

کنترل لرزه‌های سازه‌ها بر مبنای معیارهای کنترل‌پذیری و پایداری سیستم کنترلی

علی اجتماعی^۱، هدایت ولادی^{۲*}، بهمن فرهمند آذر^۳، حسین غفارزاده^۴، سیامک طلعت اهری^۵

^۱ دانشجوی دکتری مهندسی سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز

^۲ دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز

^۳ دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز

^۴ استاد دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز

^۵ دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز

(دریافت: ۰۰/۰۰/۰۰، پذیرش: ۰۰/۰۰/۰۰، نشر آنلاین: ۰۰/۰۰/۰۰)

چکیده

استفاده از سیستم‌های کنترل ارتعاش مناسب و کارآمد به منظور تقلیل پاسخ‌های لرزه‌ای، از اهم مباحث طراحی سازه‌ها می‌باشد که همواره مورد توجه و علاقه محققان بوده است. در این پژوهش جهت بررسی تأثیر کنترل‌پذیری و پایداری سیستم کنترلی بر پاسخ‌های لرزه‌ای، مدل‌های سازه‌ای سه، شش، ده و بیستویک طبقه مجهز به مهاربند شورون، میراگر سیال ویسکوز و محرک فعال، در حالات کنترل نشده، کنترل غیرفعال و کنترل هیبریدی انتخاب شدند. سپس معادلات حرکت به فرم فضای حالت توصیف شد و کنترل‌پذیری، پایداری یا ناپایداری سیستم‌های کنترلی ارزیابی گردید. جهت پایداری‌سازی سیستم کنترل هیبریدی، الگوریتم تنظیم‌کننده مرتبه‌ی دوم خطی برای محاسبه‌ی ماتریس بهره‌ی بازخورد حالت و نیروی محرک تنظیم‌کننده‌ی فعال مورد استفاده قرار گرفت. با شبیه‌سازی مدل فضای حالت معادلات حرکت و شتاب حرکت زمین در متلب، پاسخ‌های لرزه‌ای مدل‌ها استخراج گردید. بررسی تاریخچه زمانی پاسخ‌ها از قبیل جابجایی طبقات، جابجایی مهاربندها، نیروی میراگر و نیروی محرک فعال، نشان داد که در سیستم‌های کنترلی ناپایدار دامنه‌ی پاسخ مهاربندها و میراگرها در طول رخداد زمین‌لرزه واگرا شدند. تأثیر پایداری‌سازی با مهاربند شورون بر کاهش پاسخ‌های لرزه‌ای، تنها در برخی طبقات مشاهده گردید؛ در حالی‌که پایداری‌سازی با محرک فعال، تا حدودی بر کاهش جابجایی لرزه‌ای تمام طبقات اثر گذاشت. ارزیابی کلی نتایج نشان داد که اگر از مهاربند، میراگر و محرک فعال، به طور همزمان در یک طبقه، به تعداد کافی و در مکان مناسب، استفاده گردد، به شرط تأمین پایداری سیستم کنترلی، پاسخ مهاربندها و میراگرها همگرا شده و جابجایی لرزه‌ای مهاربندها و طبقات به شدت کاهش می‌یابد.

کلیدواژه‌ها: فضای حالت، کنترل‌پذیری، تنظیم‌کننده‌ی مرتبه‌ی دوم خطی، سیستم کنترلی پایدار، سیستم کنترلی ناپایدار.

۱- مقدمه

سختی و میرایی اولیه‌ای است که بر اساس آنها معادله حرکت تشکیل می‌گردد؛ افزودن هر نوع ابزار کنترل پاسخ لرزه‌ای موجب ایجاد تغییرات در خواص سیستم دینامیکی سازه می‌شود و بر کیفیت و کمیت پاسخ‌های لرزه‌ای تأثیر می‌گذارد. یکی از روش‌های حل معادلات حرکت سازه‌ی مجهز به ابزارهای جذب و استهلاک انرژی، توصیف معادلات حرکت سیستم دینامیکی به فرم فضای حالت^۱ می‌باشد که در آن تغییرات خواص مکانیکی سیستم دینامیکی، در ماتریس سیستم [A] و موقعیت ابزارهای کنترل لرزه‌ای در ماتریس موقعیت [B]، خود را نمایان می‌سازد.

