	۰٫۲۹	۰٫۰۵	۰٫۲۷	۰٫۱۶	J _۳
۰٫۲۴	۰٫۳۷	۰٫۱۸	۰٫۱۳	۰٫۵۰	۰٫۲۵	۰٫۲۰	J _۴
۰٫۲۱	۰٫۴۹	۰٫۲۳	۰٫۲۶	۰٫۷۳	۰٫۳۳	۰٫۲۸	J _۵
۰٫۱۹	۰٫۲۲	۰٫۱۵	۰٫۲۰	۰٫۱۳	۰٫۲۰	۰٫۱۷	J _۶
۰٫۰۷	۰٫۱۸	۰٫۰۴	۰٫۱۰	۰٫۰۴	۰٫۰۷	۰٫۰۴	J _۷
۰٫۲۸	۰٫۲۴	۰٫۲۴	۰٫۲۱	۰٫۵۱	۰٫۳۵	۰٫۳۲	J _۸

جدول ۱۱. معیارهای ارزیابی جداساز *VCFPS* با ضریب اصطکاک ۰٫۰۶ و کنترلر *WNN*.

ارزینکن	جی جی	کوبه	رینلدی	السنتر	سیلمار	نیوهال	FPX-FNY
۰٫۳۴	۰٫۴۲	۰٫۱۳	۰٫۱۸	۰٫۳۶	۰٫۲۴	۰٫۱۹	J _۱
۰٫۲۹	۰٫۳۸	۰٫۱۲	۰٫۱۶	۰٫۳۸	۰٫۲۴	۰٫۱۸	J _۲
۰٫۳۴	۰٫۶۸	۰٫۱۶	۰٫۳۱	۰٫۰۵	۰٫۲۹	۰٫۱۵	J _۳
۰٫۲۴	۰٫۳۷	۰٫۱۸	۰٫۱۳	۰٫۵۰	۰٫۲۴	۰٫۲۰	J _۴
۰٫۲۱	۰٫۴۷	۰٫۲۲	۰٫۲۶	۰٫۷۳	۰٫۲۹	۰٫۲۸	J _۵
۰٫۲۱	۰٫۲۷	۰٫۱۷	۰٫۲۳	۰٫۱۳	۰٫۲۴	۰٫۱۹	J _۶
۰٫۱۰	۰٫۱۴	۰٫۰۳	۰٫۰۷	۰٫۰۴	۰٫۰۶	۰٫۰۴	J _۷
۰٫۲۹	۰٫۲۶	۰٫۲۴	۰٫۲۱	۰٫۵۱	۰٫۳۶	۰٫۳۲	J _۸

جدول ۱۲. معیارهای ارزیابی جداساز *VFPI* و میراگر ویسکوز. [۱۸]

ارزینکن	جی جی	کوبه	رینلدی	السنتر	سیلمار	نیوهال	FPX-FNY
۰٫۴۷	۰٫۵۱	۰٫۱۹	۰٫۲۷	۰٫۳۸	۰٫۳۲	۰٫۲۶	J _۱
-	-	-	-	-	-	-	J _۲
۰٫۲۸	۰٫۴۲	۰٫۱۷	۰٫۳۳	۰٫۰۵	۰٫۳۳	۰٫۱۸	J _۳
۰٫۴۱	۰٫۴۹	۰٫۱۸	۰٫۲۲	۰٫۵۰	۰٫۴۵	۰٫۲۵	J _۴
۰٫۲۵	۰٫۴۰	۰٫۱۸	۰٫۲۰	۰٫۶۳۶	۰٫۳۵	۰٫۲۵	J _۵
-	-	-	-	-	-	-	J _۶
-	-	-	-	-	-	-	J _۷
-	-	-	-	-	-	-	J _۸

جدول ۱۳. معیارهای ارزیابی جداساز VCFPS و میراگر ویسکوز. [۱۸]

ارزینکن	جی جی	کوبه	رینلدی	السنتر	سیلمار	نیوهایل	FPX-FNY
۰٫۵۱	۰٫۵۲	۰٫۲۲	۰٫۳۰	۰٫۳۸	۰٫۳۳	۰٫۲۸	J _۱
-	-	-	-	-	-	-	J _۲
۰٫۲۹	۰٫۴۰	۰٫۱۷	۰٫۳۴	۰٫۰۵	۰٫۳۴	۰٫۱۸	J _۳
۰٫۴۴	۰٫۵۰	۰٫۱۸	۰٫۲۵	۰٫۵۱	۰٫۴۸	۰٫۲۷	J _۴
۰٫۲۸	۰٫۴۲	۰٫۲۰	۰٫۲۳	۰٫۶۳۶	۰٫۳۳	۰٫۲۵	J _۵
-	-	-	-	-	-	-	J _۶
-	-	-	-	-	-	-	J _۷
-	-	-	-	-	-	-	J _۸

جدول ۱۴. مقایسه‌ی معیارهای ارزیابی زلزله‌ی سیلمار با جداساز FPS با ضریب اصطکاک ۰٫۰۶ (بر حسب درصد).

