

کنترل سازه‌ها با استفاده از سیستم جداگر لرزه‌ای غیرخطی هوشمند

حسین غفارزاده*^۱ و امیرحسین غفاری^۲

^۱ دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

^۲ دانشجوی کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

(دریافت: ۹۵/۷/۲۷، پذیرش: ۹۶/۲/۳۰، نشر آنلاین: ۹۶/۲/۳۰)

چکیده

در این مقاله با مدل‌سازی سازه سه‌بعدی یک ساختمان معیار به بررسی کنترل پاسخ سازه مجهز به سیستم جداگر و میراگر غیرخطی به صورت هوشمند با به کارگیری الگوریتم روش مود لغزشی پرداخته شده است. به منظور استفاده از قابلیت جداگرهای غیرخطی مورد استفاده در این سازه در کاهش پاسخ و مقابله با اثرات زمین لرزه‌های مختلف، سازه مورد نظر تحت اثر هفت نوع زلزله مختلف تحت تحلیل دینامیکی غیرخطی قرار گرفته است. با توجه به بهره‌گیری از سیستم جداگرهای غیرخطی، از روش مدل‌سازی باک و ون جهت مدل‌سازی غیرخطی رفتار این سیستم استفاده شده است. معادلات حرکت سیستم برای روسازه و زیرسازه ساختمان با در نظر گرفتن سه درجه آزادی به صورت دو درجه آزادی انتقالی و یک درجه آزادی دورانی در هر طبقه، نوشته شدند. نتایج تحلیل‌های متعدد انجام شده بر روی سازه معیار و کنترل فعال آن نشان داد، که با توجه به استفاده از جداگرهای لرزه‌ای غیرفعال، تحت زلزله‌های نزدیک گسل، سیستم کنترلی غیرفعال به تنهایی مناسب نبوده و بهره‌گیری از سیستم کنترلی ترکیبی یا جداگرهای لرزه‌ای هوشمند در این مناطق یک ضرورت محسوب می‌گردد.

کلیدواژه‌ها: سازه سه‌بعدی، الگوریتم کنترل مود لغزشی، جداگر لرزه‌ای هوشمند، جداگر لرزه‌ای هسته سربی.

۱- مقدمه

زلزله یکی از پدیده‌های طبیعی است، که هر از چند گاهی موجب آسیب‌های اقتصادی و ایجاد تلفات انسانی می‌شود، پیامدهای ناگوار اقتصادی و اجتماعی ناشی از رویداد زمین‌لرزه‌ها که بیشتر به سبب عدم برآورد مناسب لرزه‌ای سازه‌ها پدید می‌آیند، اهمیت طراحی‌های مناسب و توان‌بخشی سازه‌ها در برابر زمین‌لرزه را مشخص می‌سازند. در سال‌های اخیر تحقیقات زیادی در مورد استفاده از مبحث کنترل سازه‌ها به منظور کاهش اثرات زلزله در سازه‌ها صورت گرفته است. روش‌ها و سیستم‌های گوناگونی برای کنترل سازه وجود دارد. یکی از سیستم‌هایی که به بهبود کارایی سازه منجر می‌شود و مورد استفاده مهندسان برای مقابله با حرکات قوی زمین قرار می‌باشد، سیستم‌های جداگر لرزه-ای است. کارکرد این کنترلرها که عموماً از سه نوع اصطکاکی، لاستیکی و یا الاستومری هستند، حفظ انسجام و سختی سازه در شرایطی است که انعطاف افقی زیادی فراهم شده باشد. این فرآیند باعث بالا رفتن دوره تناوب مؤثر سازه و در نهایت، کاهش نیروی زلزله و ثقلی خواهد شد. کارهای متعددی در زمینه کاربرد سیستم جداگر و کنترل آن انجام یافته است (Mohebbi و همکاران،

۲۰۱۵، Kelly و Farzad؛ ۱۹۹۹ Kelly و Wang و Dyke

۲۰۰۸؛ Chnag و همکاران ۲۰۱۴؛ Ribakov ۲۰۱۱).

Nagarajaiah و همکاران (۲۰۰۶)، به منظور بررسی و تحلیل انواع جداگرهای لرزه‌ای هوشمند و مقایسه آن‌ها برای دست‌یابی به پاسخ‌های کم‌تر از یک مدل سازه معیار که مشابه ساختمان‌های ساخته شده در آمریکا بود، استفاده کردند. سازه مورد نظر یک ساختمان ۸ طبقه است که به صورت سه‌بعدی مدل‌سازی شده است. رو سازه به صورت خطی و سیستم جداگرهای لرزه‌ای به صورت غیرخطی در نظر گرفته شد.

در پژوهشی دیگر، Nagarajaiah و همکاران (۲۰۰۸) به بررسی سازه معیار هشت طبقه‌ای در لس‌آنجلس آمریکا پرداختند، که دارای جداگرهای لرزه‌ای هوشمند بود، جداگرهای لرزه‌ای هوشمند مورد استفاده در کار آن‌ها از دو نوع اصطکاکی و هسته سربی بود. همچنین به طور خاص از جداگرهای لرزه‌ای اصطکاکی و محرک MR بهره گرفته شده است.

در پژوهش Kim و Roschke (۲۰۰۸)، پاندول اصطکاکی و میراگر MR به عنوان جداگر و کنترل نیمه‌فعال استفاده کرده‌اند و با بهره‌گیری از منطق فازی و الگوریتم ژنتیک به دنبال کاهش پاسخ سازه (از جمله تغییر مکان پایه) بودند. علت استفاده از منطق

* نویسنده مسئول؛ شماره تماس: ۰۴۱-۳۳۳۹۲۵۱۵

۲- معرفی سازه معیار

ساختمان انتخاب شده (Narasimhan و همکاران ۲۰۰۶)، یک ساختمان هشت طبقه فولادی است، که مشابه با ساختمان بیمارستانی در شهر لس آنجلس آمریکا می باشد. این سازه دارای پلان نامنظم در پلان و مهاربندهایی در محیط سازه است. وضعیت این ساختمان در پلان و ارتفاع در شکل (۱) نشان داده شده است. در این سازه، میرایی رو سازه ۵٪ فرض گردیده است. رو سازه این ساختمان با فرض خطی باقی ماندن مدل سازی شده است. این فرض با توجه به تحقیقات پیش از این به اثبات رسیده و به دلیل کاهش پیچیدگی های موجود صورت می گیرد. البته در بعضی از پژوهش ها با توجه به شرایط اتخاذ شده، روسازه غیرخطی در نظر گرفته شده است (Narasimhan و همکاران ۲۰۰۸؛ Narasimhan و همکاران ۲۰۰۶؛ Erkus و Johnson ۲۰۰۶).