یکی از مهم‌ترین اهداف طراحی در سازه‌های ساختمانی، محدود نمودن جابجایی جانبی طبقات آن در اثر بارهای جانبی باد و زلزله می‌باشد که به روش‌های متعددی از قبیل استفاده از سیستم‌های درجا مانند انواع مهاربندها، کنترل غیرفعال، کنترل نیمه‌فعال و کنترل فعال انجام می‌پذیرد. از آنجا که روش‌های سنتی همیشه برای مهار جانبی کافی نبوده و ممکن است سازه در طول عمر بهره برداری دچار آسیب گردد، استفاده از ابزارهای کنترل لرزه‌ای ضرورت می‌یابد که در نتیجه‌ی آن، سختی و میرایی سازه تغییر می‌کند. سازه‌ی کنترل نشده، دارای ماتریس‌های جرم،

1. State space

* نویسنده مسئول؛ شماره تماس: ۰۴۱-۳۳۳۵۴۱۰۰

آدرس ایمیل: (ع. اجتماعی)، aliejtamaei@tabrizu.ac.ir، (ه. ولادی)، hveladi@tabrizu.ac.ir، (ب. فرهمند آذر)، b-farahmand@tabrizu.ac.ir، (س. طلعت اهری)، talatahari@tabrizu.ac.ir، (ح. غفارزاده)، ghaffar@tabrizu.ac.ir

(دریافت: ۰۰/۰۰/۰۰، پذیرش: ۰۰/۰۰/۰۰، نشر آنلاین: ۰۰/۰۰/۰۰)

نمودند که در نتیجه‌ی آن کارایی مناسب روش مذکور در کاهش پاسخ‌های لرزه‌ای ساختمان مشاهده گردید. Jian و همکاران (۲۰۲۰) شبیه‌سازی کنترل نیمه‌فعال در سازه‌های مهندسی عمران را با استفاده از کنترل کننده PID^۶ بر مبنای بهینه‌سازی سیستم کنترل به روش شبکه‌های عصبی شبیه‌سازی کردند که نتایج حاکی از پایداری مناسب در سیستم کنترلی مد نظر بوده است.

Gu و همکاران (۲۰۲۱) فنآوری کنترل ارتعاش لرزه‌ای در سازه‌های ساختمانی را با استفاده از میراگرهای مغناطیسی و روش کنترل غیرمتمرکز بررسی کردند و نشان دادند که سازگاری رفتار زیرسازه‌ها با همدیگر در سیستم کنترل غیرمتمرکز برای کاهش پاسخ‌های لرزه‌ای سازه‌های کنترل شده ضروری می‌باشد. یکی از نکات حائز اهمیت در کنترل لرزه‌ای سازه‌ها، لحاظ نمودن اندرکنش خاک و سازه می‌باشد که Modiri و Darvishan (۲۰۲۱) بدان پرداخته‌اند که نتایج حاکی از تأثیر محسوس خاک بستر نرم در پاسخ‌های لرزه‌ای سازه کنترل شده می‌باشد و این در حالی است که اثرات اندرکنش سازه و خاک بستر سخت، قابل اغماض است.

