

بررسی عملکرد یک الگوریتم پیشنهادی در کنترل نیمه‌فعال یک ساختمان جداسازی شده مرجع با جداسازهای غیر خطی

افشین کلانتری

استادیار پژوهشکده سازه، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران،
A.Kalantari@iiees.ac.ir

چکیده

در این مطالعه، عملکرد یک الگوریتم که پیش از این پیشنهاد شده در مقایسه با دو روش کنترل دیگر در کنترل نیمه‌فعال یک ساختمان مرجع دارای سامانه جداسازی لرزه‌ای غیرخطی که توسط یک گروه تحقیقاتی در محیط نرم‌افزاری $^{\circ}$ MATLAB و $^{\circ}$ SIMULINK ارائه گردیده، بررسی شده است. الگوریتم مورد نظر به گونه‌ای طراحی گردیده که منحنی‌های هیستریزیس برش پایه ایجاد شده در ساختمان، مشابه منحنی‌های هیستریزیس ایجاد شده توسط تکیه‌گاه‌های اصطکاکی باشند. در کنار سامانه کنترلی یاد شده و برای مقایسه نتایج، از سامانه کنترل غیرفعال با میراگرهای روغنی با رفتار ویسکوز و همچنین سامانه کنترل نیمه‌فعال با میراگرهای متغیر کنترل شده توسط الگوریتم اسکای- هوک استفاده شده است. تحلیلها تحت هفت جفت شتابنگاشت صورت گرفته است. نمودارهای هیستریزیس نیروی میراگر در مقابل تغییرمکان تحت این تحریکها ارائه شده‌اند. نتایج نشان می‌دهند روشهای نیمه‌فعال مورد بررسی نسبت به روش غیرفعال دارای شاخصهای عملکردی مناسبتری هستند. روش کنترل پیشنهادی در مواردی در مقایسه با روش اسکای- هوک در کاهش پاسخها در این مسأله موفق عمل نموده، اما تغییرات ناگهانی در نیروی میراگرها توسط این الگوریتم موجب افزایش شتاب طبقات گردیده و در مجموع عملکرد آن را نسبت به الگوریتم اسکای- هوک کاهش داده است.

کلید واژه‌ها:

جداسازی لرزه‌ای؛
کنترل نیمه‌فعال؛
ساختمان جداسازی شده مرجع؛
میراگر متغیر

۱- مقدمه

در سالهای اخیر روشهای مختلفی برای ارتقای عملکرد لرزه‌ای سازه‌ها پیشنهاد و به اجرا گذاشته شده است. توسعه فعالیتها در زمینه بهسازی لرزه‌ای سازه‌ها در ایران نیز به توسعه تحقیقات و فعالیتهای مهندسی در این زمینه در کشور کمک نموده است. در این بین جداسازی لرزه‌ای سازه‌ها، از روشهای موفق بوده که با توجه روزافزون محققان و مهندسان روبه‌روست [۱-۲]. در این روش با افزایش دوره تناوب طبیعی سازه، مشخصات دینامیکی سازه از محدوده پریودهای دارای خطر زیاد زمین‌لرزه دوره شده و پاسخ سازه کنترل می‌شود. پیشرفتهای اخیر در زمینه تجهیزات دیجیتالی و سامانه‌های مکانیکی و فناوری حسگرها توسعه چشمگیری را در دانش کنترل لرزه‌ای سازه‌ها ایجاد نموده است [۳]. این پیشرفتهای امکان ساخت تجهیزاتی همچون میراگرهای متغیر با امکان تغییر سریع نیروی میرایی و با ظرفیتهای بالای نیروی ایجاد شده و تجهیزات اندازه‌گیری و پردازش سریع اطلاعات سیگنال مانند حسگرها و بوردهای جدید DSP را فراهم نموده که در کنار هم و با کمک یک الگوریتم محاسباتی به گونه‌ای هوشمندانه قادر به کاهش پاسخ سازه در زمان زلزله هستند. با توجه به طبیعت تصادفی در بارهای ناشی از زلزله، وجود یک سامانه هوشمند که در آن تغییر نیرو بر اساس شرایط اعمالی و الگوریتم مشخصی صورت می‌گیرد، امکان ایجاد رفتاری بهتر از رفتار سامانه‌های غیرفعال را به وجود می‌آورد. در سالهای اخیر استفاده از سازه‌های مرجع برای برگزاری فعالیتهای مشترک پژوهشی در روشهای مختلف کنترل لرزه‌ای سازه‌ها توسعه یافته است. به این منظور ناراسیمهان و همکاران [۴] مدلی از یک ساختمان مرجع دارای جداسازهای خطی را

در سالهای اخیر روشهای مختلفی برای ارتقای عملکرد لرزه‌ای سازه‌ها پیشنهاد و به اجرا گذاشته شده است. توسعه فعالیتها در زمینه بهسازی لرزه‌ای سازه‌ها در ایران نیز به توسعه تحقیقات و فعالیتهای مهندسی در این زمینه در کشور کمک نموده است. در این بین جداسازی لرزه‌ای سازه‌ها، از روشهای موفق بوده که با توجه روزافزون محققان و مهندسان روبه‌روست [۱-۲]. در این روش با افزایش دوره تناوب طبیعی سازه، مشخصات دینامیکی سازه از محدوده پریودهای دارای خطر زیاد زمین‌لرزه دوره شده و پاسخ سازه کنترل می‌شود. پیشرفتهای اخیر در زمینه تجهیزات دیجیتالی و سامانه‌های مکانیکی و فناوری حسگرها توسعه چشمگیری را در دانش کنترل لرزه‌ای سازه‌ها ایجاد نموده است [۳]. این پیشرفتهای امکان ساخت تجهیزاتی همچون میراگرهای متغیر با امکان

موجب ساده نمودن الگوریتم و کم هزینه شدن اجرای کنترل در سازه می‌شود. در مطالعات قبلی عملکرد این الگوریتم در زمان کار با سامانه جداسازی با رفتار خطی در نسل اول مسأله ساختمان جداسازی شده مرجع بررسی شده است [۱۳]. همچنین قابلیت پیاده‌سازی این سامانه کنترل توسط یک میراگر روغنی از طریق مجموعه‌ای از مطالعات آزمایشگاهی و نظری مورد بررسی و تأیید قرار گرفت [۱۴].

در این مطالعه مدل عددی نسل دوم ساختمان مرجع مجهز به سامانه جداسازی دارای تکیه‌گاههای پاندولی اصطکاکی (FPS) به کار گرفته شده است. مدل یاد شده در سال ۲۰۰۶ توسط ناگاراچایا و همکارانش [۱۵] به منظور بررسی عملکرد الگوریتم‌های کنترلی در کاهش پاسخ لرزه‌ای ساختمانهای جداسازی شده طراحی و در اختیار محققین قرار گرفته است. به منظور مقایسه رفتار سامانه کنترل علاوه بر الگوریتم پیشنهادی، دو روش کنترل دیگر طراحی و تحلیل شده‌اند. در حالت اول از میراگرهای روغنی غیرفعال با رفتار ویسکوز و در حالت دوم از میراگرهای متغیر MR کنترل شده با الگوریتم اسکای- هوک کمک گرفته شد.

در ادامه ابتدا الگوریتم FNS معرفی شده و در کنار آن به مبانی نظری روشهای کنترل بکار رفته دیگر پرداخته شده است. در بخش بعد ضمن معرفی اجزای ساختمان مرجع تحت مطالعه، مدل مورد نظر تحت هفت جفت شتابنگاشت با بکارگیری هر یک از سه روش کنترل تحلیل و نتایج مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. به منظور ارزیابی نتایج حاصل از تحلیل، مدل نرم‌افزاری مورد استفاده ۹ شاخص عملکردی را محاسبه و به عنوان خروجی ثبت می‌نماید. در بخش نتایج، منحنی‌های هیستریزس نیروی میراگرها و نمودارهای مقایسه‌ای شاخص‌های عملکرد سازه ارائه خواهد شد.