همچنین با توجه به سازه هشت طبقه غیرمنظم در نظر گرفته، در محاسبات و مدل سازی برای هر طبقه علاوه بر درجات آزادی مرتبط با تغییر مکان، از درجه آزادی پیچشی نیز استفاده شده است. به بیان دیگر در هر طبقه از سازه مورد نظر، ۳ درجه آزادی مدل سازی شده است. به صورتی که با ترکیب سیستم رو سازه (۲۴ درجه آزادی) و سیستم جداگر (۳ درجه آزادی) مجموعاً سیستمی با ۲۷ درجه آزادی در اختیار خواهیم داشت. در این سازه، ۹۲ جداگر (از جمله جداگرهای الاستومتری که تنها از لاستیک تشکیل شده اند، سربی-لاستیکی که شامل لاستیک و هسته سربی می باشند و ترکیب آن ها) استفاده شده است که در شکل (۱) موقعیت آن ها نشان داده شده است. عملکرد جداگرهای هسته سربی به نیروی جانبی آن بستگی دارد. در صورتی که این نیرو کم باشد، حرکت قطعات فولادی به کار برده شده محدود شده و جداگر دارای سختی جانبی زیادی خواهد بود و در صورت اعمال نیروی جانبی زیاد، سختی جانبی ایجاد شده کاهش خواهد یافت.

جدول ۱- مقادیر تناوب اصلی سازه مورد نظر (Narasimhan و همکاران ۲۰۰۶)

مود	جهت شمال- جنوب	جهت شرق-غرب	پیچش
۱	۰/۷۸	۰/۸۹	۰/۶۶
۲	۰/۲۷	۰/۲۸	۰/۲۱
۳	۰/۱۵	۰/۱۵	۰/۱۲
۴	۰/۱۱	۰/۱۱	۰/۰۸
۵	۰/۰۸	۰/۰۸	۰/۰۷
۶	۰/۰۷	۰/۰۷	۰/۰۶
۷	۰/۰۶	۰/۰۶	۰/۰۶
۸	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۵

فازی در کار آن ها قابلیت مدیریت مناسب مسئله غیرخطی و عدم قطعیت ها بود، از الگوریتم ژنتیک نیز به منظور بهینه سازی منطق فازی استفاده گردید.

Narasimhan و همکاران (۲۰۰۶)، جداگرهای هوشمند را به همراه سیستم اصطکاکی تحت تأثیر زلزله های نزدیک گسل قرار دادند، ایده اصلی این الگوریتم بر مبنای الگوریتم H_{∞} و تعیین نیروی کنترل بهینه بود. این سیستم شامل ۴ المان اصطکاکی است، که در آن می توان مقادیر نیروی اصطکاکی را با استفاده از تغییر زاویه بازوها، تغییر داد. یک طرح کنترل تطبیقی مستقیم با استفاده از تابع هسته ای گوسین برای کنترل فعال، به همراه جداگرهای غیرخطی توسط Suresh و همکاران (۲۰۰۸)، غیرخطی در نظر گرفته شد، که در سازه سه بعدی بررسی گردیده است. همچنین، که سازه مورد بررسی به صورت سه بعدی بود. در کار آن ها از روش انطباقی مستقیم بهره گرفته شده است. در این روش برخلاف روش غیرمستقیم توانایی به روزرسانی پارامترهای کنترلر از طریق خروجی های سیستم، بدون تخمین پارامترهای سیستم مهیا شده است.

با استفاده از سیستم جداگر غیرخطی (Narasimhan و همکاران ۲۰۰۸؛ Kim و Roschke ۲۰۰۶؛ Narasimhan و Nagarajaiah ۲۰۰۶؛ Suresh و همکاران ۲۰۰۸؛ Narasimhan و همکاران ۲۰۰۶) و کنترلر گر فعال، سازه معیار مورد بررسی به عنوان مبنای مدل سازی مورد نظر گرفته شد. در این سازه به منظور کاهش پاسخ های لرزه ای از ۹۲ جداگر استفاده می شود که ۳۱ مورد از آن ها از نوع جداگرهای الاستومری و ۶۱ جداگر به صورت غیرخطی هسته سربی در نظر گرفته شد. همچنین پیچش سازه به عنوان یکی از علل آسیب دیدگی سازه ها حین زلزله های بزرگ شناخته می شود. تأثیر پیچش می تواند به وسیله نامنظمی در پلان، مرکز جرم، سختی به وجود می آید. علاوه بر آن درجات آزادی سازه در سه جهت (تغییر مکان های اصلی و درجه آزادی پیچشی) به صورت پیوسته عمل می کنند و با در نظر گرفتن سازه برشی، نمی توان پاسخ های دقیقی از عملکرد سازه به دست آورد. مزیت مدل سازی صورت گرفته استفاده از مدل سه بعدی به منظور درک دقیق رفتار سازه با بهره گیری از سیستم جداگرهای لرزه ای هوشمند است. که با توجه به پیچیدگی های موجود در مورد پیوستگی پاسخ های رو سازه و تراز پایه و همچنین ترکیب سه جهت، به دنبال کاهش پاسخ های سازه خواهیم بود. در این مقاله، الگوریتم مود لغزشی متناسب با سیستم غیرخطی در تراز پایه و سازه سه بعدی بهره گرفته شده، مورد استفاده قرار گرفته است. به صورتی که الگوریتم مود لغزشی مورد استفاده در سه جهت برای سازه سه بعدی توسعه یافته و مورد استفاده قرار گرفته است. همچنین در این مقاله از ۱۶ کنترلرگر در تراز پایه بهره گرفته شده است.

موجود در دستگاه‌ها به مرکز جرم پایه سازه منتقل خواهد شد که به صورت صلب فرض شده است. بایستی توجه کرد که رو سازه و پایه به صورت سه درجه آزاد مدل می‌شوند. همچنین در شکل (۲) درجات آزادی مرتبط به هر طبقه سازه ۸ طبقه و درجات آزادی آن در تراز جداگر نشان داده شده است. براین اساس معادله سه‌بعدی حرکت رو سازه به صورت زیر نوشته می‌شود (Narasimhan و همکاران ۲۰۰۶):

$$M_{n \times n} \ddot{U}_{n \times 1} + C_{n \times n} \dot{U}_{n \times 1} + K_{n \times n} U_{n \times 1} = -M_{n \times n} R_{n \times 3} (\ddot{U}_g + \ddot{U}_b)_{3 \times 1} \quad (1)$$

در این معادله، ماتریس‌های M ، C ، K به ترتیب ماتریس‌های مرتبط با جرم، میرایی و سختی روسازه سازه هستند. همچنین ماتریس $R_{n \times 3}$ ، تأثیر زلزله در درجات آزادی سازه را تعیین می‌کند. لازم به ذکر است، که n درجات آزادی هر طبقه از سازه را نشان می‌دهد. $U_{n \times 1}$ ، $\dot{U}_{n \times 1}$ ، $\ddot{U}_{n \times 1}$ به ترتیب بردارهای جابجایی، سرعت و شتاب هستند. همچنین \ddot{U}_g و \ddot{U}_b بردار شتاب تراز پایه و بردار شتاب زمین می‌باشند. همچنین معادله مرتبط با تراز پایه سازه معیار به صورت زیر خواهد بود:

$$R_{3 \times n}^T M_{n \times n} [\ddot{U}_{n \times 1} + R_{n \times 3} (\ddot{U}_g + \ddot{U}_b)_{3 \times 1}]_{n \times 1} + M_{b_{3 \times 3}} (\ddot{U}_g + \ddot{U}_b)_{3 \times 1} + C_{b_{3 \times 3}} \dot{U}_{b_{3 \times 1}} + K_{b_{3 \times 3}} U_{b_{3 \times 1}} + f_{b_{3 \times 1}} + f_{c_{3 \times 1}} = 0 \quad (2)$$