استفاده از میراگرهای سیال ویسکوز برای کنترل لرزه‌ای ساختمان‌های برشی توسط Cetin و همکاران (۲۰۱۹) مورد توجه قرار گرفت که در آن به طراحی، توزیع و تأثیر مناسب ابزار کنترل غیرفعال مذکور در کنترل لرزه‌ای سازه‌ها پرداخته شده است. همچنین Ajay و همکاران (۲۰۲۱) از میراگرهای ویسکوز سیال برای کنترل پیچش ناشی از زلزله استفاده کرده و تأثیر آن بر کاهش پاسخ‌های لرزه‌ای پیچشی را مورد تأکید قرار دادند. Hazaveh و همکاران (۲۰۲۰، ۲۰۲۱) از میراگرهای سیال ویسکوز برای کنترل لرزه‌ای سازه استفاده کرده و به صورت نظری و آزمایشگاهی تأثیر مناسب میراگر مذکور در کاهش پاسخ‌های لرزه‌ای ساختمان را اثبات نمودند. همچنین He و همکاران (۲۰۲۲) از میراگر سیال ویسکوز در قاب پیش‌ساخته استفاده کرده و پاسخ نتایج آزمایشگاهی را در حالات قاب با و بدون میراگر گزارش نمودند که در آن تأثیر مناسب میراگر سیال ویسکوز در کاهش پاسخ‌های لرزه‌ای مشاهده گردید. Babaei و همکاران (۲۰۲۲) کنترل لرزه‌ای دو مدل ۷ و ۱۲ طبقه را با استفاده از میراگر سیال ویسکوز، به صورت نظری مورد ارزیابی قرار دادند و تأثیر ابزار کنترل غیرفعال در کاهش جابجایی و شتاب طبقات را گزارش کردند.

جهت کنترل لرزه‌ای نیمه فعال و هیبریدی سازه‌ها، الگوریتم کنترل تنظیم کننده‌ی خطی مرتبه دوم LQR^۷ همواره مورد

Saaed و همکاران (۲۰۱۵) و Elouni و همکاران (۲۰۲۲) مروری بر فناوری‌های نوین در سیستم‌های کنترل ارتعاش سازه‌ای انجام داده‌اند و آنها را بر اساس عملکردشان به چهار گروه اصلی غیرفعال^۱، نیمه‌فعال^۲، فعال^۳ و ترکیبی^۴ طبقه بندی نموده‌اند. هر کدام از این روش‌ها دارای مزایا و معایبی هستند و تلاش در جهت مرتفع نمودن معایب و ارتقای محاسن آنها آینده مهندسی کنترل سیستم‌های سازه‌ای را تحت تأثیر قرار خواهد داد. یکی از بحث‌های جالب توجه در مهندسی کنترل سازه‌های ساختمانی، بررسی قابلیت اطمینان می‌باشد که Kuroki و Kurata (۲۰۰۳) با طرح احتمال وجود مشکلات و خطاها در سیستم‌های کنترل نیمه‌فعال و با آزمایش اعمال بار دینامیکی و ارتعاش اجباری، تحقیقات لازم را انجام داده و رضایت بخش بودن قابلیت اطمینان در سیستم‌های کنترل نیمه‌فعال سازه‌های ساختمانی را تأیید کردند. Kinay و Turan (۲۰۱۲) پایداری کنترل غیرفعال و امکان ناپایداری کنترل فعال را در سیستم‌های کنترلی سازه‌های ساختمانی مطرح کرده و با بکارگیری میراگر مغناطیسی^۵ به عنوان ابزار کنترل نیمه‌فعال و جداساز پایه^۶ با توانایی کنترل غیرفعال در یک قاب ساختمانی سه طبقه، با استفاده از روش کنترل تنظیم کننده‌ی مرتبه دوم خطی^۷ شبیه‌سازی نموده و کارآمدی بالای روش کنترل ترکیبی را در مقایسه با سایر روش‌های کنترل منفرد تأیید کردند. Grrido و همکاران (۲۰۱۸) اهمیت پایداری سیستم‌های کنترلی نیمه‌فعال را مطرح کردند و کلیات فرض پایداری ذاتی سیستم‌های کنترلی نیمه‌فعال را تا حدی درست دانسته و اذعان نمودند که برای تضمین پایداری دائمی و دستیابی به یک عملکرد مناسب، باید تمهیدات مناسبی در میرایی، سختی و اینرسی مستقل و متغیر در سیستم‌های کنترلی اندیشید. Zhang و Peng (۲۰۱۹) بهینه‌سازی کنترل لرزه‌ای بر مبنای مفهوم قابلیت اطمینان را در سیستم‌های کنترلی نیمه‌فعال سازه‌های ساختمانی بررسی نمودند. آنها ضمن بهینه‌سازی یکپارچه ماتریس‌های وزنی در کنترل نیمه‌فعال و فعال، معیارهای بر مبنای احتمال را نیز در دستور کار خود قرار داده و دریافتند که در طراحی سیستم‌های کنترلی فعال و نیمه‌فعال، طرح شامل بهینه‌سازی یکپارچه در مقایسه با طرح دارای معیار بر مبنای احتمال، اثر بخشی بهتری دارد و این در حالی است که طرح معیار بر مبنای احتمال از نظر قابلیت اطمینان نتایج بهتری را بر می‌تابد.