۲- معرفی روشهای کنترل مطالعه شده

۲-۱- الگوریتم پیشنهادی اصطکاکی - سختی شبه منفی (FNS)

الگوریتم FNS روشی پیشنهادی برای محاسبه سیگنال دستور انتقالی به میراگر متغیر است به گونه‌ای که منحنی‌های هیستریزس حاصل از جمع نیروی میرایی در میراگرهای متغیر و نیروی بازگرداننده ایجاد شده در تکیه‌گاههای جداساز لرزه‌ای مشابه منحنی‌های ایجاد شده در تکیه‌گاههای اصطکاکی گردد. تکیه‌گاههای اصطکاکی دارای منحنی‌های هیستریزس با سطح پوشش قابل توجهی هستند که مبین استهلاک انرژی مناسب

برای ارزیابی روشهای مختلف پیشنهادی توسط پژوهشگران مختلف در یک بستر مشترک ارائه نموده‌اند.

مدل یاد شده به جداسازهای با رفتار خطی مجهز شده بود. با توجه به اینکه در مواردی از جداسازهای غیرخطی برای ساختمانها استفاده می‌شود. از این رو فاز دوم این مدل مرجع با جداسازهای غیرخطی تدوین شد. الگوریتم‌های مختلفی برای کنترل لرزه‌ای نیمه‌فعال سازه‌های دارای جداسازهای خطی پیشنهاد گردیده‌است. از جمله می‌توان به روش LQG توسط ارکوس و جانسون [۵]، روش پالس اصطکاکی ناپیوسته توسط ژو و همکاران [۶]، روش نیروی لغزش متغیر توسط نیتا و همکاران [۷] و روشهای مختلف مشتق از کنترل بهینه توسط جونگ و همکاران [۸] اشاره کرد. برای کنترل ساختمانهای با رفتار غیرخطی نیز الگوریتم‌های متعددی پیشنهاد شده‌است. به این منظور ناگاراچایا و همکاران [۹] فاز دوم مسأله مرجع را برای یک ساختمان دارای جداسازهای غیرخطی طراحی نمودند که موضوع مطالعه مشترک بسیاری از محققین گردید. تافلاندیس و همکاران [۱۰] روش احتمالاتی را برای تدوین یک الگوریتم برای کنترل ساختمان مرجع فاز دوم با جداسازهای غیرخطی پیشنهاد نمود. ژو و آگراوال [۱۱] این بار کارایی الگوریتم‌های پیشنهادی خود را که بر مبنای عملکرد تکیه‌گاههای اصطکاکی تدوین شده‌اند برای کنترل این فاز از مسأله بررسی کردند. فاروق علی و راماسوامی [۱۲] هم الگوریتمی بر مبنای منطق فازی که توسط الگوریتم ژنتیک بهینه شده بود را برای کنترل این مسأله به کار بردند.

در اغلب این مطالعات از بردارهای خطی کنترلی استفاده شده است. از این رو نیروی کنترل در آنها به طور خطی افزایش یافته و امکان محدود نمودن حداکثر برش پایه توسط سامانه کنترلی تعریف نشده است. در این تحقیق عملکرد یک سامانه کنترل مرکب ($Hybrid Control System$) برای کاهش پاسخ دینامیکی ساختمان مرجع جداسازی شده فاز دوم مورد مطالعه قرار گرفته است. در این سیستم کنترل، میراگرهای متغیر در کنار جداسازهای پاندولی اصطکاکی در نظر گرفته شده‌اند. این الگوریتم به گونه‌ای طراحی شده تا منحنی هیستریزس برش پایه ساختمان مورد مطالعه که حاصل از نیروی برگرداننده در جداسازها و نیروی میراگرهاست مشابه منحنی ایجاد شده در تکیه‌گاههای اصطکاکی گردد. در طول مطالعه از این الگوریتم با نام FNS یاد خواهد شد. بر خلاف پیچیدگی موجود در اغلب روشهای کنترل، ایده روش FNS ساده بوده و در محاسبات آن تنها به میزان پاسخ سازه در محل میراگر احتیاج است. این امر

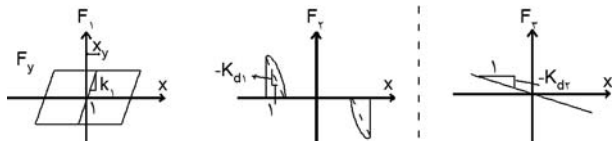
$$F_{\dot{\gamma}} = k_{d1}u + c_{d1}\dot{u} \quad (4)$$

در این روابط $Z \in [-1, +1]$ عبارتست از مؤلفه هیستریزس حاصل از رابطه بوک-ون مطابق رابطه (5)، همچنین F_y حد تسلیم تعیین شده در زمان طراحی سیستم برای مدل معادل اصطکاکی است. $\hat{F}_{\dot{\gamma}}$ توسط رابطه (6) محاسبه می‌شود. پارامترهای A, γ, β و n در رابطه (5) به ترتیب برابر با $1, 0.5$ و 0.5 در نظر گرفته شده‌اند [16].

$$\dot{Z} = -\gamma|\dot{u}|Z|Z|^{n-1} - \beta\dot{u}|Z|^n + A\dot{u} \quad (5)$$

$$\hat{F}_{\dot{\gamma}} = \begin{cases} k_{d1}Zu_y + k_{c1}\dot{u}, & |F_1 + k_{d1}Zu_y + c_{d1}\dot{u}| < F_y \\ F_y - F_1, & |F_1 + k_{d1}Zu_y + c_{d1}\dot{u}| > F_y \end{cases} \quad (6)$$

پارامترهای k_{d1} و c_{c1} به ترتیب عبارتند از سختی شبه منفی و ضریب میرایی در مؤلفه نیروی $F_{\dot{\gamma}}$. u_y تغییرمکان معادل تسلیم در زمان نیروی F_y می‌باشد. k_{d2} و c_{c2} نیز به ترتیب سختی شبه منفی و ضریب میرایی در مؤلفه نیروی F_3 هستند. شکل (2) مؤلفه‌های $F_1, F_{\dot{\gamma}}$ و $F_{\dot{\gamma}}$ را برای یک سامانه یک درجه آزادی به طور شماتیک نمایش می‌دهد.

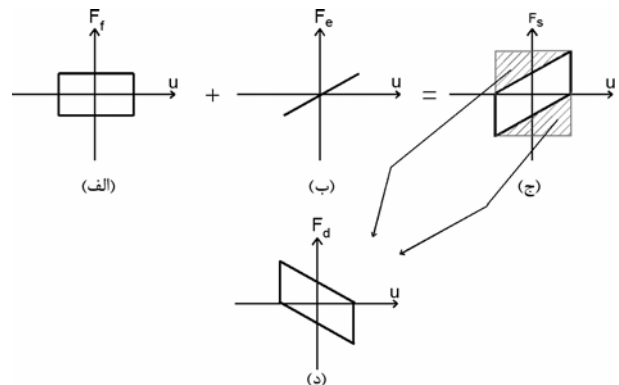


شکل 2. مؤلفه‌های $F_1, F_{\dot{\gamma}}$ و $F_{\dot{\gamma}}$ برای نیروی میرایی متغیر F_d در روش پیشنهادی.