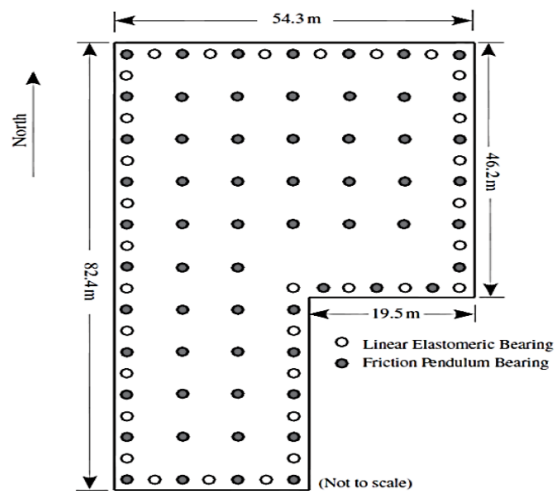
که در آن، f_b نیروی سیستم جداگرها و f_c نیروی حاصل از کنترلرها را نمایش می‌دهند. همچنین C_b ، M_b ، K_b به ترتیب نشانگر ماتریس‌های جرم، میرایی و سختی سیستم جداگر لرزه‌ای خواهند بود.

با در نظر گرفتن بردار حالت X و با بهره‌گیری از مقادیر ماتریس‌های رو سازه و ترکیب آن با معادلات مرتبط با تراز پایه سازه سه‌بعدی، می‌توان معادلات را به فرم فضای حالت ۴ بیان نمود (Narasimhan و Nagarajaiah ۲۰۱۰؛ Narasimhan و همکاران ۲۰۰۶).

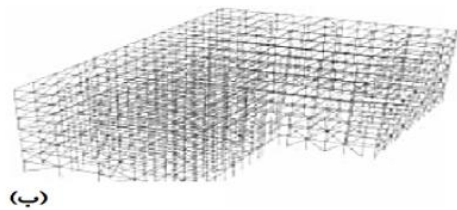
$$X = \{U^T \ U_b^T \ \dot{U}^T \ \dot{U}_b^T\} \quad (3)$$

$$\dot{X}(t) = A_{2n \times n} X(t) + B_{2n \times n} u(t) + B_{2n \times n}^* F_B(t) + E \ddot{U}_g(t) \quad (4)$$

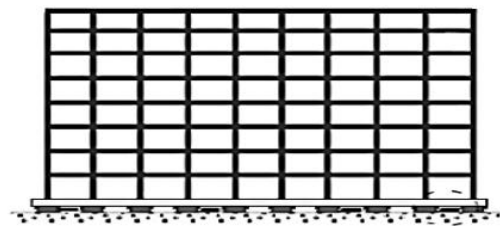
که در این معادله ماتریس‌های فضای حالت A ، B ، B^* ، E به ترتیب دارای ابعاد $(2n \times 1)$ ، $(2n \times n)$ ، $(2n \times 2n)$ ، $(2n \times n)$ خواهد بود، که n تعداد درجات سازه و l مرتبط با رکورد زلزله مورد استفاده، می‌باشد.



(الف)



(ب)



(ب)

شکل ۱- الف) پلان جداگرهای لرزه‌ای، ب) مدل المان محدود سازه معیار (Narasimhan و همکاران ۲۰۰۶)

همچنین جداگرهای الاستومری که از لاستیک تشکیل شده‌اند، با توجه به ویژگی‌های انعطاف‌پذیری لاستیک و تغییر شکل برشی این نوع از جداگر، دارای میرایی بین ۲٪ تا ۳٪ می‌باشند. لازم به ذکر است، مقادیر تناوب طبیعی سازه مرتبط با ۲۴ مود در جدول (۱) آورده شده است (Narasimhan و همکاران ۲۰۰۸؛ Narasimhan و Nagarajaiah ۱۹۹۹).

۳- معادلات حرکت سه‌بعدی

با توجه به سیستم معرفی شده در بخش قبل، معادلات حرکت این سیستم به صورت سه‌بعدی طراحی گردیده است. رو سازه این ساختمان الاستیک فرض گشته شده است و تمام آثار غیرخطی در تراز پایه در نظر گرفته شده است. معادلات حرکت برای این شرایط توسعه یافته است. همچنین هر جداگر غیرخطی با استفاده از مدل دو محوری بوک ون مدل می‌شوند و نیروی

مدل، نیروی غیرخطی و تغییر شکل سیستم توسط یک معادله دیفرانسیل درجه اول غیرخطی که حاوی پارامترهای سه گانه (A, β, γ) است، به یکدیگر مربوط می‌شوند. با انتخاب یک دسته پارامترهای مناسب می‌توان پاسخ مدل را بر رفتار غیرخطی سیستم منطبق ساخت. سپس معادلات دیفرانسیل مرتبط با مدل‌سازی جداگرهای دوبعدی توسط Park و همکاران در سال ۱۹۸۶ و بر مبنای گسترش مدل تک‌بعدی جداگر توسعه یافت. در این پژوهش نیز بر مبنای معادلات ذکر شده در حالت دوبعدی، بهره‌گیری از معادلات مرتبط با جداگرهای هسته سربی در پژوهش Constantinou و همکاران (۱۹۹۰) و با اعمال برخی تغییرات به بررسی و مدل‌سازی جداگرها خواهیم پرداخت. به همین سبب از روابط مرتبط با مدل‌سازی Bouc-Wen بهره گرفته شده است. با توجه به مدل‌سازی سه‌بعدی سازه، روابط مدل‌سازی Bouc-Wen به صورت زیر خواهند بود.

$$U^y \begin{pmatrix} \dot{Z}_x \\ \dot{Z}_y \end{pmatrix} = \alpha \begin{pmatrix} \dot{U}_x \\ \dot{U}_y \end{pmatrix} - Z_w \begin{pmatrix} \dot{U}_x \\ \dot{U}_y \end{pmatrix} \quad (8)$$

در رابطه فوق، U^y تغییر مکان تسلیم جداگرها، Z_x, Z_y پارامترهای بدون بعد هیستریزس است. به منظور به دست آوردن پارامترهای بدون بعد هیستریزس، از معادلات زیر که از گسترش معادلات تک‌بعدی Bouc-Wen به دست آمده‌اند، استفاده می‌شود.

$$Z_w = \begin{bmatrix} Z_x^2 (\gamma \operatorname{sgn}(\dot{U}_x Z_x) + \beta) & Z_x Z_y (\gamma \operatorname{sgn}(\dot{U}_y Z_y) + \beta) \\ Z_x Z_y (\gamma \operatorname{sgn}(\dot{U}_x Z_x) + \beta) & Z_y^2 (\gamma \operatorname{sgn}(\dot{U}_y Z_y) + \beta) \end{bmatrix} \quad (9)$$

