مهندسی عمران شریف (بهار ۱۳۹۸)
دوره‌ی ۲ - ۳۵، شماره‌ی ۱/۲، ص. ۵۱-۶۴

Original Article

کنترل نیمه‌فعال سازه‌ی جداساز لرزه‌یی با استفاده از جداسازهای لغزشی انحناء متغیر

سعید تقی‌زاده (دانشجوی دکتری)
عباس کرم‌الدین* (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 پدیده‌ی تشدید در پاسخ‌های جداگر حل شود. در جداسازهای تطبیق‌پذیر به دلیل کاهش یافتن نیروی بازگردانندگی، جابه‌جایی جداساز افزایش می‌یابد. در نوشتار حاضر، دو نوع جداگر انحناء متغیر به نام‌های سیستم اصطکاکی پاندولی انحنا متغیر ($VCFPS$) و جداگر پاندولی بسامد متغیر ($VFPI$) در سازه‌ی معیار جداساز لرزه‌یی استفاده شده است. زلزله‌های اعمال‌شده در سازه‌ی مذکور در دو جهت افقی بوده و از مؤلفه‌ی قائم زلزله صرف‌نظر شده است. مدل سازه‌ی معیار جداساز لرزه‌یی به‌صورت 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 به‌صورت یکنواخت در سازه قرارگرفته 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 نیمه‌فعال 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 ذکرشده توسط الگوریتم ژنتیک بهینه می‌شود. نتایج عددی نشان می‌دهند که استفاده از کنترل نیمه‌فعال برای کاهش جابه‌جایی جداساز لرزه‌یی در مقایسه با افزایش ضریب اصطکاک سطح لغزش و کنترل غیرفعال مؤثرتر است.

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

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

۱. مقدمه

جداسازهای لرزه‌یی به‌عنوان 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.[۱و۲] بسیاری از مطالعاتی که تاکنون انجام شده‌اند، بر روی بررسی پاسخ‌های لرزه‌یی سازه‌ی مجهز به سیستم جداساز لغزشی و جابه‌جایی جداساز متمرکز شده‌اند.[۳-۱۱] از میان سیستم‌های جداساز لغزشی، سیستم‌های اصطکاکی ـ پاندولی (FPS) رواج بیشتری دارند. سیستم‌های مذکور از یک سطح کروی تشکیل شده‌اند. سطح کروی با ایجاد نیروی بازگردانندگی 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 ۱۳۹۵/۱۰/۱۴، اصلاحیه ۱۳۹۶/۳/۲۱، پذیرش ۱۳۹۶/۴/۳.
DOI:10.24200/J30.2018.1931.2020

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 ذکرشده منجر به افزایش پاسخ‌های روسازه، نظیر: شتاب، دریفت و برش سازه می‌شود. کاهش شعاع انحناء جداساز باعث افزایش سختی جداساز و نیز افزایش مقدار نیروی بازگردانندگی و درنهایت، باعث افزایش شتاب و دیگر پاسخ‌های سازه می‌شود.

امروزه ایده‌ی استفاده از جداسازهای با خاصیت تطبیق‌پذیری غیرفعال پیشنهاد شده است. در سیستم‌های مذکور، سطح لغزش وابسته به جابه‌جایی جداساز است و شعاع انحنا برخلاف جداسازهای FPS که ثابت است، متغیر است و در آن‌ها به دلیل کاهش نیروی بازگردانندگی، جابه‌جایی جداساز را افزایش می‌دهند. کاهش یافتن نیروی بازگردانندگی منجر به بهبود پاسخ‌های شتاب، دریفت و سایر پاسخ‌های روسازه می‌شود. یک نمونه از سیستم‌های جداساز با خاصیت تطبیق‌پذیری غیرفعال، جداگرهای اصطکاکی پاندولی چندسطحی[1] 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 مطرح‌شده در جداگرهای چندسطحی مشاهده می‌شود که در مقایسه با سایر جداسازهای تطبیق‌پذیر از لحاظ طراحی، تولید و اجرا با مشکل کمتری مواجه خواهد شد. ولی تغییرات سختی به‌صورت 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.[12]

نوعی دیگر از جداسازهای تطبیق‌پذیر، جداگرهای اصطکاکی با ضریب اصطکاک متغیر[2] هستند که در آن‌ها، ضریب اصطکاک سطح کروی تغییر می‌کند و تابعی برحسب جابه‌جایی است. برای متغیر کردن ضریب اصطکاک در سطح کروی، زبری آن به‌صورت 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.[13-15] نمونه‌ی دیگر از جداسازهای تطبیق‌پذیر، جداسازهای با انحناء متغیر[3] هستند که در آن‌ها، شعاع سطح لغزش متغیر است. با توجه به اینکه سختی جداگرهای اصطکاکی به‌صورت 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 تطبیق‌پذیری دارد، که به‌صورت پیوسته بر حسب جابه‌جایی مفصل لغزشی در روی سطح تغییر می‌کند.[16و17] در پژوهشی در سال ۲۰۱۲،[18] 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 تطبیق‌پذیر، جداسازهای MRE[4] است. در جداسازهای MRE، به جای استفاده از ورقه‌های الاستومریک از ورقه‌های Elastomer MR استفاده می‌شود که به‌صورت 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 تطبیق‌پذیری 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.[19]

جداسازهای پاندولی بسامد متغیر ($VFPI$)[5]،[20و21] و سیستم‌های پاندولی اصطکاکی انحناء متغیر ($VCFPS$)،[6][22-24] 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، دریفت و برش روسازه را کاهش می‌دهند. که البته می‌توان برای کاهش جابه‌جایی جداساز از میراگرهای کمکی نظیر میراگرهای MR، ویسکوز و غیره استفاده کرد.

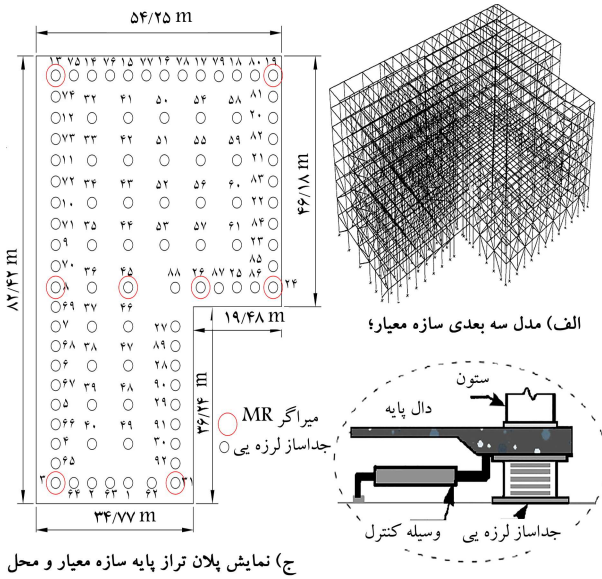
سازه‌ی معیار جداساز لرزه‌یی، ساختمان بیمارستان USC در کالیفرنیاست که پلان طبقات اول تا ششم به صوت L شکل و پلان طبقه‌های ۷ و ۸ آن به‌صورت مستطیل است. مدل سه بعدی اجزاء محدود سازه‌ی بیمارستان در نرم‌افزار متلب[7] در سال ۲۰۰۴ تهیه شده است. سازه‌ی ذکرشده توسط کمیته‌ی کنترل سازه‌ی ASCE به‌عنوان سازه‌ی معیار 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 نیمه‌فعال 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