پیروی نیروی ایجاد شده از مؤلفه هیستریزس (Z) پیش از رسیدن به مقدار حداکثر نیرو (F_y) موجب می‌شود تا بر خلاف تکیه‌گاههای اصطکاکی در این روش کنترل در ارتعاشات نسبتاً کم، مقدار حداکثر شتاب انتقالی به سازه بالادست به ازای ایجاد تغییرمکانی در حد قابل قبول کاهش یابد. بر این اساس، مؤلفه F_1 به منظور تعریف حداکثر نیروی برش پایه هدف در الگوریتم به کار گرفته می‌شود. برای محاسبه این مؤلفه از رابطه بوک-ون کمک گرفته شده است. شیب اولیه منحنی هیستریزس این مؤلفه بر اساس نیازهای سازه مورد نظر و نوع ورودی متغیر خواهد بود. برای اینکه منحنی هیستریزس برش پایه هر چه بیشتر به رفتار تکیه‌گاههای اصطکاکی نزدیک شود، مؤلفه دوم یا $F_{\dot{\gamma}}$ معرفی شده است. در این مؤلفه مقدار پارامتر c_{d1} نقش اساسی داشته و در زمان تنظیم پارامترها براساس رفتار سازه و نوع تحریک(های) ورودی و معیارهای عملکردی مورد نظر تعیین می‌گردد. مؤلفه $F_{\dot{\gamma}}$ نیز رفتار شبه منفی را در نیروی نهایی به وجود خواهد آورد. در مطالعه ساختمان مرجع مورد نظر،

توسط آنهاست. این تجهیزات همچنین حداکثر نیرو و شتاب انتقالی به سازه بالادست را نیز محدود می‌نمایند. اما در صورت بروز تغییرمکان در این نوع تکیه‌گاهها در زمان ارتعاش، امکان ایجاد تغییرمکانهای پسماند پس از زلزله در این تجهیزات وجود خواهد داشت. از سوی دیگر سامانه‌های جداساز متشکل از تکیه‌گاههای لاستیکی امکان بازگرداندن سازه به موقعیت اولیه را دارا هستند. همچنین از انتقال ارتعاشات با فرکانس بالا که اغلب برای رو سازه سامانه جداسازی مخرب هستند جلوگیری می‌کنند. الگوریتم پیشنهاد شده با ایده استفاده از نقاط قوت سامانه‌های جداساز اصطکاکی و لاستیکی و کاهش نقاط ضعف این نوع تکیه‌گاهها طراحی گردیده است.

در مدل ساختمان مورد مطالعه تکیه‌گاههای FPS به عنوان سامانه جداساز با رفتار غیرخطی به خدمت گرفته شده‌اند. در این حالت رفتار سیستم میراگر متغیر همراه به گونه‌ای طراحی می‌شود تا منحنی هیستریزس حاصل که برای یک سامانه یک درجه آزادی به صورت شماتیک در شکل شماره (1) نمایش داده شده، ضمن عدم تغییر حداکثر نیروی ایجاد شده، بیشترین سطح اشغال را شامل شود.



شکل 1. نمایش شماتیک دیدگاه مورد نظر در طراحی الگوریتم در این مسأله.

به این منظور نیروی میرایی F_d در این الگوریتم مطابق رابطه (1) متشکل از سه مؤلفه می‌باشد:

$$F_d = \begin{cases} F_1 + F_{\dot{\gamma}} + F_{\dot{\gamma}} & \text{if } (F_1 + F_{\dot{\gamma}} + F_{\dot{\gamma}}) \times \dot{u} > 0 \\ 0 & \text{if } (F_1 + F_{\dot{\gamma}} + F_{\dot{\gamma}}) \times \dot{u} < 0 \end{cases} \quad (1)$$

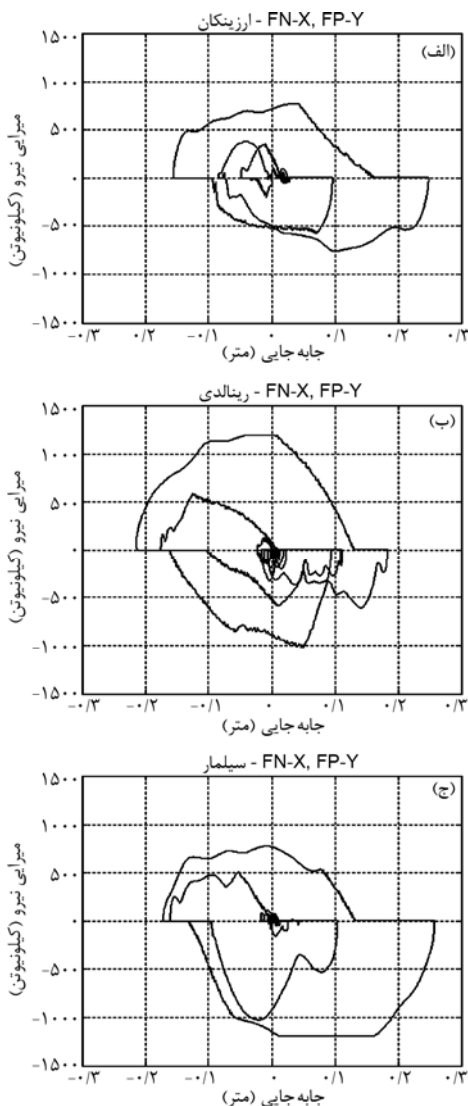
در این رابطه، \dot{u} سرعت حرکت پیستون میراگر متغیر است. هر یک از مؤلفه‌های $F_1, F_{\dot{\gamma}}$ و $F_{\dot{\gamma}}$ به ترتیب توسط سه رابطه (2)، (3) و (4) محاسبه می‌شوند:

$$F_1 = F_y Z \quad (2)$$

$$F_{\dot{\gamma}} = \begin{cases} \hat{F}_{\dot{\gamma}}, & |Z| < 1/0 \text{ and } \hat{F}_{\dot{\gamma}}\dot{u} > 0 \\ 0, & |Z| = 1/0 \text{ or } \hat{F}_{\dot{\gamma}}\dot{u} < 0 \end{cases} \quad (3)$$

الگوریتم اسکای-هوک نیز به صورت یک بلوک $^{®}$ SIMULINK طراحی شده تا نیروی متغیر ایجاد شده توسط آن در مدل عددی ساختمان مرجع شبیه‌سازی گردد.

نشان داده شده که در سامانه‌های با مقدار میرایی نسبی یکسان، روش کنترل نیمه‌فعال اسکای-هوک رفتاری بینابین روش اسکای-هوک فعال و میرایی ویسکوز غیرفعال مرسوم دارد. بر اساس این مطالعات وقتی ضریب میرایی در سامانه نیمه‌فعال اسکای-هوک بدون محدودیت افزایش یابد، پاسخ در حد پاسخ سامانه اسکای-هوک با میرایی نسبی $1/0$ محدود می‌ماند [۱۷]. از این رو با در نظر گرفتن این مقدار، میزان ضریب میرایی اسکای-هوک $C_{sky} = 3/7 \times 10^4 \text{Ns/m}$ در نظر گرفته شده‌است. شکل (۴) نیروی میرایی اسکای-هوک در مقابل تغییر مکان پیستون میراگر را در مدل تحت سه زلزله مختلف نمایش داده‌است.



شکل ۴. منحنی هیستریزس نیروی میرایی اسکای-هوک الف) زلزله ارزینکان، ب) زلزله نورتریج، ایستگاه رینالدی ج) زلزله نورتریج، ایستگاه سیلمار.

پارامترهای در نظر گرفته شده برای الگوریتم FNS در جدول (۱) ارائه شده‌اند. انتخاب این پارامترها بر اساس نحوه عملکرد الگوریتم و حداقل نمودن شاخصهای عملکرد در نتایج است.