J _۵	J _۴	J _۳	J _۱	FPX-FNY
٪-۲۹	٪-۳	٪+۳۳	٪-۲۵	VFPI ۰٫۰۶
٪-۲۹	٪-۲۱	٪+۴۴	٪۰	VCFPS ۰٫۰۶
٪+۳۴	٪+۷	٪۰	٪-۸	VFPI ۰٫۰۹
٪+۲۰	٪+۱۸	٪۰	٪+۱۶	VCFPS ۰٫۰۹
٪۰	٪+۶۱	٪-۸	٪+۳۳	VFPI VISCOUS
٪-۶	٪+۷۱	٪-۶	٪+۳۸	VCFPS VISCOUS
٪-۶	٪-۱۱	٪-۲۵	٪-۱۷	VFPI WNN
٪-۱۷	٪-۱۴	٪-۱۹	٪۰	VCFPS WNN

جدول ۱۵. مقایسه‌ی معیارهای ارزیابی زلزله‌ی کوبه با جداساز FPS با ضریب اصطکاک ۰٫۰۶ (بر حسب درصد).

J _۵	J _۴	J _۳	J _۱	FPX-FNY
٪-۱۸	٪-۳	٪+۳۳	٪-۱۷	VFPI ۰٫۰۶
٪-۲۳	٪-۲۷	٪+۲۷	٪۰	VCFPS ۰٫۰۶
٪+۱۸	٪+۲۰	٪۰	٪+۸	VFPI ۰٫۰۹
٪+۱۸	٪+۱۳	٪-۷	٪+۱۷	VCFPS ۰٫۰۹
٪-۱۸	٪+۲۰	٪+۱۳	٪+۵۸	VFPI VISCOUS
٪-۹	٪+۲۰	٪+۱۳	٪+۸۳	VCFPS VISCOUS
٪+۵	٪+۲۰	٪+۷	٪۰	VFPI WNN
٪۰	٪+۲۰	٪+۷	٪+۸	VCFPS, WNN

جدول ۱۶. مقایسه‌ی درصد تغییرات جابه‌جایی پایه حالت‌های مختلف سیستم کنترل با جابه‌جایی پایه جداساز FPS.

متوسط زلزله‌ها	بیشینه‌ی کاهش	بیشینه‌ی افزایش	نوع سیستم کنترل
٪+۴۷	-	٪+۹۲	جداسازهای انحناء متغیر
٪+۲۵	٪-۴۰	٪+۷۵	افزایش ضریب اصطکاک جداساز انحناء متغیر
٪-۲۲	٪-۴۵	٪+۱۳	کنترل غیرفعال جداساز انحناء متغیر
٪-۱۳	٪-۲۵	٪+۳۰	کنترل نیمه فعال WNN به همراه جداساز انحناء متغیر

جدول ۱۷. مقایسه‌ی درصد تغییرات جابه‌جایی نسبی حالت‌های مختلف سیستم کنترل با جابه‌جایی نسبی جداساز FPS.

متوسط زلزله‌ها	بیشینه‌ی کاهش	بیشینه‌ی افزایش	نوع سیستم کنترل
٪-۱۹	٪-۲۷	-	جداسازهای انحناء متغیر
٪+۱۵	٪-۱۲	٪+۳۶	افزایش ضریب اصطکاک جداساز انحناء متغیر
٪+۴۱	-	٪+۹۲	کنترل غیرفعال جداساز انحناء متغیر
٪۰	٪-۱۴	٪+۲۰	کنترل نیمه فعال WNN به همراه جداساز انحناء متغیر

جدول ۱۸. مقایسه‌ی درصد تغییرات شتاب طبقات حالت‌های مختلف سیستم کنترل با شتاب طبقات جداساز FPS.