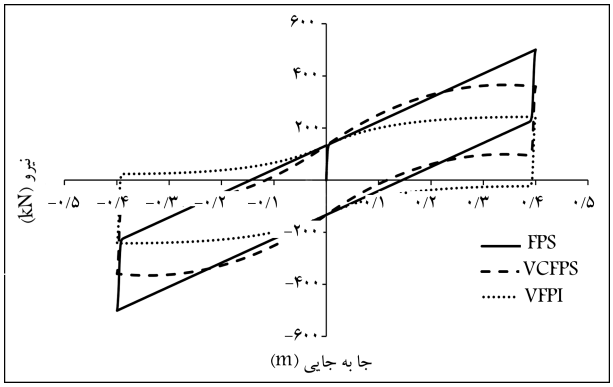
سازه‌ی معیار، یک ساختمان ۸ طبقه با مهاربندهای فلزی به طول ۸۲٫۴ متر، عرض ۵۴٫۳ متر و ارتفاع متوسط طبقات ۴٫۰۴ متر است که شبیه ساختمان بیمارستانی در لس‌آنجلس ـ کالیفرنیاست. پلان طبقات اول تا ششم، L شکل و طبقات هفتم و هشتم مستطیل شکل هستند. سقف طبقات به صورت عرشه‌ی فولادی است که به‌صورت یک کف صلب عمل می‌کند. 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 به‌صورت سیستم کشسان خطی با رفتار پیچش ـ 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

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

	شمال ـ جنوب			شرقی ـ غربی			پیچشی		
مد	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



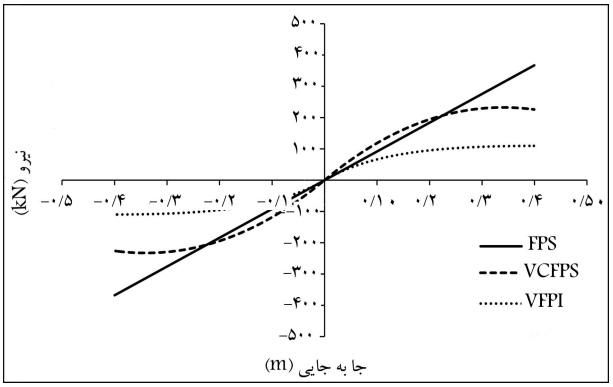
شکل ۱. نمایش مدل ۳ بعدی سازه محک جداساز لرزه‌یی و محل قرارگیری وسایل کنترل.



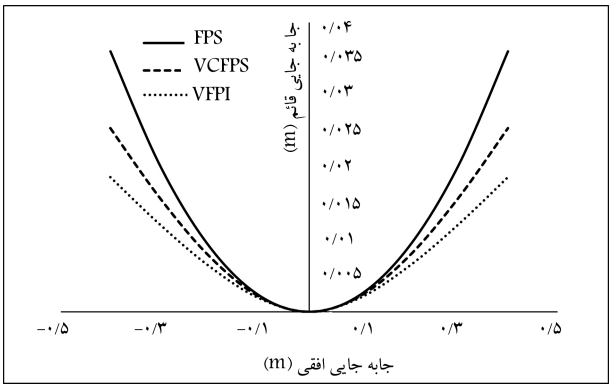
شکل ۲. نمودار نیرو ـ جابه‌جایی جداسازهای لرزه‌یی.

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

تعداد جداسازهای لرزه‌یی در تراز پایه‌ی سازه‌ی 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 سازه‌ی معیار جداساز لرزه‌یی $w = ۲۰۲۰۰۰\ KN$ است. در شکل ۲، نمودار نیرو ـ جابه‌جایی جداسازهای لرزه‌یی و در شکل ۳، نمودار نیروی بازگردانندگی 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



شکل ۳. نمودار نیروی بازگردانندگی جداسازهای لرزه‌یی.



شکل ۴. نمودار سطح لغزش جداسازهای لرزه‌یی.

کاهش‌نیروی بازگردانندگی، جابه‌جایی پایه افزایش می‌یابد.

۲.۱. مدل‌سازی سیستم کنترل

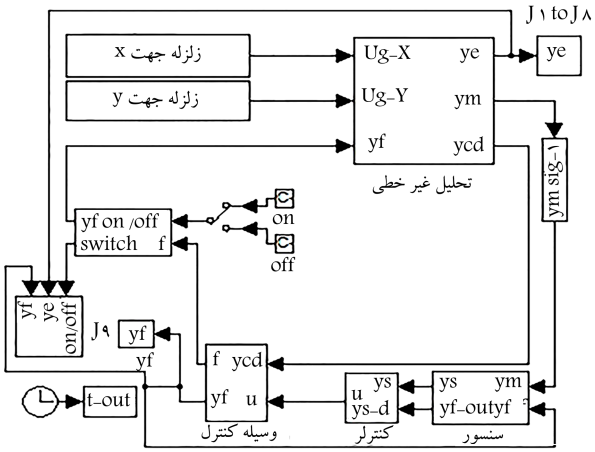
معادله‌ی حرکت کشسان روسازه به‌صورت رابطه‌ی ۱ است:

$$M\ddot{U} + C\dot{U} + KU = -MR_{\inf}(\ddot{U}_g + \ddot{U}_b) \qquad (۱)$$

که در آن، M ماتریس جرم روسازه با اندازه‌ی ۲۴ × ۲۴، C ماتریس میرایی روسازه در حالت تکیه‌گاه ثابت با اندازه‌ی ۲۴ × ۲۴، K ماتریس سختی روسازه در حالت تکیه‌گاه ثابت با اندازه‌ی ۲۴ × ۲۴ و R_{inf} ماتریس تأثیر زلزله با اندازه‌ی ۳ × ۲۴ هستند. $\ddot{U}$، $\dot{U}$ و U به ترتیب شتاب، سرعت و جابه‌جایی طبقات با اندازه‌ی ۱ × ۲۴، $\ddot{U}_b$ بردار شتاب پایه با اندازه‌ی ۱ × ۳ و $\ddot{U}_g$ بردار شتاب زمین با اندازه‌ی ۱ × ۳ هستند. معادله‌ی حرکت پایه‌ی سازه به‌صورت رابطه‌ی ۲ است:

$$R_{\inf}^{T}M[\ddot{U} + R_{\inf}(\ddot{U}_g + \ddot{U}_b)] + M_b(\ddot{U}_g + \ddot{U}_b) + f_B = ۰ \qquad (۲)$$