جدول ۱: پارامترهای الگوریتم FNS

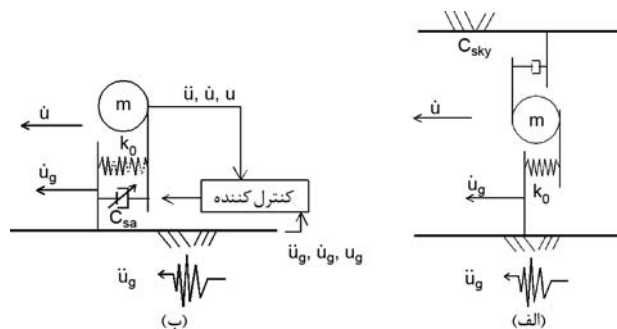
پارامتر	ارزش
F_y	۴۰۰ کیلو نیوتن
u_y	۰/۰۱ متر
k_{d1}	$-F_y/u_y$
c_{d1}	۲۷۰ کیلو نیوتن ثانیه بر متر
k_{d2}	۳۲۱۸ کیلو نیوتن بر متر
c_{d2}	۴۰۰ کیلو نیوتن ثانیه بر متر

یک بلوک ویژه برای الگوریتم FNS در محیط $^{®}$ SIMULINK طراحی گردید تا نیروی متغیر ایجاد شده توسط این روش در مدل عددی ساختمان مرجع شبیه‌سازی شود.

۲-۲- الگوریتم اسکای-هوک

بر خلاف میراگرهای ویسکوز غیرفعال، نیروی میرایی در الگوریتم اسکای-هوک مطابق شکل (۳) در هر لحظه به صورت ضربی از سرعت مطلق پیستون توسط رابطه (۷) تعیین می‌گردد [۱۷].

$$F = C(\dot{u} + \dot{u}_g) \quad (7)$$

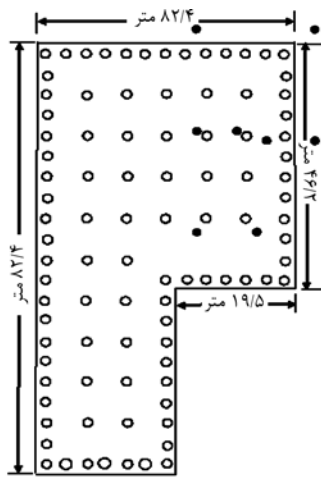


شکل ۳. میراگر اسکای هوک. الف) غیرفعال، ب) نیمه‌فعال.

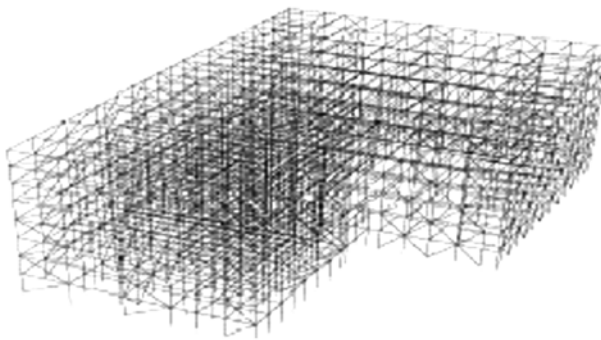
در رابطه (۷)، F نیروی میراگر، C ضریب میرایی \dot{u} و \dot{u}_g به ترتیب سرعت نسبی جرم و سرعت ارتعاش زمین هستند. نیروی میراگر متغیر بر اساس الگوریتم اسکای-هوک از رابطه (۸) محاسبه می‌گردد:

$$F_d = \begin{cases} C_{sky}(\dot{u} + \dot{u}_g) \dot{u} > 0 \\ 0 & (\dot{u} + \dot{u}_g) \dot{u} < 0 \end{cases} \quad (8)$$

در این رابطه، C_{sky} نماینده ضریب میرایی میراگر متغیر جایگزین شده‌است.



(الف)



(ب)

شکل ۵. پلان و نمای کلی ساختمان جداسازی شده مرجع.

در نسل اول این مسأله برای این ساختمان ۹۲ جداساز با رفتار خطی در نظر گرفته شد که دوره تناوب طبیعی سازه را تا ۳ ثانیه افزایش می‌دهد.

برای بررسی عملکرد سامانه کنترل تعبیه شده در مدل، ۹ معیار عملکردی تعریف گردید که در جدول (۳) ارائه شده‌اند. محدودیتهایی که باید توسط محققان در ساز و کار کنترل‌کننده سامانه اعمال شوند عبارتند از:

- تعداد میراگر قابل نصب در هر جهت حداکثر هشت دستگاه است.
- حداکثر ولتاژ قابل ارسال به هر میراگر به ± 10 محدود می‌باشد.
- حداکثر نیروی متغیر ایجاد شده توسط میراگرها باید از حداکثر نیروی بازگرداننده در جداسازها کمتر باشد.
- به لحاظ محدودیت در ولتاژ، حداکثر نیروی ایجاد شده توسط هر میراگر محدود است.

موقعیت میراگرها با دایره‌های پررنگ در پلان شکل (۵) نمایش داده شده‌است.

نتایج کاربرد الگوریتم پیشنهادی در کنترل نسل اول این مسأله توسط ناراسیمهان و همکاران [۴] منتشر شده است.

۳-۲- میراگرهای غیرفعال ویسکوز

به عنوان حالت سوم کنترل، مدل عددی میراگرهای غیرفعال ویسکوز به خدمت گرفته شده است. برای محاسبه نیروی حاصل از میراگر ویسکوز مورد نظر، نسبت میرایی مود اول ارتعاش سازه محاسبه می‌شود. فرض می‌شود که سازه بالادست سیستم جداسازی به صورت یک سامانه یک درجه آزادی ارتعاش نماید. ضریب میرایی بحرانی c_{cr} در مود اول توسط رابطه (۹) برآورد می‌شود.

$$c_{cr} = 2\sqrt{km} \quad (9)$$

در این رابطه k سختی معادل سیستم جداسازی و m جرم سازه بالادست است.

دوره تناوب طبیعی مود اول در هر دو جهت T ، ۳ ثانیه در نظر گرفته شده [۱۵] و با توجه به برش پایه ایجاد شده توسط این سامانه نسبت میرایی ۱۰٪ برای سامانه میرایی منظور می‌گردد.

۳- تبییه سامانه‌های کنترل در مدل عددی

۳-۱- نسل اول ساختمان جداسازی شده مرجع

یکی از مراحل مطالعاتی بر روی روشهای کنترل لرزه‌ای ارزیابی عملکرد آنها در کاهش پاسخ دینامیکی سازه در زمان زلزله و مقایسه آن با سایر روشهای طراحی و کنترل است. همان‌طور که در مقدمه نیز ذکر شد، ارائه مدل‌های مرجع به منظور انجام این نوع مطالعات در یک مدل مشترک توسط محققان مختلف صورت پذیرفته است. ناگاراچایا و همکارانش [۴] در سال ۲۰۰۴ به طراحی و ارائه یک مدل عددی از یک ساختمان جداسازی شده با رفتار خطی پرداختند. ایشان با مدلسازی یک ساختمان که پلان و نمای کلی آن در شکل‌های (۵) و (۶) ارائه شده و ایجاد سامانه جداسازی با رفتار خطی در پایه آن سایر محققان را به ارزیابی روشهای کنترل لرزه‌ای خود توسط این مدل دعوت نمودند.

ساختمان یاد شده یک ساختمان هشت طبقه با سازه فولادی و مهاربندی در دو جهت بود که مدل عددی آن با رفتار خطی در محیط نرم‌افزاری $MATLAB^{\circledR}$ و $SIMULINK^{\circledR}$ طراحی گردیده است. مشخصات دوره تناوب سازه اصلی در جدول (۲) ارائه شده است.

جدول ۲: دوره تناوب سه مود اول ارتعاشی ساختمان مرجع در حالت بدون سامانه جداسازی.