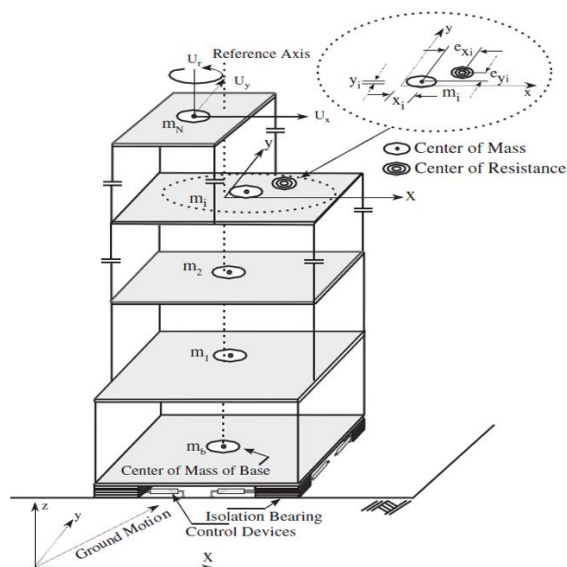
که در آن، پارامترهای A, β, γ به ترتیب ۰.۱، ۰.۹ و ۰.۱ فرض شده است. همچنین نیروی غیرخطی به صورت زیر حاصل خواهد شد:

$$\begin{aligned} f_x &= K_p U_x + c_v \dot{U}_x + (K_e - K_p) U^y Z_x \\ f_y &= K_p U_y + c_v \dot{U}_y + (K_e - K_p) U^y Z_y \end{aligned} \quad (10)$$

در حالی که K_e برابر با سختی پیش از تسلیم، K_p برابر با سختی پس از تسلیم، c_v برابر با ضریب میرایی ویسکوز جداگر لرزه‌ای U^y تغییر مکان تسلیم جداگر می‌باشد. قابل ذکر است، که مقادیر سختی پیش از تسلیم، ضریب میرایی ویسکوز جداگر لرزه‌ای و تغییر مکان تسلیم به ترتیب ۹۱۹KN، ۰/۰۶ و ۰/۰۲ متر در نظر گرفته شده است.

۵- حل معادلات حرکت

به منظور حل معادله سیستم سازه‌ای مورد نظر، که دارای مقادیر غیرخطی است، بایستی از روش‌های عددی بهره گرفته شود. به همین دلیل، در این پژوهش به منظور به دست آوردن نیروی غیرخطی حاصل از سیستم جداگر لرزه‌ای از روش عددی



شکل ۲- مدل سه‌بعدی سازه نامتقارن مجهز به جداگر لرزه‌ای و درجات آزادی آن

شایان ذکر است، که ماتریس‌های $F_B(t), u(t)$ به ترتیب شامل نیروهای حاصل از کنترل گرها و نیروی غیرخطی ناشی از سیستم جداگرهای لرزه‌ای است. که به شرح زیر خواهند بود:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -\bar{M}^{-1} \bar{K} & -\bar{M}^{-1} \bar{C} \end{bmatrix}, B = B^* = \begin{bmatrix} 0 \\ -\bar{M}^{-1} \begin{pmatrix} 0 \\ I \end{pmatrix} \end{bmatrix}, E = \begin{bmatrix} 0 \\ \bar{M}^{-1} \begin{pmatrix} MR \\ R^T MR + M_b \end{pmatrix} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\bar{M} = \begin{bmatrix} M & MR \\ R^T M & R^T MR + M_b \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\bar{C} = \begin{bmatrix} C & 0 \\ 0 & C_b \end{bmatrix}, \bar{K} = \begin{bmatrix} C & 0 \\ 0 & K_b \end{bmatrix}$$

$$U = \begin{bmatrix} 0 \\ f_c \end{bmatrix}, F_B = \begin{bmatrix} 0 \\ f_B \end{bmatrix} \quad (7)$$

۴- مدل‌سازی جداگرها

در این پژوهش از ترکیب جداگرهای هسته سربی و جداگرهای الاستومری بهره گرفته شده است. مدل‌سازی جداگرها بر سه نوع مدل‌سازی الاستیک، مدل‌سازی ویسکوز و مدل‌سازی هیستریزس استوار است. در اینجا جداگرهای سازه به صورت غیرخطی و هیستریزس فرض و مدل‌سازی می‌شوند. که ۳۱ جداگر خطی الاستومتری و ۶۱ جداگر غیرخطی هسته سربی مدل‌سازی شده است.

Wen در سال ۱۹۷۶ یک مدل یکنواخت و قابل انطباق ریاضی برای مدل‌سازی رفتار هیستریزس غیرخطی یک سیستم سازه‌ای یک درجه آزادی تحت ارتعاشات اجباری پیشنهاد نمود. در این

در معادله (۱۱) در صورتی که حرکت سطح لغزش، پایدار باشد، P دارای ابعاد $(r * 2n)$ است. لازم به ذکر است، که به منظور نگه داشتن پاسخها بر روی سطح لغزش، بایستی $\dot{S} = 0$ باشد، می توان با اعمال شرط فوق، اختیار ماتریس تبدیل و بازنویسی معادلات و با بهره گیری از روش LQR ماتریس P را به دست آورد.

۶-۲- طراحی کنترلگر

طراحی کنترلگر به منظور هدایت مسیرهای پاسخ به سوی سطح لغزش $S = 0$ صورت می گیرد. بدین منظور از تابع لیاپانوف به منظور کنترل پایداری سیستم بهره خواهیم گرفت، بنابراین خواهیم داشت:

$$V = 0.5\dot{S}\dot{S} = 0.5\dot{Z}^T P Z \quad (12)$$

شرط کافی برای صفر شدن سطح لغزش، به صورت زیر خواهد بود:

$$\dot{V} = \dot{S}\dot{S} \leq 0 \quad (13)$$

با توجه به $\dot{V} \leq 0$ نیروی کنترلر سیستم گسسته به صورت زیر در خواهد آمد:

$$U_i(t) = G_i - \delta_i \text{sign}(\lambda_i) \quad (14)$$

که پارامترهای فوق به شرح زیر خواهند بود:

$$\lambda = \dot{S}PB, \quad G = -(PB)^{-1}P(AZ - BF + E) \quad (15)$$

بایستی توجه داشت، که δ ماتریسی قطری و دارای ابعاد $(r * r)$ است. در این پژوهش در هشت نقطه در تراز پایه و در دو جهت کنترل گرها مورد استفاده قرار گرفته اند.

۷- رکوردهای انتخابی زلزله

در این پژوهش از هفت زلزله به منظور بررسی عملکرد سازه مجهز به جداگر لرزه ای هوشمند استفاده شده است. این رکوردهای زلزله دارای دو جهت FP (موازی با گسل) و FN (عمود بر گسل) زلزله های Newhall, El Centro, Rinaldi, Kobe, Jiji, Erzinkan Sylmar می باشند (جدول (۲)). همچنین نمودار تاریخچه زمانی شتاب رکوردهای انتخابی نیز در شکل (۳) نمایش داده شده است که به منظور پوشش مناسب انواع زلزله ها انتخاب شده است. همچنین برخی از زمین لرزه ها عمود و موازی بوده و بقیه تصویب سازی شده است. لازم به ذکر است، که سازه معیار مورد استفاده تحت زلزله های فوق الذکر قرار خواهند گرفت. به صورتی که نوبت نخست، مؤلفه FP موازی محور X قرار گرفته و متعاقباً مؤلفه FN در جهت Y سازه قرار خواهد گرفت و به همین صورت جهات به صورت بالعکس نیز بر سازه اعمال خواهند شد.