که در آن، M_b ماتریس جرم دال پایه با اندازه‌ی ۳ × ۳ و f_b بردار نیروهای ۹۲ عدد جداساز لرزه‌یی است که در مرکز جرم دال پایه وارد می‌شود و اندازه‌ی آن ۱ × ۳



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

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

$$\begin{bmatrix} M & MR_{inf} \\ R_{inf}^T M & R_{inf}^T M R_{inf}^T + M_b \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{U} \\ \ddot{U}_b \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{U} \\ \dot{U}_b \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} U \\ U_b \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} 0 \\ f_B \end{Bmatrix} = - \begin{bmatrix} MR_{inf} \\ R_{inf}^T MR_{inf} + M_b \end{bmatrix} \{\ddot{U}_g\} \quad (۳)$$

دستگاه معادله‌ی ۳ توسط روش شتاب میانگین ثابت نیومارک بتا حل می‌شود. گام‌های زمانی ۰٫۰۰۱ ثانیه است.[۴] 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 به‌صورت 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 SIMULINKنشان 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 به‌دست 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. ycd 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،[۲۹و۳۰] 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 صرف‌نظر شده است. در جدول ۲، زلزله‌های مورد استفاده در سازه‌ی محک نشان داده شده است که هرکدام از آن‌ها دو مؤلفه‌ی موازی گسل (FP) و عمود برگسل (FN) و یا دو مؤلفه‌ی شرقی ـ غربی (EW) و شمالی ـ جنوبی (NS) دارند.

جدول ۲. زلزله‌های سازه‌ی محک.[۲۵]

زلزله	سال وقوع	ایستگاه	بزرگی (Mw)
نورثریج	۱۹۹۴/۰۱/۱۷	نیوهال	۶/۷
نورثریج	۱۹۹۴/۰۱/۱۷	سیلمار	۶/۷
امپریال ولی	۱۹۴۰/۰۵/۱۹	السنترو	۷/۰
نورثریج	۱۹۹۴/۰۱/۱۷	رینلدی	۶/۷
کوبه	۱۹۹۵/۰۱/۱۶	کجما۰	۶/۹
تایوان	۱۹۹۹/۰۹/۲۰	تی‌سی‌یو ۰۶۸	۷/۶
ترکیه	۱۹۹۲/۰۳/۱۳	ارزینکن	۶/۹

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 به‌صورت 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 به‌دست می‌آید و ۲ معیار (J۸ و J۷) 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 به‌دست می‌آید. در جداسازهای مذکور مشاهده می‌شود که با افزایش جابه‌جایی پایه و زیادشدن شعاع انحناء، نیروی بازگردانندگی، مقدار شتاب، و دریفت طبقات کاهش می‌یابد.[۲۰و۲۱] جداساز $VFPI$ به دلیل وابستگی به زمان تناوب و مکانیزم هندسی آن درکاهش‌نیروی بازگردانندگی، مزایای دو جداساز P-F و FPS را در خود جای داده است. سختی جداساز $VFPI$ از رابطه‌ی ۵ به‌دست می‌آید:

$$y(x) = b\left(1 - \frac{\sqrt{d^2 + 2d|z_b|}}{d + |z_b|}\right) \quad (۴)$$

$$k_b(z_b) = m\omega_b^2(z_b) \quad (۵)$$

که در آن، از رابطه‌ی ۶ به‌دست می‌آید:

$$\omega_b^2(z_b) = \frac{\omega_i^2}{(1+r)^2\left(\sqrt{1+2r}\right)} \quad (۶)$$

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

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

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

زلزله	بیشینه‌ی						جذر متوسط مربعات	
	برش پایه (KN)	برش طبقه (KN)	جابه‌جایی پایه (m)	دریفت طبقات (m)	شتاب مطلق طبقه (m/s^2)	نیروی کنترل	جابه‌جایی پایه	شتاب
نیوهال	۲۰۰۱۰۰	۱۹۷۰۱۰	۱	۰٫۰۶۵۸	۲۳٫۹۷۸۹	۱	۱	۳٫۵۴۳۷
سیلمار	۱۹۹۱۲۰	۱۶۹۲۷۰	۱	۰٫۰۴۵۵	۱۷٫۸۳۱۶	۱	۱	۲٫۹۷۴۴
السنترو	۷۴۱۵۶	۶۷۳۷۱	۱	۰٫۰۲۴۷	۷٫۸۲۸۵	۱	۱	۲٫۲۳۴۹
رینلدی	۲۶۴۹۴۰	۲۵۱۷۱۰	۱	۰٫۰۹۱۳	۲۷٫۵۲۱۷	۱	۱	۵٫۶۹۰۹
کوبه	۲۷۰۲۰۰	۲۶۸۰۰۰	۱	۰٫۰۸۶۵	۲۸٫۱۴۱۷	۱	۱	۵٫۱۰۹۸
جی جی	۱۲۹۷۴۰	۱۲۱۳۳۰	۱	۰٫۰۳۷۲	۱۱٫۷۳۰۳	۱	۱	۲٫۷۰۵۶
ارزینکن	۱۲۵۴۸۰	۱۲۴۷۲۰	۱	۰٫۰۳۹۶	۱۸٫۶۳۶۸	۱	۱	۲٫۹۱۴

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

$$z_b = \sqrt{(x_b^2 + y_b^2)} \quad (۷)$$

$$r = \frac{z_b}{d} \quad (۸)$$

$$\omega_i^2 = \frac{bg}{d^2} \quad (۹)$$

$$T_i = 2\pi\sqrt{\frac{d^2}{bg}} \quad (۱۰)$$

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 هیسترتیک را باید لحاظ کرد. بنابراین در محاسبه‌ی نیروی اصطکاک جداسازها می‌توان از مدل هیسترتیک Bouc-Wen استفاده کرد. نیروی جداساز لرزه‌یی $VFPI$ در جهت‌های x و y به‌صورت روابط ۱۱ و ۱۲ به‌دست می‌آیند:

$$F_x = k_b(z_b)\, x_b + \mu w z_x \quad (۱۱)$$

$$F_y = k_b(z_b)\, y_b + \mu w z_y \quad (۱۲)$$

که در آن‌ها، μ ضریب اصطکاک سطح لغزش، w وزن سازه و z_x و z_y ضرایب هیسترتیک هستند که از معادله‌ی Bouc-Wen در رابطه‌ی ۱۳ به‌دست می‌آیند:

$$U^y \begin{Bmatrix} \dot{z}_x \\ \dot{z}_y \end{Bmatrix} = \alpha \begin{Bmatrix} \dot{x}_b \\ \dot{y}_b \end{Bmatrix} - \begin{pmatrix} z_x^2(\gamma sgn(\dot{x}_b z_x) + \beta) & z_x z_y(\gamma sgn(\dot{y}_b z_y) + \beta) \\ z_x z_y(\gamma sgn(\dot{x}_b z_x) + \beta) & z_y^2(\gamma sgn(\dot{y}_b z_y) + \beta) \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x}_b \\ \dot{y}_b \end{Bmatrix} \quad (۱۳)$$