Pourzeynali و همکاران (۲۰۰۷) با ادغام روش‌های شبیه‌سازی الگوریتم ژنتیک و منطق فازی اقدام به طراحی و بهینه‌سازی پارامترهای مختلف کنترل کننده جرم تنظیم شونده‌ی فعال^۸ نمودند و روش پیشنهادی را در یک ساختمان ۱۱ طبقه اعمال

6. Base isolator
7. LQR (Linear quadratic regulator)
8. ATMD (Active tuned mass damper)
9. Proportional-Integral-Derivative controller
1. Linear Quadratic Regulator (LQR) 0

1. Passive
2. Semi-active
3. Active
4. Hybrid
5. MR (Magneto-rheological) damper

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = -[M]\{\ddot{x}_g(t)\} \quad (2)$$

که در آن M ماتریس قطری جرم، C ماتریس میرایی و K ماتریس سختی سازه می‌باشد. $\ddot{x}_g(t)$ تاریخچه زمانی شتاب حرکت زمین و $\mathbf{1}$ بردار ستونی با مولفه‌های واحد از مرتبه $n \times 1$ است (Xu و همکاران، ۲۰۱۶). اگر سازه به ابزارهای کنترل لرزه‌ای فعال و غیرفعال تجهیز گردد، معادله حرکت دینامیکی آن به شرح زیر بازنویسی می‌شود:

$$[M_u]\{\ddot{x}\} + [C_u]\{\dot{x}\} + [K_u]\{x\} = -[M_u]\{\ddot{x}_g(t)\} + \{f_a(t)\} + \{f_b(t)\} \quad (3)$$

که در آن x بردار جابجایی طبقات سازه و مهاربندها، M_u ماتریس جرم نهایی سیستم، C_u ماتریس میرایی نهایی سیستم، K_u ماتریس سختی نهایی سیستم، $f_a(t)$ بردار نیروی کنترل کننده‌ی فعال، $f_b(t)$ بردار نیروی ابزار غیرفعال می‌باشند و به شرح زیر تعریف می‌شوند:

$$\{x(t)\}_{(n+m) \times (n+m)} = [x_s(t) \quad ; \quad x_b(t)]^T \quad (4)$$

$$[M_u]_{(n+m) \times (n+m)} = \begin{bmatrix} [M_s] & \\ & [M_b] \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$[C_u]_{(n+m) \times (n+m)} = \begin{bmatrix} [C_s] + [C_{bsb}] & [C_{sb}] \\ [C_{bs}] & [C_b] \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$[K_u]_{(n+m) \times (n+m)} = \begin{bmatrix} [K_s] + [K_{bsb}] & [K_{sb}] \\ [K_{bs}] & [K_b] \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\{f_a(t)\}_{(n \times 1)} = [\theta_a]_{(n \times r)} \{f_a(t)\}_{(r \times 1)} \quad (8)$$

$$\{f_b(t)\}_{(n \times 1)} = [\theta_b]_{(n \times s)} \{f_b(t)\}_{(s \times 1)} \quad (9)$$