رانگ- کوتا و به سبب دستیابی به پاسخ های سازه و وجود نیروی غیرخطی در روش حل از روش نیومارک استفاده شده است.

حل معادله فضای حالت سیستم سازه سه بعدی، با بهره گیری از روش شتاب متوسط نیومارک به صورت گام به گام زمانی و فرض پارامترهای های الگوریتم نیومارک به صورت $\beta = 0.25, \gamma = 0.5$ قابل حل خواهد بود. در حل الگوریتم نیومارک به منظور دستیابی پاسخ های سازه سه بعدی، به روزرسانی نیروهای غیرخطی جداگرهای لرزه ای امری ضروری است، که بدین منظور از روش رانگ کوتا بهره گرفته شده است. شایان ذکر است، که با توجه به وجود مقادیر نیروی غیرخطی در معادلات سازه، روش شبه نیرو مورد استفاده قرار گرفته است. این روش که برای آنالیزهای غیرخطی مورد استفاده قرار می گیرد، برخلاف روش های دیگر با ثابت در نظر گرفتن گام زمانی، ماتریس های ضرایب و سختی مؤثر را یک بار محاسبه کرده و برای تمام آنالیز مورد استفاده قرار می دهد، که این موضوع می تواند به ساده سازی مسئله کمک می کند. همچنین این روش، مناسب با میزان غیرخطی موجود در جداگرهای لرزه ای است. به بیان دیگر، با بهره گیری از روش ضمنی، پاسخ های سازه و نیروهای غیرخطی در هر گام زمانی به روز می گردند و متعاقب آن پاسخ های سازه با استفاده از پاسخ های یک گام عقب تر حاصل خواهند شد.

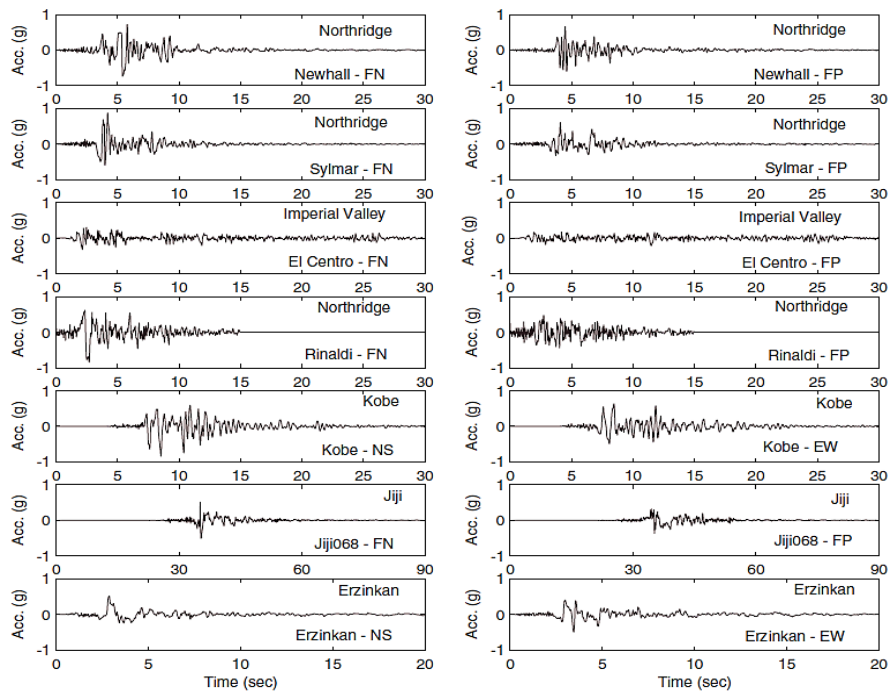
۶- الگوریتم مود لغزشی

هدف از این روش طراحی کنترلر برای هدایت مسیر پاسخ به سطح لغزش و یا سطح سوئیچینگ است. سطح لغزش بایستی به نحوی طراحی گردد، که حرکت در سطح لغزش پایدار باقی بماند. لازم به ذکر است که سطح سوئیچینگ تابعی از متغیرهای حالت است. البته در عمل با توجه به نویزهای موجود در سیستم، مقداری اغتشاش و یا چترینگ در کنار سطح لغزش خواهیم داشت. روند طراحی کنترلر مود لغزشی از دو قسمت، طراحی سطح لغزش و طراحی کنترلر تشکیل می شود.

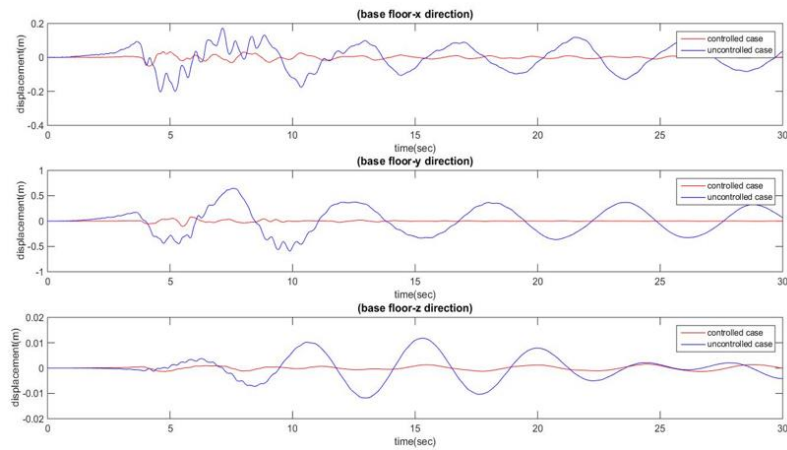
۶-۱- طراحی سطح لغزش

ایده اصلی تئوری سطح لغزش، طراحی کنترلرها برای هدایت مسیر پاسخ به سطح لغزش و نگه داشتن پاسخ بر آن است. قابل ذکر است که در طراحی سطح لغزش از تحریک خارجی صرف نظر می گردد. همچنین برای سادگی، S به صورت زیر در نظر گرفته شده، $S = [S_1 \ S_2 \ S_r] = 0$ که دارای تعداد درایه هایی برابر با تعداد کنترلرها است. پس خواهیم داشت:

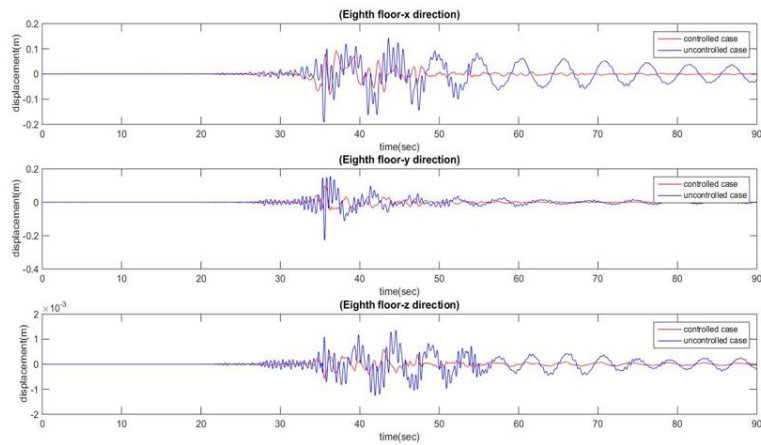
$$S = PZ = 0 \quad (11)$$



شکل ۳- رکوردهای زلزله‌های مورد استفاده



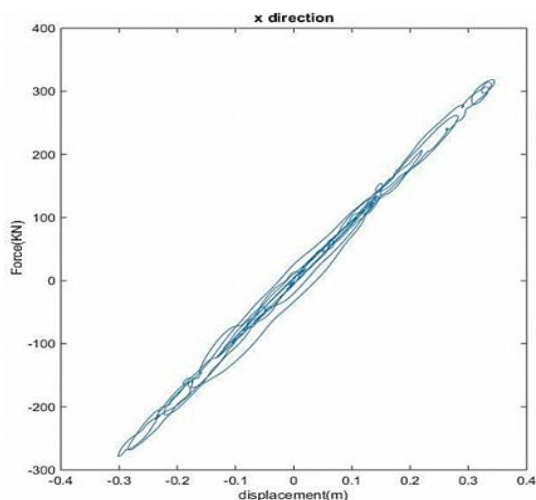
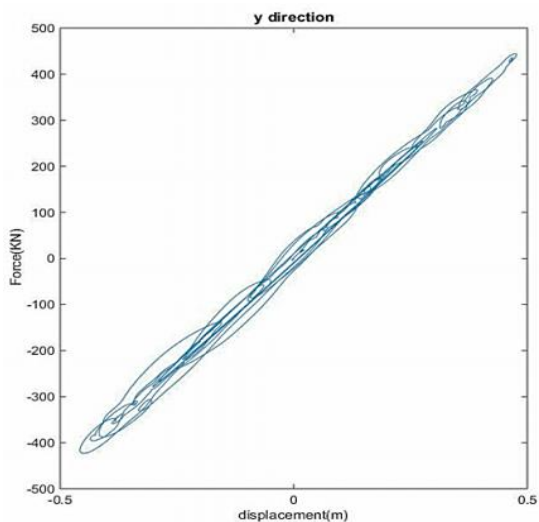
شکل ۴- تغییر مکان تراز پایه سازه تحت زلزله Newhall (FN-X)



شکل ۵- سرعت طبقه هشتم سازه تحت زلزله Jiji (FP-X)

۸- نتایج

نیروی کنترل حاصل از کنترلرهای تعبیه شده در تراز پایه، تحت زمین‌لرزه، Jiji و در جهت (FP-X) در شکل (۶) آورده شده است که در نمودار پدیده چترینگ به وضوح مشخص است. همچنین، نیروی وارده بر این سازه تحت زلزله مورد اشاره، در حدود 10^5 کیلو نیوتن بوده است. با توجه به دو شکل (۵) و (۶) که به عنوان نمونه آورده شده است، می‌توان مشاهده کرد، که پاسخ‌های سازه در درجه آزادی پیچشی نسبت به دیگر درجات اصلی، بسیار کم‌تر است و به همین دلیل از قرارگیری کنترلر در راستای درجه آزادی پیچشی، صرف نظر شده است، البته با توجه به پیوستگی، سه درجه آزادی در نظر گرفته شده، که البته پاسخ‌های سازه در درجه آزادی پیچشی نیز کاهش یافته است. همچنین منحنی هیستریزس سیستم جداگر لرزه‌ای هوشمند تحت زلزله Rinaldi(FP-X) به صورت شکل (۷) خواهد بود. سه شاخص عملکرد برای این سازه معیار تعریف شده است.



شکل ۷- منحنی هیستریزس سیستم جداگر لرزه‌ای هوشمند تحت زلزله Rinaldi (FP-X)

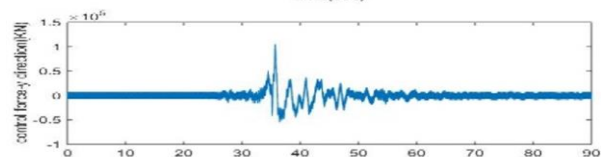
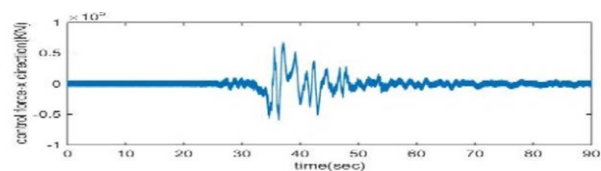
با بهره‌گیری از مدل‌سازی سیستم جداگرهای لرزه‌ای هوشمند در سازه سه‌بعدی، تغییر مکان تراز پایه سازه تحت زمین لرزه Newhall (FN-X) و در دو حالت کنترل شده و کنترل نشده در شکل (۴) آورده شده است. بر طبق این نمودار، تغییر مکان تراز پایه بر طبق فرض درجات آزادی برای هر یک از طبقات برای سه جهت رسم گردیده شده‌اند.

همچنین تحت زلزله Newhall و در جهت (FN-X) تغییر مکان در حالت بدون سیستم کنترلی در جهت γ نسبت به جهت اصلی دیگر (x) مقدار بیشتری را اختیار نموده است. که با توجه به اعمال زمین‌لرزه‌های مختلف مقدار ماکزیمم در دو جهت اصلی تغییر خواهد کرد. همچنین تغییرات زمانی تغییر مکان طبقه هشتم سازه سه‌بعدی معیار، تحت زمین‌لرزه Jiji و در جهت (FP-X) در شکل (۵) نمایش داده شده است.

حداکثر مقدار تغییر مکان تحت این زمین‌لرزه در حالت بدون کنترل تا $0/2$ متر به وقوع پیوسته است. در حالی که، در حالت سیستم کنترل شده نمودار نشانگر کاهش مناسب در تغییر مکان‌های طبقه هشتم است. همچنین می‌توان مشاهده کرد که در مقایسه تغییر مکان تراز پایه و طبقه آخر (هشتم)، سازه بر طبق انتظار ارتعاش کمی در تراز پایه داشته است. با توجه به اعمال γ نوع زلزله و در دو جهت متعامد بر سازه و با در نظر گرفتن تمام پاسخ‌های سازه، می‌توان به این نتیجه رسید، که با اعمال سیستم‌های کنترلی تا 90% کاهش در تغییر مکان و سرعت سازه و تا 70% کاهش در شتاب به وقوع پیوسته است.