که در آن، x_b، y_b، $\dot{x}_b$ و $\dot{y}_b$ جابه‌جایی جداساز و سرعت جداساز در جهت‌های x، y و U^y جابه‌جایی نقطه‌ی تسلیم هستند. با توجه به اینکه رفتار جداسازهای لغزشی به‌صورت 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،[۴] ۰٫۳۰۵ mm پیشنهاد شده است. در پژوهش حاضر نیز همین مقدار در نظر گرفته شده است. پارامترهای γ، β و α برای کنترل شکل حلقه‌های هیسترزیس هستند، تا مدل‌سازی جداساز به مدل‌های آزمایشگاهی نزدیک شود. در نوشتار حاضر، $\gamma = ۰٫۱$، $\beta = ۰٫۹$ و $\alpha = ۱$ 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 بازگردانندگی 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 به‌صورت مسطح است (مشابه جداساز $P-F$) به طور مشابه، وقتی FVF خیلی کوچک شود، به این معنی است که مقدار d مقدار

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 جداساز به‌صورت جداساز FPS رفتار می‌کند. بنابراین، مقدار بهینه‌یی برای مقدار پارامتر FVF لازم است، تا جداساز بتواند رفتار مناسبی که مزایای هر دو سیستم $P-F$ و FPS را داشته باشد، نشان دهد. برخی پژوهش‌ها،[۱۸و۲۴] نشان داده‌اند که با انتخاب $FVF=1$ جداساز عملکرد مطلوبی دارد. در پژوهش حاضر، زمان تناوب اولیه‌ی جداساز ۳ ثانیه و مقدار $b=0/447\,m$ و $d=1\,m$ در نظر گرفته شده است.

۲.۳. جداساز $VCFPS$

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

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

که در آن، R شعاع انحنا در مرکز سطح لغزش جداساز $VCFPS$ و z_b جابه‌جایی شعاعی جداساز است که از رابطه‌ی ۷ به‌دست می‌آید. $f(z_b)$ تابعی است که تغییرات شعاع انحنا را توصیف می‌کند و تابع $f(z_b)$ به‌صورت رابطه‌ی ۱۵ تعریف می‌شود:

$$f(z_b)=Esgn(z_b)z_b^3 \qquad (۱۵)$$

که در آن، E از رابطه‌ی ۱۶ به‌دست می‌آید:

$$E=\left(\frac{\frac{wr_0}{\sqrt{R^2-r_0^2}}-\frac{\mu w}{cos\theta_0}}{3wsgn(r_0)r_0^2}\right) \qquad (۱۶)$$

که در آن‌ها، r_0 جابه‌جایی لغزش و w وزن سازه است. همچنین θ_0 زاویه‌یی است که جداساز در فاصله‌ی r_0 می‌سازد و μ ضریب اصطکاک سطح لغزش است. نیرویی که جداساز $VCFPS$ ایجاد می‌کند و جداگر را از فاصله‌ی r_0 به حالت اولیه باز می‌گرداند، می‌توان به‌صورت روابط ۱۱ و ۱۲ تبدیل کرد، با این تفاوت که سختی جداساز ($K_b(z_b)$) به‌صورت رابطه‌ی ۱۷ تبدیل شود:[۱۸]

$$k_b(z_b)=\left(\frac{w}{\sqrt{R^2-z_b^2}}-\frac{sgn(z_b)z_b\left(\frac{wr_0}{\sqrt{R^2-r_0^2}}-\frac{\mu w}{cos\theta_0}\right)}{sgn(r_0)r_0^2}\right) \qquad (۱۷)$$

یکی از پارمترهای مهم جداساز $VCFPS$، مقدار جابه‌جایی از مرکز جداساز (r_0) است که عملاً محدوده‌ی طراحی جداگر را تعیین می‌کند؛ لذا، باید به نحو مناسبی انتخاب شود. در پژوهش حاضر، زمان تناوب اولیه‌ی جداساز ۳ ثانیه و مقدار $r_0=0/8\,m$ و $R=2/239\,m$ 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 شبکه‌های عصبی موجکی در مهندسی عمران می‌توان به مواردی، مانند: پیدا کردن نیروی کنترل بهینه، شناسایی غیرپارامتریک سازه‌ها، شبیه‌ساز برای پیش‌بینی پاسخ‌های سازه، تشخیص سلامت سازه‌ها، تعیین تعداد وسیله‌ی نقلیه‌ی مناسب در هر لحظه از زمان، و غیره اشاره داشت. تبدیل موجک، یک تبدیل انتگرالی است که از توابع پایه‌یی به نام موجک استفاده می‌کند. مزیت تبدیل موجک، بررسی سیگنال به‌صورت محلی است، که آن را مکان‌یابی زمان ـ بسامد می‌نامند. بنابراین سیگنال‌های غیرماندگار یا سیگنال‌هایی که مؤلفه‌های گذرای کوتاه‌مدتی دارند، توسط تبدیل موجک قابل تجزیه و تحلیل هستند. در تجزیه و تحلیل موجک، پارامتر مقیاس جانشین پارامتر بسامد در تجزیه و تحلیل زمان ـ بسامد می‌شود. به عبارت دیگر، تبدیل موجک، توصیف زمان ـ مقیاس را بررسی می‌کند.[۳۱]

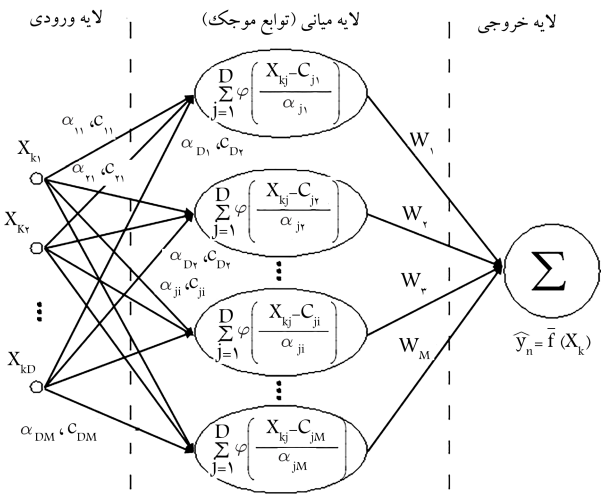
تبدیل موجک در واقع نوع تکامل‌یافته‌ی تبدیل فوریه است. تبدیل فوریه فقط یک تبدیل بسامدی است، یعنی فقط بیان‌کننده‌ی این مطلب است که بسامد f در سیگنال موردنظر وجود دارد یا خیر، اما هیچ نوع اطلاعاتی در مورد بازه‌ی زمانی متناظر با پدیداری آن بسامد در اختیار نمی‌گذارد. تبدیل موجک از یک رویکرد جایگزین برای تحلیل سیگنال‌ها استفاده می‌کند که اصطلاحاً آنالیز چند وضوحی[11] 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 به‌صورت رابطه‌ی ۱۸ تعریف می‌شود:

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

که در آن، $x(t)$ پارامترهای سیگنال موردنظر، τ و s به ترتیب پارامترهای انتقال[12] و مقیاس[13] و ψ تابع پنجره (تابع موجک) هستند. مفهوم انتقال دقیقاً مشابه با مفهوم انتقال زمانی در تبدیل فوریه‌ی زمان کوتاه است که میزان جابه‌جایی پنجره را معلوم می‌کند و وضوح اطلاعات زمانی تبدیل را در بر دارد. بر خلاف تبدیل فوریه‌ی 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 به‌طور ساده به مفهوم کشیدن یا فشرده‌کردن 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 درجه‌یی از دقت مناسب باشد.[۳۱-۳۳] شبکه‌ی عصبی موجکی، شبکه‌یی 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 ۶. ساختار شبکه‌ی عصبی موجکی.[۳۳]

۱۹ نشان داد:

$$\bar{f}(x_k) = \sum_{i=1}^{M} \omega_i \sum_{j=1}^{D} \varphi\left(\frac{x_{kj} - c_{ji}}{\alpha_{ji}}\right) \qquad (۱۹)$$

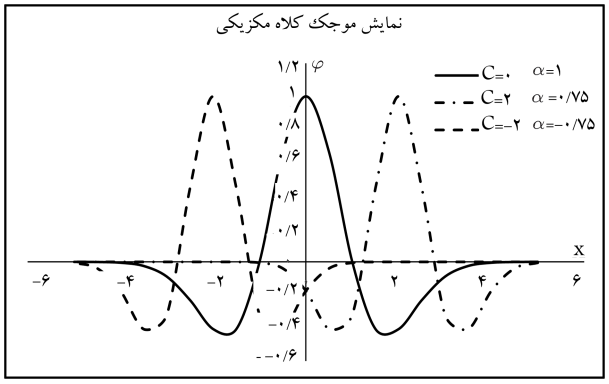
که در آن، ω_i وزن‌ها در لایه‌ی مخفی (لایه‌ی میانی) و ضرایب c_{ji} و a_{ji} به ترتیب ضرایب انتقال و مقیاس توابع موجک هستند. x_{kj} ورودی jاُم شبکه و φ تابع موجک است، که در رابطه‌ی ۲۰ ارائه شده است:

$$\varphi(z_{ji}) = |\alpha_{ji}|^{\frac{-1}{2}} \left(1 - z_{ji}^2\right) e^{\frac{-z_{ji}^2}{2}} \qquad z_{ji} = \frac{x_{kj} - c_{ji}}{\alpha_{ji}} \qquad (۲۰)$$

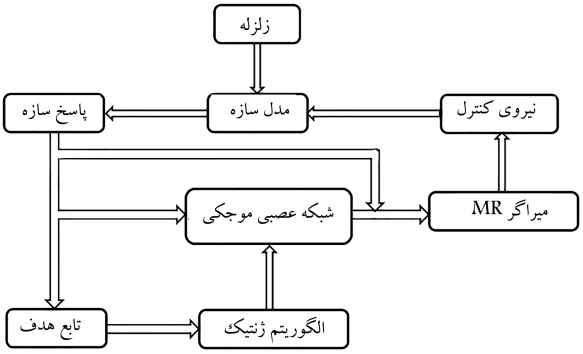
همان‌طورکه پیشتر اشاره شد، در شبکه‌های عصبی موجکی، توابع موجک در لایه‌ی پنهان شبکه‌ی عصبی قرار می‌گیرند و هر تابع موجک، یک ضریب انتقال و یک ضریب مقیاس دارد. با توجه به اینکه شبکه‌ی عصبی از چند تابع موجک تشکیل شده است؛ بنابراین شبکه‌ی مذکور، مقادیر مختلفی برای ضرایب انتقال و ضرایب مقیاس دارد. به عبارت دیگر، شبکه‌ی عصبی موجک موقعیت‌های مختلف مکانی ـ 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 ذکرشده با سایر شبکه‌های عصبی است.[۳۱-۳۴]

۶. الگوریتم کنترل پیشنهادی

در پژوهش حاضر، از دو کنترلر عصبی موجکی استفاده شده است که توسط الگوریتم ژنتیک آموزش داده می‌شوند. هرکدام 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 قرارگرفته‌اند.



شکل ۷. نمایش تابع موجک کلاه مکزیکی.



شکل ۸. ساختار مدل آموزش شبکه‌ی عصبی.

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

$$\varphi(z) = \left(1 - z^2\right) exp\left(-\frac{z^2}{2}\right), z = \left(\frac{x - c}{\alpha}\right) \qquad (۲۱)$$

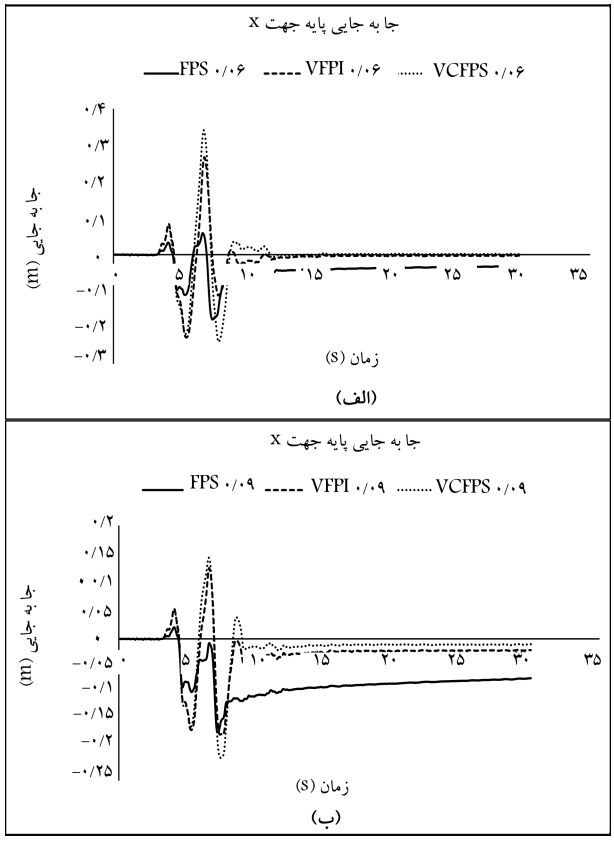
در پژوهش حاضر، با استفاده از سعی و خطا جهت رسیدن به نتیجه‌ی مطلوب، از ۱۰ تابع موجک استفاده شده است. در شکل ۸، ساختار کلی مدل مورداستفاده مشاهده می‌شود.