مود	شمال - جنوب			شرق - غرب			پیچشی		
	۱	۲	۳	۱	۲	۳	۱	۲	۳
دوره تناوب	۰/۷۸	۰/۲۷	۰/۱۵	۰/۸۹	۰/۲۸	۰/۱۵	۰/۶۶	۰/۲۱	۰/۱۲

جدول ۳: شاخصهای عملکرد لرزه‌ای ساختمان جداسازی شده مرجع.

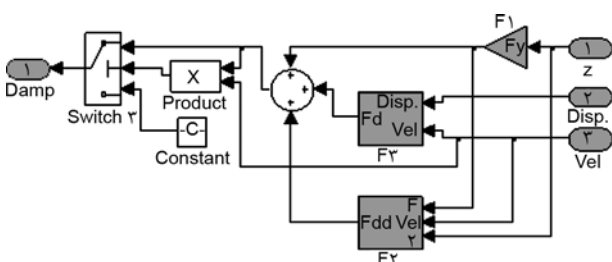
نسبت حداکثر شتاب مطلق طبقه ساختمان کنترل شده به مقدار مربوط در وضعیت بدون کنترل	$j_2(q) = \frac{\max_{t,f} \ a_f(t,q)\ }{\max_{t,f} \ \bar{a}_f(t,q)\ }$	نسبت حداکثر برش پایه ساختمان کنترل شده به مقدار مربوط در وضعیت بدون کنترل	$j_1(q) = \frac{\max_{t,f} \ V_f(t,q)\ }{\max_{t,f} \ \bar{V}_f(t,q)\ }$
نسبت حداکثر مجموع نیروی کنترل به حداکثر برش پایه	$j_3(q) = \frac{\max_{t,f} \ \sum_k F_k(t,q)\ }{\max_{t,f} \ V_f(t,q)\ }$	نسبت حداکثر برش ساختمان کنترل شده به مقدار مربوط در وضعیت بدون کنترل	$j_4(q) = \frac{\max_{t,f} \ V_f(t,q)\ }{\max_{t,f} \ \bar{V}_f(t,q)\ }$
RMS تغییرمکان پایه ساختمان کنترل شده به مقدار مربوط در وضعیت بدون کنترل	$j_5(q) = \frac{\max_{t,i} \ \sigma_d(t,q)\ }{\max_{t,i} \ \bar{\sigma}_d(t,q)\ }$	نسبت حداکثر تغییرمکان پایه در ساختمان کنترل شده به مقدار مربوط در وضعیت بدون کنترل	$j_7(q) = \frac{\max_{t,i} \ d_i(t,q)\ }{\max_{t,i} \ \bar{d}_i(t,q)\ }$
RMS شتاب مطلق طبقه ساختمان کنترل شده به مقدار مربوط در وضعیت بدون کنترل	$j_8(q) = \frac{\max_{t,f} \ \sigma_a(t,q)\ }{\max_{t,f} \ \bar{\sigma}_a(t,q)\ }$	نسبت حداکثر تغییرمکان نسبی طبقه در ساختمان کنترل شده به مقدار مربوط در وضعیت بدون کنترل	$j_6(q) = \frac{\max_{t,f} \ d_f(t,q)\ }{\max_{t,f} \ \bar{d}_f(t,q)\ }$
نسبت انرژی جذب شده توسط میراگرها به انرژی ورودی به سامانه		$j_9(q) = \frac{\sum_k \int_{t_0}^{t_f} F_k(t,q) v_k(t,q) dt}{\int_{t_0}^{t_f} (V_f(t,q) \dot{U}_g(t,q)) dt}$	

۳-۲- نسل دوم ساختمان جداسازی شده مرجع - بلوک شبیه‌سازی

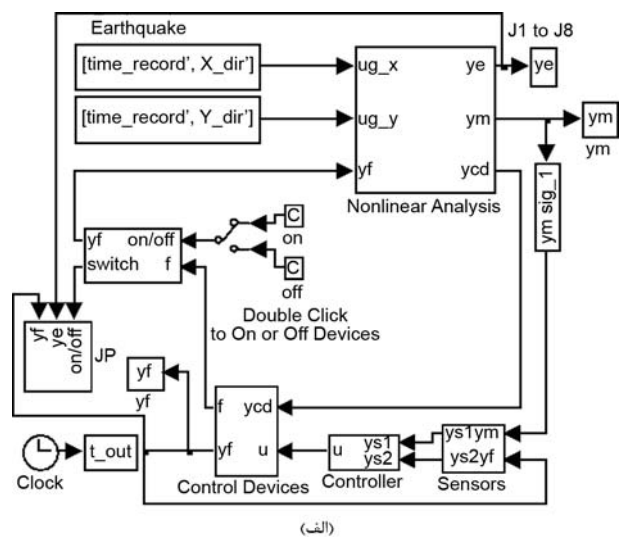
در نسل دوم این مسأله، موضوع برای ساختمانی کاملاً مشابه اما این بار با سامانه جداسازی با رفتار غیرخطی طرح گردیده است. امکان استفاده از مدل‌های عددی جداسازهای لاستیکی با هسته سربی (*LRB*) یا جداسازهای اصطکاکی پاندول وارونه (*FPS*) در مدل وجود دارد.

بلوکهای ایجاد شده توسط طراحان نسل دوم مسأله ساختمان مرجع در محیط نرم‌افزاری در شکل (۶-الف) نمایش داده شده‌اند [۱۴]. بلوک *Nonlinear Analysis* در این شکل، عملیات تحلیل غیرخطی ساختمان مورد نظر را به همراه سامانه کنترل به عهده دارد. مطابق شکل (۶-ب) بلوکهای کنترل *FNS*، اسکای-هوک و میراگر روغنی غیرفعال نیز در بلوک *Subsystem*، شکل (۶-ب)، طراحی و با بلوک کنترل اولیه در مسأله جایگزین شدند.

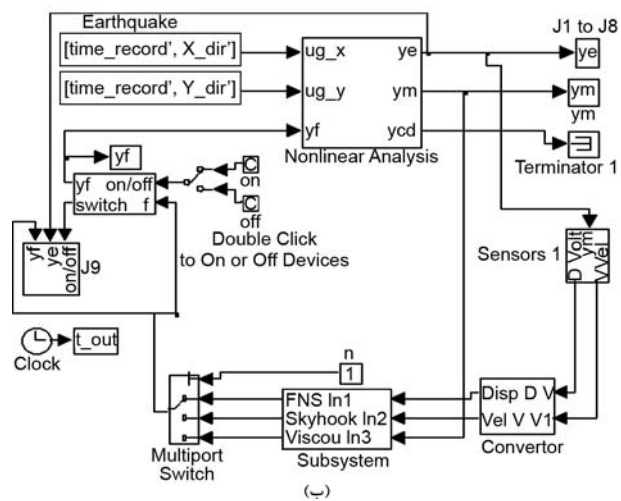
بلوک طراحی شده برای الگوریتم *FNS* نیز در شکل (۷) ارائه شده است.



شکل ۷. بلوک سیمولینک طراحی شده برای الگوریتم *FNS*.