جدول ۲- مشخصات زلزله‌های انتخابی

Earthquake	Station	PGA(g)	PGV (cm/s)
	Sylmar	0/88	129
Northridge.USA	Rinaldi	0/84	160
	Newhall	0/74	117
Kobe,Japan	Kjma	0/84	92
Chi-Chi.Taiwan	Jiji	0/51	265
Erzincan.Turkey	Erzincan	0/51	82
Imperial Valley.USA	El Centro	0/31	30



شکل ۶- نیروی کنترل حاصل از Jiji (FP-X)

جدول ۳- شاخص‌های عملکرد

Earthquake	Case	J1	J2	J3
Newhall	FP-X	۰/۱۵	۰/۱۸	۰/۶۳
	FN-X	۰/۰۲	۰/۱۶	۰/۵۲
Sylmar	FP-X	۰/۱۹	۰/۱۸	۰/۶۱
	FN-X	۰/۲۵	۰/۲۳	۰/۶۰
El centro	FP-X	۰/۰۷	۰/۰۷	۰/۴۵
	FN-X	۰/۰۵	۰/۰۶	۰/۳۴
Rinaldi	FP-X	۰/۲۷	۰/۲۹	۱/۰۲
	FN-X	۰/۳۸	۰/۳۴	۰/۹۵
Kobe	FP-X	۰/۳۷	۰/۳۱	۰/۶۱
	FN-X	۰/۳۲	۰/۳۴	۰/۶۵
Jiji	FP-X	۰/۰۴	۰/۰۴	۰/۹۴
	FN-X	۰/۰۵	۰/۰۳	۰/۸۵
Erzinkan	FP-X	۰/۱۲	۰/۱۴	۰/۸۲
	FN-X	۰/۲۲	۰/۲۳	۰/۸۱

۱۰- بحث و نتیجه‌گیری

این پژوهش، به بررسی رفتار سه بعدی سازه‌های مجهز به جداگرهای لرزه‌ای پرداخته است. با توجه به عملکرد پیوسته درجات آزادی سازه و بررسی دقیق رفتار سازه، مدل‌سازی به صورت سه‌بعدی صورت گرفته است. همچنین برای مدل‌سازی رفتار غیرخطی در تراز پایه، از مدل‌سازی باک و ن استفاده شده است. بدین منظور پس از اعمال هفت جفت رکورد زلزله و انجام آنالیز غیرخطی پاسخ سازه کاهش مناسبی در پی داشته است. با بررسی و مقایسه پاسخ‌های مرتبط با درجات آزادی طبقات مختلف سازه، پاسخ مرتبط با درجه آزادی پیش‌پی هر طبقه نسبت به دیگر درجات آزادی اصلی سازه (درجات آزادی مرتبط با تغییر مکان) مقادیر کمتری را نشان می‌دهد. بدین سبب، در تراز پایه، از مدل‌سازی سیستم‌های کنترلی مرتبط با درجه آزادی پیش‌پی صرف نظر شده است. در این پژوهش با بهره‌گیری از سیستم مورد اشاره پاسخ‌های مرتبط با تغییر مکان و سرعت طبقات سازه تا ۹۰٪ کاهش پیدا کرده و شتاب طبقات سازه کاهش ۷۰٪ را در برداشته است. با توجه به نتایج به دست آمده، می‌توان، به این نکته پی برد که بهره‌گیری از سیستم هوشمند جداگرهای لرزه‌ای نسبت به بهره‌گیری از سیستم غیرفعال جداگرهای لرزه‌ای در مناطق نزدیک گسل یک ضرورت محسوب می‌گردد.

۱۱- مراجع

- Chang CM, Spencer BF, Shi P, "Multiaxial active isolation for seismic protection of buildings", Structural Control and Health Monitoring, 2014, 21 (4), 484-502.
- Constantinou M, Mokha A, Reinborn A, "Teflon bearings in base isolation. ii: modeling", Journal of Structural Engineering, 1990, 116 (2), 455-474.
- Erkus B, Johnson EA, "Smart base-isolated benchmark

شاخص‌های عملکرد بر اساس مقادیر حداکثر هستند، که بایستی برای تمام زلزله‌ها انتخابی و در دو جهت متعامد و برای هر دو حالت کنترل شده و کنترل نشده به دست آیند.

- حداکثر تغییر مکان پایه (یا تغییر مکان جداگر) در سازه به حداکثر تغییر مکان متناظر سازه کنترل نشده.

$$J_1(q) = \frac{\max_{t,i} \|d_i(t,q)\|}{\max_{t,i} \|\hat{d}_i(t,q)\|} \quad (16)$$

- حداکثر دریفت در سازه کنترل شده به دریفت متناظر در سازه کنترل نشده

$$J_2(q) = \frac{\max_{t,f} \|d_i(t,q)\|}{\max_{t,f} \|\hat{d}_i(t,q)\|} \quad (17)$$

- حداکثر شتاب طبقات در سازه کنترل شده نسبت به حداکثر شتاب متناظر در سازه کنترل نشده

$$J_3(q) = \frac{\max_{t,f} \|a_f(t,q)\|}{\max_{t,f} \|\hat{a}_f(t,q)\|} \quad (18)$$

در شاخص‌های فوق‌الذکر، i نمایانگر تعداد جداگر $(1, \dots, N_i)$ ، k تعداد کنترلرها $(1, \dots, N_d)$ ، f تعداد طبقات سازه $(1, \dots, N_f)$ ، q تعداد رکوردهای زلزله $(1, \dots, 7)$ ، t زمان رکوردهای زلزله $0 \leq t \leq T_d$ و $\|\cdot\|$ نشان دهنده مقادیر مرتبط با مؤلفه‌های شمال-جنوب و شرق-غرب است.

شاخص‌های معرفی شده مقایسه به کارگیری انواع جداگرهای لرزه‌ای، روش‌های کنترلی، انواع دستگاه‌های کنترلی را فراهم می‌سازند. با توجه به بررسی‌های صورت گرفته در مورد تمام زمین‌لرزه‌های انتخابی و در دو جهت متعامد، می‌توان شاخص‌های معرفی شده که در مورد تغییر مکان تراز پایه سازه، دریفت سازه، شتاب طبقات سازه را به صورت جدول (۳) به دست آورد.

با توجه به جدول (۳)، در شاخص اول و دوم، که به ترتیب مرتبط با تغییر مکان‌های ماکزیمم مقادیر تراز پایه و دریفت طبقات سازه بوده است، کاهش چشم‌گیری مشاهده می‌شود. در حالی که، با توجه مقادیر شتاب طیفی و سرعت طیفی زلزله Rinaldi، مقادیر کنترل شده نسبت به مقادیر متناظر کنترل نشده مرتبط با شاخص حداکثر مقادیر شتاب طبقات کاهش درخوری نداشته است. در بقیه موارد شتاب ورودی به سازه کاهش پیدا کرده‌اند. براین اساس، در اکثر موارد نتایج مناسبی نسبت به حالت کنترل نشده به دست آمده است.