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 به‌صورت مجموع معیارهای ارزیابی $J_۳$ و $J_۷$ $(J_۳ + J_۷)$ تعیین و از آن برای تعیین شایستگی عضوها استفاده شده است. همچنین برای آموزش کنترلر از زلزله‌ی ال‌سنترو با شدت ۲ برابر استفاده شده است.

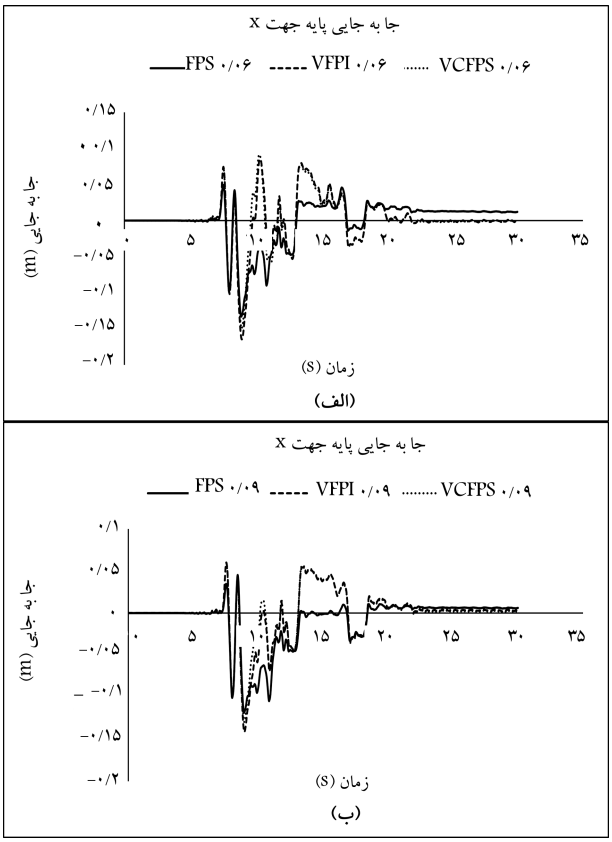
۷. نتایج عددی

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.)

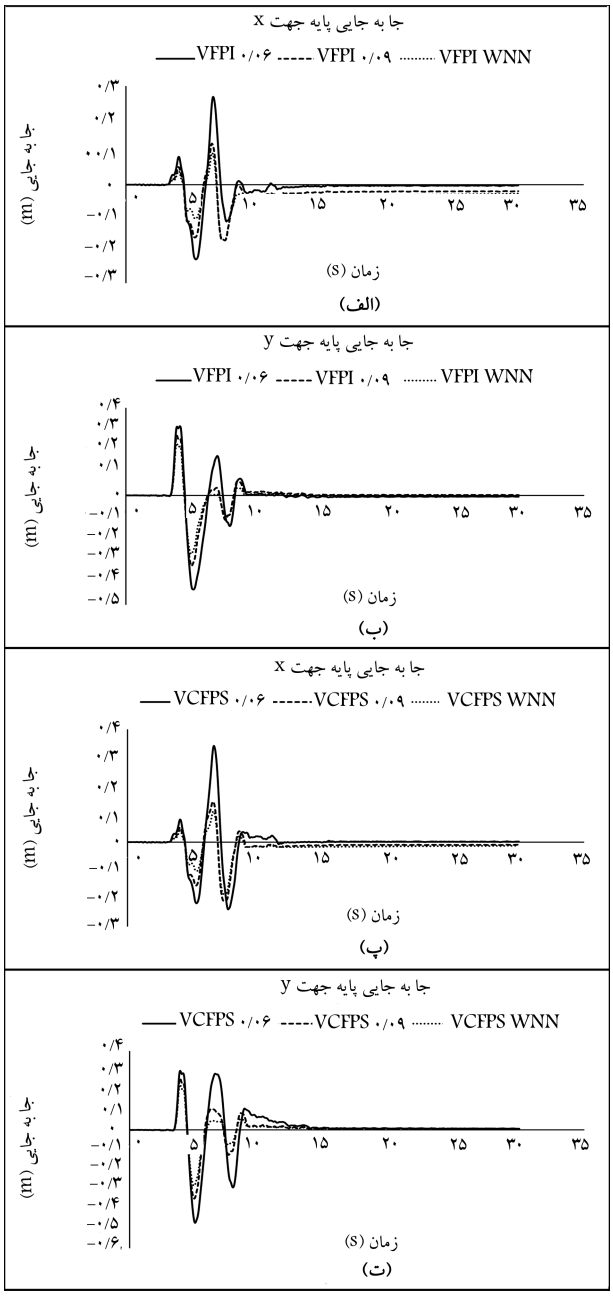
شکل‌های ۱۱ و ۱۲، کاهش جابه‌جایی پایه توسط افزایش ضریب اصطکاک سطح لغزش و کنترل نیمه‌فعال WNN را نشان می‌دهند. با مقایسه‌ی تاریخچه‌ی پاسخ جابه‌جایی پایه مشاهده می‌شود که در صورت استفاده از جداسازهای تطبیق‌پذیر، مقدار جابه‌جایی پایه افزایش می‌یابد که می‌توان با زیادکردن ضریب اصطکاک سطح