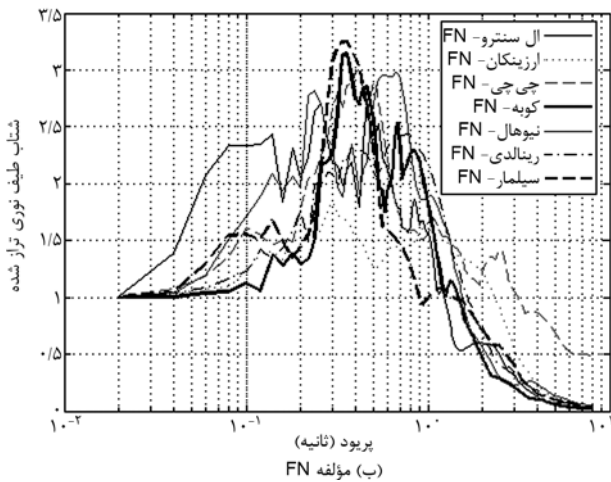
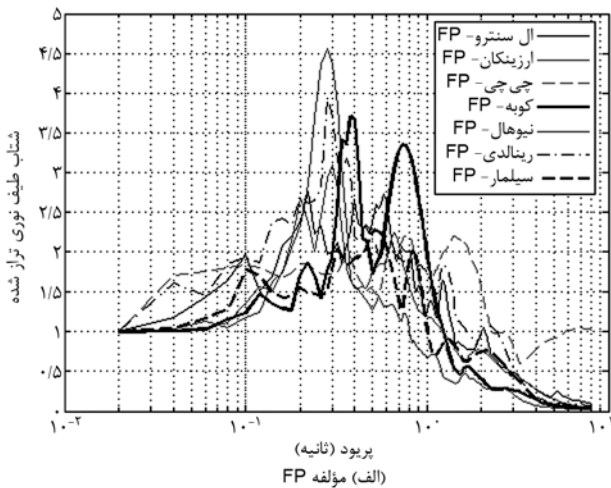


(الف)



(ب)

شکل ۶. الف) بلوک اولیه برای تحلیل سازه کنترل شده. ب) بلوک تغییر یافته برای تعبیه سامانه‌های کنترل.



شکل ۸. طیف پاسخ شتاب مؤلفه‌های زلزله مورد استفاده در این مطالعه.

حداکثر نیرو و سطح زیر منحنی از شکل (۹-الف) تا (۹-ج) افزایش یافته تا در شکل (۹-د) که به دلیل اعمال محدودیت در ظرفیت ولتاژ و بار ایجاد شده توسط میراگر به حد معینی محدود گردیده است. همچنین بر خلاف منحنی‌های نیرو- تغییر مکان معمول، در این منحنی‌ها جهت سختی منفی بوده و در نمودارها مشاهده می‌گردد.

مقادیر شاخص‌های عملکرد در شکل‌های (۱۰) و (۱۱) با هم مقایسه شده‌اند. شاخص‌های عملکرد در سامانه کنترل شده توسط الگوریتم پیشنهادی در اغلب موارد کمتر از دو شاخص دیگر است. این نتیجه مؤید عملکرد مناسب الگوریتم مورد نظر در مقایسه با سایر سامانه‌ها در کاهش پاسخ لرزه‌ای ساختمان است. تنها در مورد شاخص مربوط به شتاب طبقات میزان این شاخص در سامانه کنترل شده توسط روش پیشنهادی نتایج بزرگتری را ارائه نموده است. علت این امر را می‌توان در تغییرات ناگهانی در نیروی ایجاد شده در میراگرها دانست که موجب ایجاد ارتعاشات با فرکانس بالا و انتقال شتابهای قابل توجه به طبقات در برخی زلزله‌ها می‌گردد.

مشابه مرجع [۱۵] هشت میراگر متغیر در هر جهت و در موقعیتهای مشابه در نظر گرفته شده‌اند. مدل عددی میراگر متغیر مشابه مدل تشریح شده در مرجع [۴] در مسیر تحلیل سازه قرار گرفته و اثر نوفه در سیگنالهای دریافتی از حسگر و ارسالی به میراگر توسط بلوک "Uniform Random Number" در مدل دیده شده تا نتایج در حد امکان به حالت واقعی نزدیک شود.

۳-۳-۳- تعریک ورودی

در تحلیلها از هفت جفت شتابنگاشت که توسط تدوین کنندگان مسأله معرفی شده استفاده شده است. هر جفت شتابنگاشت به صورت دو مؤلفه عمود بر هم: "عمود بر گسل (FN)" و "موازی با گسل (FP)" به طور همزمان به سازه اعمال می‌شوند. حداکثر شتاب این شتابنگاشتها در جدول (۴) ارائه شده‌اند. همچنین مشخصات دینامیکی زلزله‌های مورد استفاده در مطالعه در قالب طیف پاسخ شتاب برای نسبت میرایی ۵ درصد در حالی که به حداکثر شتاب خود مقیاس شده‌اند در شکل‌های (۸-الف) و (۸-ب) ارائه شده است.

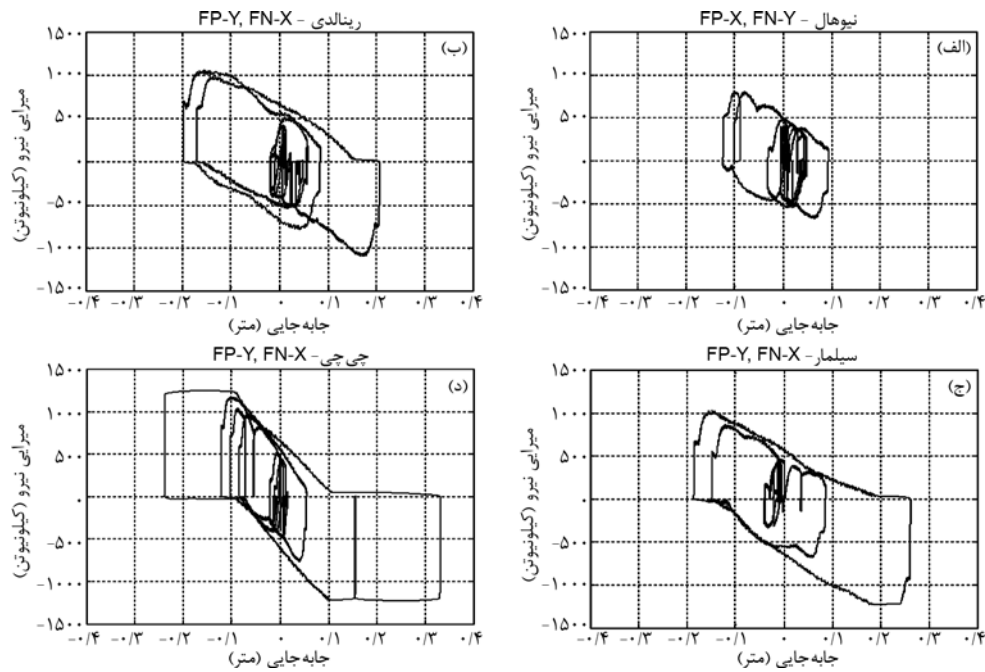
جدول ۴: مشخصات زلزله‌های بکار رفته در مطالعه.

PGA (gal)		زلزله
مؤلفه FN	مؤلفه FP	
۷۲۲	۶۴۳	زلزله سال ۱۹۹۴ نورتریج، نیوهال مؤلفه
۸۵۸	۵۹۳	زلزله سال ۱۹۹۴ نورتریج، سیلمار
۳۰۷	۲۱۱	زلزله سال ۱۹۷۹ امپریال ولی، ال سنترو
۸۲۴	۴۶۷	زلزله سال ۱۹۹۴ نورتریج رینالدی
۸۲۵	۶۱۹	زلزله سال ۱۹۹۵ کوبه، JMA
۵۰۱/۹	۳۶۲/۲	زلزله سال ۱۹۹۹ چی چی، TCU 068
۵۰۵/۵	۴۸۶	زلزله سال ۱۹۹۲ ارزینکان، ۱۷۱۹