- Wang Y, Dyke S, "Smart system design for a 3D base-isolated benchmark building", *Structural Control and Health Monitoring*, 2008, 15 (7), 939-957.
- Wen YK, "Method for random vibration of hysteretic systems", *Journal of the Engineering Mechanics Division*, 1976, 102 (2), 249-263.
- building Part III: a sample controller for bilinear isolation", *Structural Control and Health Monitoring*, 2006, 13 (2-3), 605-625.
- Naeim F, Kelly JM, "Design of Seismic Isolated Structures: From Theory to Practice", *Earthquake Spectra*, 1999, 1-23.
- Kelly JM, "Earthquake-Resistant Design with Rubber", *Springer*, 1997, 35-59.
- Kim HS, Roschke PN, "Design of fuzzy logic controller for smart base isolation system using genetic algorithm", *Engineering Structures*, 2006, 28 (1), 84-96.
- Mohebbi M, Dadkhah H, Shakeri K, "Optimal hybrid base isolation and mr damper", *International Journal of Optimization in Civil Engineering*, 2015, 5 (4), 493-509.
- Nagarajaiah S, "System identification of base isolated USC hospital building from recorded response", *Proceedings of the International Modal Analysis Conference-IMAC. SEM, Bethel, CT, United States*, 1999.
- Narasimhan S, Nagarajaiah S, Johnson EA, Gavin HP, "Smart base-isolated benchmark building. Part I: problem definition", *Structural Control and Health Monitoring*, 2006, 13 (2-3), 573-588.
- Narasimhan S, Nagarajaiah S, "Key Findings from the Nonlinear Base-isolated Benchmark", *19th Analysis & Computation Specialty Conference*, 2010, 295-304.
- Narasimhan S, Nagarajaiah S, "Smart base isolated buildings with variable friction systems: H_{∞} controller and SAIVF device", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2006, 35 (8), 921-942.
- Narasimhan S, Nagarajaiah S, Johnson EA, "Smart base-isolated benchmark building part IV: Phase II sample controllers for nonlinear isolation systems", *Structural Control and Health Monitoring*, 2008, 15 (5), 657-672.
- Park YJ, Wen YK, Ang A, "Random vibration of hysteretic systems under bi-directional ground motions", *Earthquake engineering & structural dynamics*, 1986, 14 (4), 543-557.
- Ribakov Y, "Base-isolated structures with selective controlled semi-active friction dampers", *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 2011, 20 (7), 421-439.
- Suresh S, Narasimhan S, Sundararajan N, "Adaptive control of nonlinear smart base-isolated buildings using Gaussian kernel functions", *Structural Control and Health Monitoring*, 2008, 15 (4), 585-603.

EXTENDED ABSTRACT

Control of Structures with Nonlinear Smart Base Isolation System

Hossein Ghaffarzadeh *, Amir Hossein Ghaffari

Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, 5166616471, Iran

Received: 18 October 2016; **Accepted:** 20 May 2017

Keywords:

Three dimensional building, Sliding mode control theory, lead-rubber bearing, Smart base isolation.

1. Introduction

The present paper investigates the operation of the sliding mode on three-dimensional benchmark building with smart base isolation to reducing the dynamic responses of seismic excitation. According to the being three-dimensional, interweaving responses of the structure with each other, cohesiveness of behavior of superstructure and base level and computing the nonlinear force of base isolation systems, this building is very complex. Under these circumstances, we used extended sliding mode theory to applying the benchmark building. Also, the actuators are located only at the base level and in the two main directions. The results indicate that the proposed control system improved the building responses.

2. Methodology

2.1. Benchmark Building

In this paper, we utilized eight-storey three-dimensional benchmark building with smart base isolation (Narasimhan et al., 2006). To best perform the numerical analyses, the superstructure remains as a linear elastic system and the smart base isolation system consisting of 92 base isolations that 61 base isolations are lead-rubber base isolations and other base isolations are Elastomeric base isolations (Suresh et al., 2008, Narasimhan et al., 2008). The isolation system is included a combination of elastic elements for Elastomeric Bearings and hysteretic elements for lead-rubber bearings. In this case, the base isolation system is expressed with Bouc-Wen biaxial model. We also had 27 degrees of freedom with the combination of the base and superstructure degrees of freedom (Narasimhan et al., 2006).

2.2. Sliding Mode Theory

In this research, the base isolation system is nonlinear. For this reason, we used the sliding mode control theory. This control method is one of the appropriate control algorithms under those circumstances. Therefore, we extended the sliding mode control theory to adapt with three-dimensional building and nonlinearity at the base level. Also, Lyapunov function utilized for scrutinizing the stability of algorithm and designing the controllers. The control devices for this study are installed at the isolation level and eight locations and each of the locations containing orthogonal pairs of the actuators.

* Corresponding Author

E-mail addresses: ghaffar@tabrizu.ac.ir (Hossein Ghaffarzadeh), a.h.ghaffari93@ms.tabrizu.ac.ir (Amir Hossein Ghaffari).

3. Results and discussion

3.1. Effect of proposed control algorithm

In order to assess the performance of proposed control theory, the seven earthquakes choose with fault-normal (FN) and fault-parallel (FP) components and to investigate of proposed control approach; three performance indices are defined as follows (Suresh et al., 2008):

J1: Maximum base displacement of the actively controlled base-isolated model normalized by the Corresponding quantity in the uncontrolled base-isolated model.

J2: Maximum inter storey drift of the actively controlled base-isolated model normalized by the Corresponding quantity in the uncontrolled base-isolated model.

J3: Maximum floor acceleration of the actively controlled base-isolated model normalized by the Corresponding quantity in the uncontrolled base-isolated model.

Assessment results according to the performance indices are presented in Table 1.

Table 1. Performance indices

Earthquake	Case	J1	J2	J3
Newhall	FP-X	0.15	0.18	0.63
	FN-X	0.2	0.16	0.52
Sylmar	FP-X	0.19	0.18	0.61
	FN-X	0.25	0.23	0.60
El centro	FP-X	0.07	0.07	0.45
	FN-X	0.05	0.06	0.34
Rinaldi	FP-X	0.27	0.29	1.02
	FN-X	0.38	0.34	0.95
Kobe	FP-X	0.27	0.31	0.61
	FN-X	0.32	0.34	0.65
Jiji	FP-X	0.04	0.04	0.94
	FN-X	0.05	0.03	0.85
Erzinkan	FP-X	0.12	0.14	0.82
	FN-X	0.22	0.23	0.81

4. Conclusions

This study presents extended sliding mode control theory for the active control of nonlinear base-isolated benchmark buildings and three-dimensional structure is modeled due to the cohesiveness of degrees of freedom and scrutiny of structural behavior. The performance of the proposed control theory is evaluated with assumed indices. According to these indices, the decreasing of base displacement and inter-storey drift indices are more than the third index. After all, the result of numerical simulations three-dimensional benchmark building and using the proposed control algorithm in comparison with an uncontrolled case demonstrates that isolation system response, as well as superstructure responses, appropriately decreased.

5. References

- Narasimhan S, Nagarajaiah S, Johnson EA, "Smart base-isolated benchmark building part IV: Phase II sample controllers for nonlinear isolation systems", *Structural Control and Health Monitoring*, 2008, 15 (5), 657-672.
- Narasimhan S, Nagarajaiah S, Johnson EA, Gavin HP, "Smart base-isolated benchmark building. Part I: problem definition", *Structural Control and Health Monitoring*, 2006, 13 (2-3), 573-588.
- Suresh S, Narasimhan S, Sundararajan N, "Adaptive control of nonlinear smart base-isolated buildings using Gaussian kernel functions", *Structural Control and Health Monitoring*, 2008, 15 (4), 585-603.