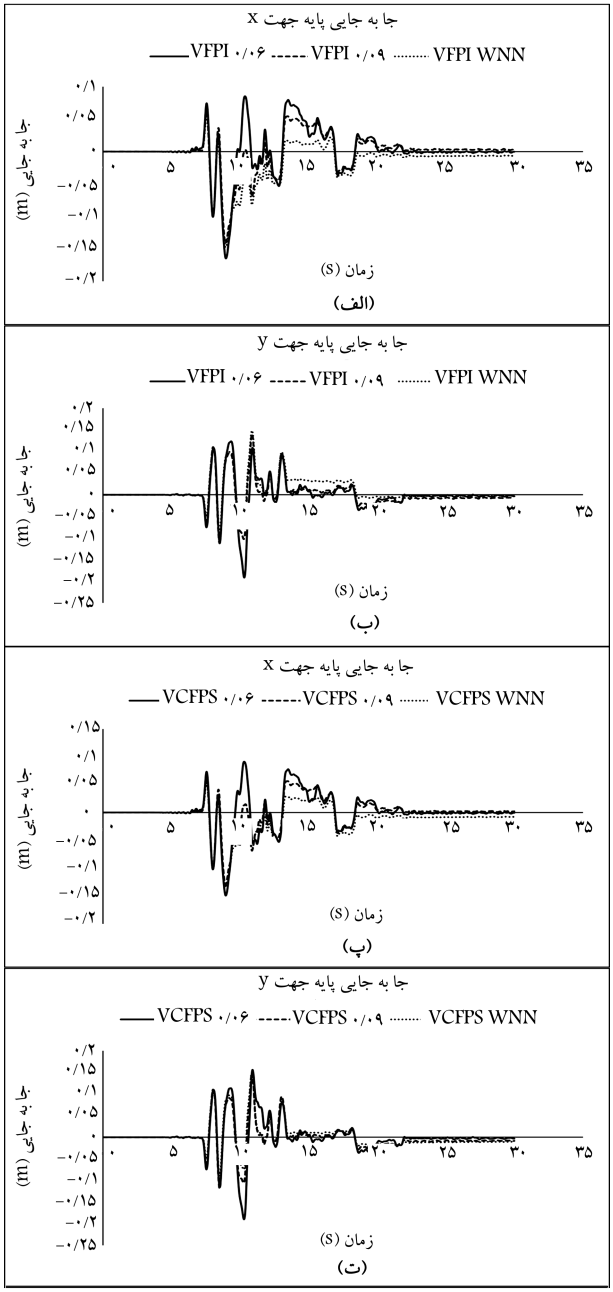
شکل ۹. تاریخچه‌ی پاسخ جابه‌جایی پایه‌ی زلزله‌ی سیلمار.



شکل ۱۰. تاریخچه‌ی پاسخ جابه‌جایی پایه‌ی زلزله‌ی کوبه.



شکل ۱۱. مقایسه‌ی تاریخچه‌ی پاسخ جابه‌جایی پایه‌ی زلزله‌ی سیلمار.



شکل ۱۲. مقایسه‌ی تاریخچه‌ی 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 لرزه‌یی $VFPI$ 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] به‌صورت کنترل غیرفعال، پاسخ‌های سازه 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.

با بررسی معیارهای ارزیابی مشاهده می‌شود که جداسازهای $VFPI$ و $VCFPS$ به دلیل کاهش یافتن نیروی بازگردانندگی، 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 موجک با کنترل غیرفعال میراگر ویسکوز مشاهده می‌شود که برش پایه به طور متوسط درکنترل نیمه فعال تمام زلزله‌ها ۲۷٪ کاهش و جابه‌جایی پایه در تمام زلزله‌ها به جز زلزله‌های جی جی و ارزینکن 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 لرزه‌یی 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 لرزه‌یی تطبیق‌پذیر در سازه‌ی معیار جداساز لرزه‌یی 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 بازگردانندگی، 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 اصطکاکی 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 اصطکاکی 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 لرزه‌یی از الگوریتم کنترل نیمه‌فعال شبکه‌ی عصبی موجکی استفاده شده است. شبکه‌های عصبی موجک در بسیاری از زمینه‌های مختلف مهندسی، پزشکی و اقتصادی کاربرد

جدول ۵. معیارهای ارزیابی جداساز FPS با ضریب اصطکاک ۰٫۰۶.

FPX-FNY	نیوهال	سیلمار	السنترو	رینلدی	کوبه	جی جی	ارزینکن
J_1	۰٫۱۸	۰٫۲۴	۰٫۳۲	۰٫۱۸	۰٫۱۲	۰٫۵۴	۰٫۳۷
J_2	۰٫۱۶	۰٫۲۶	۰٫۳۵	۰٫۱۷	۰٫۱۲	۰٫۴۸	۰٫۳۱
J_3	۰٫۲۰	۰٫۳۶	۰٫۰۵	۰٫۳۳	۰٫۱۵	۰٫۷۳	۰٫۳۸
J_4	۰٫۲۰	۰٫۲۸	۰٫۴۸	۰٫۱۳	۰٫۱۵	۰٫۴۱	۰٫۲۵
J_5	۰٫۲۸	۰٫۳۵	۰٫۶۸	۰٫۲۶	۰٫۲۲	۰٫۵۵	۰٫۲۴
J_6	۰٫۱۸	۰٫۲۴	۰٫۱۲	۰٫۲۴	۰٫۱۶	۰٫۳۴	۰٫۲۳
J_7	۰٫۰۴	۰٫۰۷	۰٫۰۳	۰٫۰۷	۰٫۰۴	۰٫۱۰	۰٫۱۰
J_8	۰٫۳۲	۰٫۳۵	۰٫۵۱	۰٫۲۱	۰٫۲۴	۰٫۳۷	۰٫۳۲

جدول ۶. معیارهای ارزیابی جداساز $VFPI$ با ضریب اصطکاک ۰٫۰۶.

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

جدول ۷. معیارهای ارزیابی جداساز $VCFPS$ با ضریب اصطکاک ۰٫۰۶.

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

جدول ۸. معیارهای ارزیابی جداساز $VFPI$ با ضریب اصطکاک ۰٫۰۹.

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

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

FPX-FNY	نیوهال	سیلمار	السنترو	رینلدی	کوبه	جی جی	ارزینکن
J_1	۰٫۲۱	۰٫۲۸	۰٫۳۹	۰٫۲۰	۰٫۱۴	۰٫۴۸	۰٫۴۳
J_2	۰٫۲۰	۰٫۲۹	۰٫۴۶	۰٫۱۷	۰٫۱۳	۰٫۴۵	۰٫۳۶
J_3	۰٫۱۶	۰٫۳۶	۰٫۰۳	۰٫۴۰	۰٫۱۴	۰٫۶۵	۰٫۳۶
J_4	۰٫۲۲	۰٫۳۳	۰٫۵۹	۰٫۱۴	۰٫۱۷	۰٫۴۱	۰٫۳۴
J_5	۰٫۳۴	۰٫۴۲	۰٫۷۷	۰٫۲۵	۰٫۲۶	۰٫۴۵	۰٫۳۱
J_6	۰٫۲۱	۰٫۲۷	۰٫۱۴	۰٫۲۵	۰٫۱۹	۰٫۲۹	۰٫۲۶
J_7	۰٫۰۳	۰٫۰۷	۰٫۰۲	۰٫۰۷	۰٫۰۳	۰٫۱۵	۰٫۱۰
J_8	۰٫۳۶	۰٫۳۸	۰٫۶۰	۰٫۲۱	۰٫۲۸	۰٫۴۴	۰٫۳۵