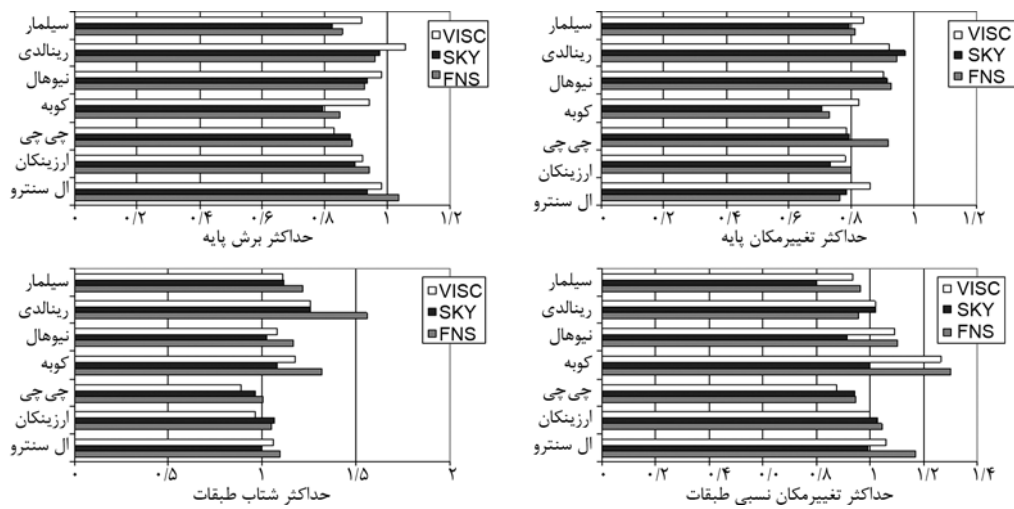
۴- نتایج

سه مدل مورد مطالعه یک بار در حالت بارگذاری مؤلفه FP موازی محور X و مؤلفه FN موازی محور Y و یک بار با شرایط مؤلفه FP موازی محور Y و مؤلفه FN موازی محور X تحلیل شده‌اند. منحنی هیستریزیس پاسخ یک میراگر، مقادیر معیارهای عملکردی برای سه روش کنترل و نتایج معیارهای عملکردی برای حالت کنترل شده با الگوریتم پیشنهادی در شکل‌های (۹) تا (۱۱) و جداول (۵) و (۶) ارائه شده‌اند.

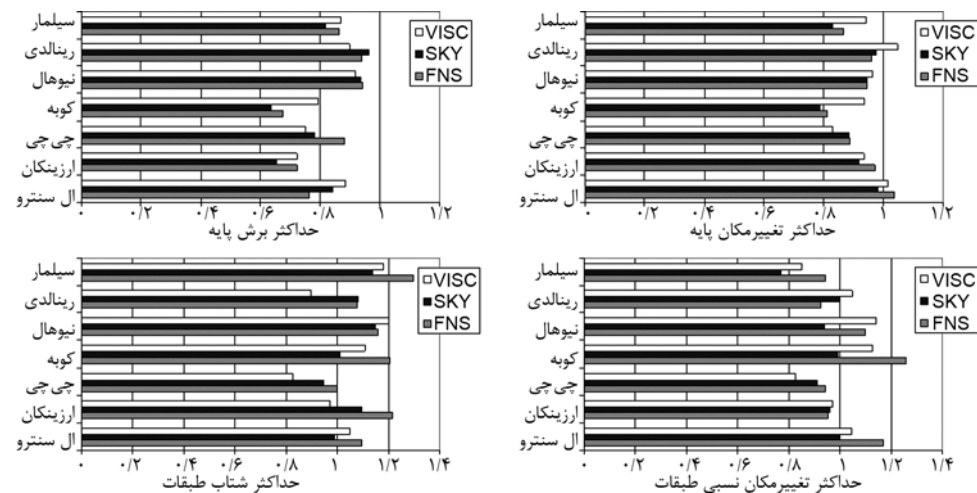
شکل (۹) نمودار هیستریزیس نیروی میرایی متغیر در میراگر شماره ۲ در جهت X را در زمان کنترل تحت الگوریتم (FNS) و در طول زلزله نورتریج در ایستگاههای نیوهال، رینالدی، سیلمار و زلزله چی چی تایوان نشان می‌دهند.



شکل ۹. نیروی ایجاد شده توسط میراگر متغیر شماره ۲ در جهت X توسط الگوریتم FNS به ترتیب در زلزله‌های الف (نیوهال، ب) رینالدی، ج) سیلمار و د) چی چی.



شکل ۱۰. شاخص‌های عملکرد، میرایی ویسکوز، الگوریتم اسکای- هوک و الگوریتم پیشنهادی $FN-X$, $FN-Y$.



شکل ۱۱. شاخص‌های عملکرد، میرایی ویسکوز، الگوریتم اسکای- هوک و الگوریتم پیشنهادی $FN-X$, $FN-Y$.

جدول ۵: شاخص‌های عملکرد محاسبه شده برای سه سامانه تحت مطالعه، حالت بارگذاری $FN-X$, $FP-Y$

شاخص	ال سنتر	ارزینکان	چی چی	کوبه	نیوهال	رینالدی	سیلمار
حداکثر برش پایه j_1	۱/۰۳۷	۰/۹۴۴	۰/۸۸۸	۰/۸۴۸	۰/۹۲۸	۰/۹۶۱	۰/۸۵۶
حداکثر برش ساختمان کنترل شده j_2	۱/۰۹۸	۰/۹۷۶	۰/۸۷۳	۱/۰۷۳	۰/۹۲۷	۰/۹۵۰	۰/۹۰۲
حداکثر تغییرمکان پایه j_3	۰/۷۶۲	۰/۷۹۹	۰/۹۱۸	۰/۷۲۹	۰/۹۲۹	۰/۹۴۷	۰/۸۱۴
حداکثر تغییرمکان نسبی طبقه j_4	۱/۱۷۰	۱/۰۴۷	۰/۹۴۹	۱/۳۰۱	۱/۱۰۳	۰/۹۵۷	۰/۹۶۵
حداکثر شتاب طبقه j_5	۱/۰۹۴	۱/۰۴۶	۱/۰۰۸	۱/۳۱۷	۱/۱۶۶	۱/۵۵۹	۱/۲۱۶
حداکثر مجموع نیروی کنترل j_6	۰/۲۷۱	۰/۲۳۹	۰/۱۳۵	۰/۳۷۵	۰/۲۹۹	۰/۲۳۲	۰/۲۴۰
RMS تغییرمکان پایه j_7	۱/۲۳۰	۰/۷۵۳	۰/۸۱۷	۰/۷۶۳	۰/۹۱۳	۰/۸۶۶	۰/۶۸۸
RMS شتاب مطلق طبقه j_8	۱/۰۹۹	۱/۰۱۷۳	۰/۹۳۶	۱/۱۸۷	۱/۱۹۰	۱/۲۶۴	۱/۰۵۴
انرژی جذب شده توسط میراگرها j_9	۰/۱۸۵	۰/۲۹۹	۰/۲۵۴	۰/۲۶۰	۰/۲۶۲	۰/۲۸۸	۰/۲۹۵

جدول ۶: شاخص‌های عملکرد محاسبه شده برای سه سامانه تحت مطالعه، حالت بارگذاری $FN-Y$, $FP-X$