نوع سیستم کنترل	بیشینه‌ی افزایش	بیشینه‌ی کاهش	متوسط زلزله‌ها
جداسازهای انحاء متغیر	+۱۱٪	-۴۶٪	-۲۲٪
افزایش ضریب اصطکاک جداساز انحاء متغیر	+۳۴٪	-۱۸٪	+۱۱٪
کنترل غیرفعال جداساز انحاء متغیر	+۱۶٪	-۲۷٪	-۱۴٪
کنترل نیمه‌فعال WNN به همراه جداساز انحاء متغیر	+۷٪	-۱۳٪	-۵٪

دارند. مشاهده می‌شود که با استفاده از کنترل نیمه‌فعال، جابه‌جایی پایه در جداساز تطبیق‌پذیر نسبت به جداساز اصطکاکی پاندولی به طور متوسط ۱۳٪ کاهش می‌یابد و شتاب طبقات به طور متوسط ۵٪ کاهش و جابه‌جایی نسبی طبقات بدون تغییر است. بیشینه‌ی افزایش جابه‌جایی پایه در جداسازهای تطبیق‌پذیر تا ۹۲٪ است که با استفاده از کنترل غیرفعال می‌توان به ۱۳٪ و کنترل نیمه‌فعال را به ۳۰٪ کاهش داد. البته در سیستم کنترل غیرفعال، هر چند جابه‌جایی پایه، کاهش بیشتری داشته است؛ ولی جابه‌جایی نسبی طبقات بیشینه تا ۹۲٪ و شتاب طبقات تا ۱۶٪ افزایش

یافته است. در حالی که سیستم کنترل نیمه‌فعال جابه‌جایی نسبی طبقات بیشینه تا ۲۰٪ و شتاب طبقات تا ۷٪ افزایش یافته است. نتایج بیانگر این است که استفاده از کنترل غیرفعال و افزایش ضریب اصطکاک سطح لغزش، رفتار جداسازهای تطبیق‌پذیر را به جداسازهای اصطکاکی پاندولی نزدیک می‌کند و نمی‌توان از مزایای جداساز تطبیق‌پذیر استفاده کرد. کنترل نیمه‌فعال شبکه‌ی عصبی موجک در مقایسه با کنترل غیرفعال و افزایش ضریب اصطکاک سطح لغزش، عملکرد بهتری در کنترل پاسخ‌های سازه دارد.

پانویس‌ها

1. sliding isolator with multiple sliding surfaces
2. sliding isolator with variable friction
3. sliding isolator with variable curvature
4. magneto rheological elastomer
5. variable frequency pendulum isolator
6. variable curvature friction pendulum system
7. Matlab
8. root mean square
9. frequency variation factor
10. rigid plastic
11. multi-resolution analysis
12. translation
13. scaling

منابع (References)

6. Briman, V. and Ribakov, Y. "Seismic isolation columns for earthquake-resistant structures", *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, **17**(1), pp. 99-116 (2008a).
7. Briman, V. and Ribakov, Y. "Using seismic isolation columns for retrofitting buildings with soft stories", *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, **18**(5), pp. 507-523 (2008b).
8. Zayas, V.A., Low, S.S. and Mahin, S.A. "The FPS earthquake resisting system: experimental report", Report No. UCB/EERC-87/01, Earthquake Engineering Research Center, University of California (1987).
9. Kawamura, S., Hisano, M. and Nagashima, I. "Study on a sliding-type base isolation system composition and element properties", 9th Int. Conf. on Earthquake Engineering, V, Tokyo, Japan, pp. 735-740 (1988).
10. Zayas, V.A., Low, S.S. and Mahin, S.A. "A simple pendulum technique for achieving seismic isolation", *Earthquake Spectra*, **6**(2), pp. 317-333 (1990).
11. Jangid, R.S. "Stochastic response of bridges seismically isolated by friction pendulum system", *Journal of Bridge Engineering*, **13**(4), pp. 319-330 (2008).
12. Fenz, D. and Constantinou, M. "Spherical sliding isolation bearing with adaptive behavior: Theory", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **37**(2), pp. 163-183 (2008).
13. Panchal, V.R. and Jangid, R.S. "Variable friction pendulum system for near-fault ground motion", *Structure Control and Health Monitoring*, **15**(4), pp. 568-584 (2008).
14. Shaikhzadeh, A. and Karamoddin, A. "Behavior of sliding isolators with variable friction under near-fault earthquakes", *Presented at the 7th International Conference on Seismology and Earthquakes Engineering*, Tehran, Iran (2015).
15. Shaikhzadeh, A. and Karamoddin, A. "Effectiveness of sliding isolators with variable curvature in near-fault ground motions", *The Structural Design of Tall and Special Buildings* (DOI: 10.1002/tal.1258) (2015).
1. Jangid, R.S. and Datta, T.K. "Performance of base isolation systems for asymmetric building to random excitation", *Engineering Structures*, **17**(6), pp. 443-454 (1995a).
2. Constantinou, M., Mokha, A. and Reinhorn, A. "Teflon bearings in base isolation, part II: Modeling", *Journal of Structural Engineering, ASCE*, **116**(2), pp. 455-474 (1990).
3. Jangid, R.S. "Computational numerical models for seismic response of structures isolated by sliding systems", *Structural Control and Health Monitoring*, **12**(1), pp. 117-137 (2005).
4. Sharma, A. and Jangid, R.S. "Seismic response of base isolated benchmark building with variable sliding isolators", *Journal of Earthquake Engineering*, **14**(7), pp. 1063-1091 (2010).
5. Asher, J.W., Young, R.P. and Ewing, R.D. "Seismic isolation design of the arrowhead regional medical center", *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, **10**(5), pp. 321-334 (2001).