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

FPX-FNY	نیوهال	سیلمار	السنترو	رینلدی	کوبه	جی جی	ارزینکن
J_1	۰٫۱۷	۰٫۲۰	۰٫۳۶	۰٫۱۵	۰٫۱۲	۰٫۳۵	۰٫۳۰
J_2	۰٫۱۸	۰٫۲۱	۰٫۳۸	۰٫۱۴	۰٫۱۲	۰٫۳۳	۰٫۲۷
J_3	۰٫۱۶	۰٫۲۷	۰٫۰۵	۰٫۲۹	۰٫۱۶	۰٫۹۵	۰٫۳۷
J_4	۰٫۲۰	۰٫۲۵	۰٫۵۰	۰٫۱۳	۰٫۱۸	۰٫۳۷	۰٫۲۴
J_5	۰٫۲۸	۰٫۳۳	۰٫۷۳	۰٫۲۶	۰٫۲۳	۰٫۴۹	۰٫۲۱
J_6	۰٫۱۷	۰٫۲۰	۰٫۱۳	۰٫۲۰	۰٫۱۵	۰٫۲۲	۰٫۱۹
J_7	۰٫۰۴	۰٫۰۷	۰٫۰۴	۰٫۱۰	۰٫۰۴	۰٫۱۸	۰٫۰۷
J_8	۰٫۳۲	۰٫۳۵	۰٫۵۱	۰٫۲۱	۰٫۲۴	۰٫۲۴	۰٫۲۸

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

FPX-FNY	نیوهال	سیلمار	السنترو	رینلدی	کوبه	جی جی	ارزینکن
J_1	۰٫۱۹	۰٫۲۴	۰٫۳۶	۰٫۱۸	۰٫۱۳	۰٫۴۲	۰٫۳۴
J_2	۰٫۱۸	۰٫۲۴	۰٫۳۸	۰٫۱۶	۰٫۱۲	۰٫۳۸	۰٫۲۹
J_3	۰٫۱۵	۰٫۲۹	۰٫۰۵	۰٫۳۱	۰٫۱۶	۰٫۶۸	۰٫۳۴
J_4	۰٫۲۰	۰٫۲۴	۰٫۵۰	۰٫۱۳	۰٫۱۸	۰٫۳۷	۰٫۲۴
J_5	۰٫۲۸	۰٫۲۹	۰٫۷۳	۰٫۲۶	۰٫۲۲	۰٫۴۷	۰٫۲۱
J_6	۰٫۱۹	۰٫۲۴	۰٫۱۳	۰٫۲۳	۰٫۱۷	۰٫۲۷	۰٫۲۱
J_7	۰٫۰۴	۰٫۰۶	۰٫۰۴	۰٫۰۷	۰٫۰۳	۰٫۱۴	۰٫۱۰
J_8	۰٫۳۲	۰٫۳۶	۰٫۵۱	۰٫۲۱	۰٫۲۴	۰٫۲۶	۰٫۲۹

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

FPX-FNY	نیوهال	سیلمار	السنترو	رینلدی	کوبه	جی جی	ارزینکن
J_1	۰٫۲۶	۰٫۳۲	۰٫۳۸	۰٫۲۷	۰٫۱۹	۰٫۵۱	۰٫۴۷
J_2	-	-	-	-	-	-	-
J_3	۰٫۱۸	۰٫۳۳	۰٫۰۵	۰٫۳۳	۰٫۱۷	۰٫۴۲	۰٫۲۸
J_4	۰٫۲۵	۰٫۴۵	۰٫۵۰	۰٫۲۲	۰٫۱۸	۰٫۴۹	۰٫۴۱
J_5	۰٫۲۵	۰٫۳۵	۰٫۶۳۶	۰٫۲۰	۰٫۱۸	۰٫۴۰	۰٫۲۵
J_6	-	-	-	-	-	-	-
J_7	-	-	-	-	-	-	-
J_8	-	-	-	-	-	-	-

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

FPX-FNY	نیوهال	سیلمار	السنترو	رینلدی	کوبه	جی جی	ارزینکن
J_1	۰٫۲۸	۰٫۳۳	۰٫۳۸	۰٫۳۰	۰٫۲۲	۰٫۵۲	۰٫۵۱
J_2	-	-	-	-	-	-	-
J_3	۰٫۱۸	۰٫۳۴	۰٫۰۵	۰٫۳۴	۰٫۱۷	۰٫۴۰	۰٫۲۹
J_4	۰٫۲۷	۰٫۴۸	۰٫۵۱	۰٫۲۵	۰٫۱۸	۰٫۵۰	۰٫۴۴
J_5	۰٫۲۵	۰٫۳۳	۰٫۶۳۶	۰٫۲۳	۰٫۲۰	۰٫۴۲	۰٫۲۸
J_6	-	-	-	-	-	-	-
J_7	-	-	-	-	-	-	-
J_8	-	-	-	-	-	-	-

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

FPX-FNY	J_1	J_3	J_4	J_5
VFPI ۰٫۰۶	٪-۲۵	٪+۳۳	٪-۳	٪-۲۹
VCFPS ۰٫۰۶	٪۰	٪+۴۴	٪-۲۱	٪-۲۹
VFPI ۰٫۰۹	٪-۸	٪۰	٪+۷	٪+۳۴
VCFPS ۰٫۰۹	٪+۱۶	٪۰	٪+۱۸	٪+۲۰
VFPI VISCOUS	٪+۳۳	٪-۸	٪+۶۱	٪۰
VCFPS VISCOUS	٪+۳۸	٪-۶	٪+۷۱	٪-۶
VFPI WNN	٪-۱۷	٪-۲۵	٪-۱۱	٪-۶
VCFPS WNN	٪۰	٪-۱۹	٪-۱۴	٪-۱۷

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

FPX-FNY	J_1	J_3	J_4	J_5
VFPI ۰٫۰۶	٪-۱۷	٪+۳۳	٪-۳	٪-۱۸
VCFPS ۰٫۰۶	٪۰	٪+۲۷	٪-۲۷	٪-۲۳
VFPI ۰٫۰۹	٪+۸	٪۰	٪+۲۰	٪+۱۸
VCFPS ۰٫۰۹	٪+۱۷	٪-۷	٪+۱۳	٪+۱۸
VFPI VISCOUS	٪+۵۸	٪+۱۳	٪+۲۰	٪-۱۸
VCFPS VISCOUS	٪+۸۳	٪+۱۳	٪+۲۰	٪-۹
VFPI WNN	٪۰	٪+۷	٪+۲۰	٪+۵
VCFPS, WNN	٪+۸	٪+۷	٪+۲۰	٪۰

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

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

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

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

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 انحناء متغیر	٪+۱۱	٪-۴۶	٪-۲۲
افزایش ضریب اصطکاک جداساز انحناء متغیر	٪+۳۴	٪-۱۸	٪+۱۱
کنترل غیرفعال جداساز انحناء متغیر	٪+۱۶	٪-۲۷	٪-۱۴
کنترل نیمه‌فعال WNN به همراه جداساز انحناء 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 نیمه فعال 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.

پانوشت‌ها

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)

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).
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-fult 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).

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. "Hystertic 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., Kiriyama, 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).