شاخص	ال سنتر	ارزینکان	چی چی	کوبه	نیوهال	رینالدی	سیلمار
حداکثر برش پایه j_1	۱/۰۳۷	۰/۹۷۱	۰/۸۸۹	۰/۸۱۲	۰/۹۴۸	۰/۹۶۳	۰/۸۶۶
حداکثر برش ساختمان کنترل شده j_2	۱/۰۹۸	۰/۹۴۷	۰/۸۹۸	۰/۹۲۷	۰/۹۴۵	۰/۹۴۸	۰/۸۷۶
حداکثر تغییرمکان پایه j_3	۰/۷۶۲	۰/۷۲۳	۰/۸۸۱	۰/۶۷۶	۰/۹۴۳	۰/۹۳۸	۰/۸۶۵
حداکثر تغییرمکان نسبی طبقه j_4	۱/۱۷۰	۰/۹۵۴	۰/۹۴۶	۱/۲۶۲	۱/۱۰۰	۰/۹۲۸	۰/۹۴۴
حداکثر شتاب طبقه j_5	۱/۰۹۴	۱/۲۲۰	۰/۹۹۹	۱/۲۰۸	۱/۱۵۹	۱/۰۸۰	۱/۲۹۸
حداکثر مجموع نیروی کنترل j_6	۰/۲۷۱	۰/۲۲۸	۰/۱۳۴	۰/۳۷۵	۰/۲۸۷	۰/۲۲۷	۰/۲۳۲
RMS تغییرمکان پایه j_7	۱/۲۳۰	۰/۶۶۹	۰/۷۷۷	۰/۸۲۳	۰/۹۸۲	۰/۸۹۳	۰/۷۱۰
RMS شتاب مطلق طبقه j_8	۱/۰۹۹	۰/۹۷۲	۰/۸۶۷	۱/۱۷۹	۱/۱۵۳	۱/۱۹۵	۱/۰۰۴
انرژی جذب شده توسط میراگرها j_9	۰/۱۸۵	۰/۳۰۷	۰/۲۵۷	۰/۲۵۸	۰/۲۶۰	۰/۲۸۹	۰/۲۹۶

روش در اغلب موارد قادر به کنترل بهتر پاسخ لرزه‌ای سازه بوده و معیارهای عملکردی مورد بررسی تحت این روش کاهش نسبی داشته‌اند. الگوریتم مورد نظر روابط نسبتاً ساده‌ای دارد. تنها به پارامتر تغییرمکان در هر لحظه مورد نیاز است. از این رو، نیاز به نصب حسگرهای متعدد برای به دست آوردن اطلاعات کافی در پردازش و استخراج سیگنال خروجی برای میراگرها وجود ندارد. این امر موجب کاهش هزینه‌ها سادگی اجرای سامانه کنترل در سازه خواهد شد. این موارد برای مقبولیت بیشتر این روش از نظر اجرایی، کارایی و هم از بعد هزینه نکاتی مثبت هستند.

از سوی دیگر تغییرات ناگهانی در نیروی میراگرها به واسطه عمل الگوریتم موجب انتقال شتابهای بزرگتر به طبقات سازه بالا دست می‌شود.

مراجع

1. Skinner, R.I., Robinson, W.H., and McVerry, G.H. (1993). "An Introduction to Seismic Isolation", Wiley: Chichester, UK.

نتایج شاخص‌های عملکرد محاسبه شده برای روش پیشنهادی کنترلی در جداول (۵) و (۶) نیز ارائه شده است. جدول (۵) این شاخص‌ها را برای حالت بارگذاری $FN-X$, $FP-Y$ و جدول (۶) این نتایج را برای حالت بارگذاری $FN-Y$, $FP-X$ ارائه نموده است.

۵- جمع بندی

در این مطالعه عملکرد یک الگوریتم ساده پیشنهادی در کاهش پاسخ لرزه‌ای یک ساختمان جداسازی شده مرجع مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج عملکرد سه روش کنترل در طی این مطالعه توسط شاخص‌های عملکردی تعریف شده در برنامه تحلیل ساختمان مرجع مورد ارزیابی قرار گرفت. شاخص‌های محاسبه شده نشان می‌دهند الگوریتم تحت بررسی در طی تحلیل برای زلزله‌های مورد نظر در کاهش پاسخ دینامیکی سازه نسبتاً موفق بوده است. تغییرمکان و برش پایه محاسبه شده برای سازه که از معیارهای مهم در طراحی سازه هستند توسط روش کنترل پیشنهادی نتایج رضایت‌بخشی را نشان می‌دهند. با این وجود، روش اسکای- هوک در مقایسه با این

- (2008). "Probabilistically Robust Nonlinear Design of Control Systems for Base-Isolated Structures", *J. of Structural Control and Health Monitoring*, **15**(5).
11. Xu, Zh. and Agrawal, A.K. (2008). "Semi-Active Control of Seismically Excited Base-Isolated Building Model with Friction Pendulum Systems", *J. of Structural Control and Health Monitoring*, **15**(5).
 12. Ali, Sk.F. and Ramaswamy, A. (2008). "GA-Optimized FLC-Driven Semi-Active Control for Phase-II Smart Nonlinear Base-Isolated Benchmark Building", *J. of Structural Control and Health Monitoring*, **15**(5).
 13. Iemura, H., Igarashi, A., Pradono, M.H., and Kalantari, A. (2006). "Negative Stiffness Friction Damping for Seismically Isolated Structures", *J. of Structural Control and Health Monitoring*, **13**(2-3). Special Issue: Structural Control Benchmark Problem: Phase I-Linear Smart Base Isolated Building Subjected to Near-Fault Earthquakes, Issue Edited by Satish Nagarajaiah, 775-791.
 14. Iemura, H., Igarashi, A., Pradono, M.H., and Kalantari, A. (2005). "Experimental Verification and Numerical Studies of an Autonomous Semi-Active Seismic Control Strategy", *J. of Structural Control and Health Monitoring*, **13**(1), 303-323.
 15. Nagarajaiah, S., Narasimhan, S., and Johnson, E. (2006). "Phase II Smart Base Isolated Benchmark Building With Nonlinear Isolation Systems", *4th World Conf. on Structural Control and Monitoring*.
 16. Park, Y.J., Wen, Y.K., and Ang, A.H.S. (1986). "Random Vibration of Hysteretic Systems Under Bi-Directional Ground Motions", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **14**(4), 543-557.
 17. Karnopp, D., Crosby, M.J., and Harwood, R.A. (1974). "Vibration Control Using Semi-Active Force Generators", *J. of Engineering for Industry*, **96**(2), 619-626.
 2. Clark P.W., Aiken I.D., Nakashima, M., Miyazaki, M., and Midorikawa, M. (1999). "New Design Technologies", Lessons learned Over Time, Learning From Earthquakes, **3**, EERI.
 3. Housner, G.W., Bergman, L.A., Caughey, T.K., Chassiakos, A.G., Claus, R.O., Masri, S.F., Skelton, R.E., Soong, T.T., Spencer, B.F., and Yao, J.T.P. (1997). "Structural Control: Past, Present, and Future", *J. of Engineering Mechanics*, **123**(9).
 4. Narasimhan, S., Nagarajaiah, S., Johnson, E.A., and Gavin, H.P. (2006). "Smart Base-Isolated Benchmark Building. Part I: Problem Definition", *J. of Structural Control and Health Monitoring*, **13**(2-3).
 5. Erkus, B. and Johnson, E.A. (2006). "Smart Base-Isolated Benchmark Building Part III: A Sample Controller for Bilinear Isolation", *J. of Structural Control and Health Monitoring*, **13**(2-3).
 6. Xu, Zh., Agrawal, A.K., and Yang, J.N. (2006). "Semi-Active and Passive Control of the Phase I Linear Base-Isolated Benchmark Building Model", *J. of Structural Control and Health Monitoring*, **13**(2-3).
 7. Nitta, Y., Nishitani, A., and Spencer Jr, B.F. (2006). "Semiactive Control Strategy for Smart Base Isolation Utilizing Absolute Acceleration Information", *J. of Structural Control and Health Monitoring*, **13**(2-3).
 8. Jung, H.-J., Choi, K.-M., Spencer Jr., B.F., and Lee, I.-W. (2006). "Application of Some Semi-Active Control Algorithms to a Smart Base-Isolated Building Employing MR Dampers", *J. of Structural Control and Health Monitoring*, **13**(2-3).
 9. Nagarajaiah, S. and Narasimhan, S. (2005). "Phase I Smart Base Isolated Benchmark Building-Sample Controllers for Linear Isolation System: Part II", *J. of Structural Control and Health Monitoring*, Special Issue on Smart Base Isolated Benchmark Building.
 10. Taflanidis, A.A., Scruggs, J.T., and Beck, J.L.