16. Lyan-Ywan, L., Tzu-Ying, L. and Shih-Wei, Y. "Theory and experimental study for sliding isolators with variable curvature", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **40**(14), pp. 1609-1627 (2011).
17. Tathagata, R., Apostolos, A., Reinhorn, M. and Constantinou, M. "Hysteric models for sliding bearing with varying frictional force", *Earthquakes Engineering & Structural Dynamics*, **42**(15), pp. 2341-2360 (2013).
18. Sharma, A. and Jangid, R.S. "Performance of variable curvature sliding isolators in base-isolated benchmark building", *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, **21**(5), pp. 354-373 (2012).
19. Yang, J., Du, H., Li, W. and et al. "Experimental study and modeling of a novel magnetorheological elastomer isolator", *Smart Materials and Structures*, **22**(11), pp. 1-14 (2013).
20. Pranesh, M. and Sinha, R. "VFPI: An isolation device for a seismic design", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **29**(5), pp. 603-627 (2000).
21. Pranesh, M. and Sinha, R. "Behaviour of torsionally coupled structures with variable frequency pendulum isolator", *Journal of Structural Engineering (ASCE)*, **130**(7), pp. 1041-1054 (2004).
22. Tsai, C.S., Chiang, T.C. and Chen, B.J. "Finite element formulations and theoretical study for variable curvature friction pendulum system", *Engineering Structures*, **25**(14), pp. 1719-1730 (2003).
23. Kalyani, A.P., Panchal, DR.V.R. and Soni, DR.D.P. "Seismic response of elevated liquid storage steel tanks isolated by VCFPS at top of tower under near-fault ground motions", *International Journal of Emerging Trends in Electrical and Electronics (IJETEE-ISSN: 2320-9569)*, **11**(2), pp.39-51 (2015).
24. Tsai, C.S., Chiang, T.C., Chen, B.J. and et al. "Piecewise exact solution for analysis of base-isolated structures under earthquakes", *Structural Engineering and Mechanics*, **19**(4), pp. 381- 399 (2005).
25. Narasimhan, S., Nagarajaiah, S., Gavin, H. and Johnson, E.A. "Smart base isolated benchmark building part I: Problem definition", *Journal of Structural Control and Health Monitoring*, **13**(2-3), pp. 573-588 (2006).
26. Nagarajaiah, S. and Narasimhan, S. "Smart base isolated benchmark building part II: Phase I sample controllers for linear isolation system", *Journal of Structural Control and Health Monitoring*, **13**(2-3), pp. 589-604 (2006).
27. Erkus, B. and Johnson, E. "Smart base isolated benchmark building part III: A samplecontroller for bilinear isolation", *Journal of Structural Control and Health Monitoring*, **13**(2- 3), pp. 605-625 (2006).
28. Narasimhan, S., Nagarajaiah, S. and Johnson, E.A. "Smart base isolated benchmark building part IV: phase II. Sample controller for nonlinear isolation systems", *Journal of Structural Control and Health Monitoring*, **15**(5), pp. 657-672 (2006).
29. Shakib, H. and Fuladgar, A. "Response to Pure-Friction sliding structures to three component earthquake excitation", *Computers and Structures*, **81**(4), pp. 189-196 (2003).
30. Nakata, S., Hanai, T., Kiriya, S.I. and et al. "Comparison of seismic performance of base-isolated house with various devices", *Journal of Structural Engineering B (Japan)*, **50B**, pp.1203-1215 (2004).
31. Kim, H. and Adeli, H. "Wavelet hybrid feedback-LMS algorithm for robust control of cable-stayed bridges", *Journal of Bridge Engineering (ASCE)*, **10**(2), pp. 116-123 (2005).
32. AL-Rousana, M. and Assaleh, K. "A wavelet-and neural network-based voice system for a smart wheel chair control", *Journal of the Franklin Institute*, **348**(1), pp. 90-100 (2011).
33. Adeli, H. and Jiang, X. "Dynamic Fuzzy Wavelet Neural Network Model for Structural System Identification", *Journal of Structural Engineering*, **132**(1), pp. 102-111 (2006).
34. Nengmou, W. and Adeli, H. "Constructing wavelet neural network algorithm for nonlinear control of large structures", *Engineering Application soft Artificial Intelligence*, **41**, pp. 249-258 (2015).