در روابط مذکور $x_s(t)$ بردار جابجایی طبقات سازه، $x_b(t)$ بردار جابجایی مهاربندها، M_s ماتریس قطری جرم سازه، M_b ماتریس قطری مهاربندهای طبقات، C_s ماتریس میرایی سازه، C_b ماتریس میرایی مهاربندها، K_s ماتریس سختی سازه، K_b ماتریس سختی مهاربندها، θ_a ماتریس موقعیت عامل‌های پایدارساز فعال و θ_b ماتریس موقعیت میراگرها می‌باشند. روش محاسبه سایر مولفه‌های درگیر ماتریس‌های میرایی و سختی سیستم دینامیکی مذکور در مرجع اصلی به تفصیل بیان شده است (Cheng و همکاران، ۲۰۰۸). هر کدام از بردارهای نیرویی مذکور تابعی از ماتریس‌های موقعیت ابزارهای کنترلی متناظر بوده و ماتریس‌های جرم، سختی و میرایی سازه‌ی کنترل شده، از طریق اعمال مشخصه‌های جرم، سختی و میرایی کنترل کننده‌ها در ماتریس‌های سازه‌ی اولیه تصحیح می‌گردند.

مدل فضای حالت، در واقع نوعی نمایش ریاضی سیستم دینامیکی است که شرط لازم و کافی برای تعیین رفتار یگانه‌ی

استقبال پژوهشگران بوده است. Lopez-Queija و همکاران (۲۰۲۲) با استفاده از الگوریتم مذکور، پاسخ توربین‌های بادی شناور را مهار نموده و خروجی مطلوب آن را گزارش دادند. همچنین Velagic و همکاران (۲۰۲۲) کارآمدی الگوریتم کنترل مذکور در صنعت هوا و فضا را نشان دادند که در آن توصیف معادلات سیستم مکانیکی به فرم فضای حالت بوده و شبیه‌سازی در متلب انجام گرفته است. سیستم مکانیکی پاندول معکوس^۱ توسط Chacko و همکاران (۲۰۲۲) با نرم‌افزار متلب شبیه‌سازی گردید و در آن پایدارسازی سیستم کنترلی مد نظر، با کنترل کننده‌ی فعال طراحی شده بر مبنای الگوریتم LQR انجام گرفت و نتایج مطلوب روش کنترل اتخاذی ارائه شد.

هدف از این پژوهش استفاده از میراگر سیال ویسکوز، کنترل کننده فعال و مهاربند شورون برای کنترل پاسخ‌های لرزه‌ای سازه‌های ساختمانی می‌باشد که در آن با توصیف معادلات حرکت به فرم فضای حالت و شبیه‌سازی در متلب، کنترل‌پذیری سازه‌ی کنترل نشده و پایداری نامی سیستم مکانیکی سازه در حالت کنترل غیرفعال بررسی گردیده و پاسخ‌های لرزه‌ای مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در صورتی که سیستم کنترلی غیرفعال ناپایدار باشد جهت پایدارسازی آن از کنترل کننده‌ی فعال طراحی شده بر مبنای الگوریتم LQR استفاده می‌گردد، سپس نتایج پاسخ‌های لرزه‌ای استخراج شده و با نتایج حالات کنترل نشده و کنترل غیرفعال مقایسه شده و مناسب‌ترین روش کنترل مدل‌های اتخاذی گزارش می‌گردد.

۲- تحلیل سیستم دینامیکی

برای بررسی رفتار یک سیستم دینامیکی باید بتوان مدلی از آن تهیه کرد تا امکان شبیه‌سازی و تحلیل آن فراهم گردد. توصیف فضای حالت معادله حرکت سیستم با n درجه آزادی و m طبقه دارای مهاربند، با r تعداد عامل پایدارساز فعال و s تعداد میراگر ویسکوز، با توجه به پیکربندی سازه، روش مناسبی برای کنترل پاسخ‌های لرزه‌ای می‌باشد که امکان شبیه‌سازی آن در محیط نرم افزار متلب وجود دارد که ماتریس چنین سیستمی از درجه N برخوردار است و مرتبه آن به شرح زیر می‌باشد:

$$N = 2(n + m + r) + s \quad (1)$$

۲-۱- معادله حرکت سازه و توصیف فضای حالت

پاسخ طبقات یک سازه با n درجه آزادی با تعریف n مختصه بیان می‌شود. با تعیین ماتریس‌های جرم، میرایی و سختی و با تعریف بردارهای شتاب، سرعت و جابجایی طبقات و سپس انتخاب و اعمال شتابانگاشت زلزله، معادله حرکت دینامیکی سازه در اثر زمین لرزه به شرح زیر بیان می‌شود:

$$\begin{cases} P_1(k,i) = -C_k/\lambda_k \\ P_1(k,j+n) = C_k/\lambda_k \\ P_2(k,k) = -1/\lambda_k \end{cases} \quad (13)$$

اکنون با توجه به فرم توصیف شده معادلات حالت سیستم دینامیکی سازه ساختمانی، می‌توان تابع تبدیل آن را تعیین کرد که برای سیستم‌های دارای چند ورودی و چند خروجی، ماتریسی از توابع تبدیل حاصل میشود، این توابع تبدیل که از روی ماتریس-های A، B، C و D محاسبه می‌گردند، منحصر به فرد هستند (Cheng و همکاران، ۲۰۰۸).

۲-۲- ماتریس بهره‌ی بازخورد حالت^۳

کنترل هیبریدی یعنی کنترل سازه با ترکیب ابزارهای فعال و غیرفعال جذب و مستهلک کننده انرژی ناشی از زلزله با هدف کاهش جابجایی جانبی لرزه‌ای طبقات ساختمان می‌باشد که ممکن است در آن از انواع سیستم‌های مهاربندی جانبی و یا قابهای خمشی نیز استفاده گردد. بر اساس توصیف معادله حرکت سازه به فرم فضای حالت، برای محاسبه‌ی نیروی ابزار تنظیم کننده‌ی فعال، سیستم مکانیکی مد نظر مطابق شکل ۱ تعریف می‌گردد، که در آن ماتریس بهره‌ی بازخورد حالت G، بردار نیروی کنترل کننده‌ی فعال را به شرح زیر به دست می‌دهد (Xu و همکاران، ۲۰۱۶):

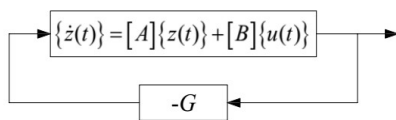
$$u(t) = -Gz(t) \quad (14)$$

و برای محاسبه‌ی ماتریس بهره‌ی بازخورد حالت، از الگوریتم کنترل LQR استفاده می‌گردد.

با توجه به معادله (۱۰) و با در دست داشتن ماتریس‌های A، B، C و D برای سیستم مکانیکی سازه‌ی کنترل شده، ماتریس بهره‌ی بازخورد حالت با دستور lqr در متلب و به شرح زیر حاصل می‌شود:

$$G = lqr(A,B,C,D) \quad (15)$$

به طوری که شاخص عملکرد زیر حداقل گردد (Xu و همکاران، ۲۰۱۶):



شکل ۱- نمایش سیستم مکانیکی با پایدارساز فعال دارای ماتریس بهره‌ی G (Xu و همکاران، ۲۰۱۷)

سیستم در تمام زمان‌های آینده، داشتن سه ویژگی از قبیل مشخصات مکانیکی سیستم، تعیین مقدار متغیرهای حالت سیستم در زمان اولیه و تعیین ورودی‌های سیستم در تمام زمان-های آینده می‌باشد. در این سیستم سازه‌ای معادلات حالت از نوع زمان پیوسته خطی بوده و مختصه‌های جرم، میرایی و سختی طبقات دارای مقادیر عددی نامتغیر با زمان است. بنابراین مدل حالت سیستم دینامیکی سازه ساختمانی از نوع خطی نامتغیر با زمان^۱ می‌باشد که در آن معادلات حالت با پارامترهای مجزا و نامتغیر با زمان تعریف می‌شوند و در نهایت شکل برداری معادلات حالت مذکور برای سیستم با r ورودی، n متغیر حالت و m خروجی به شرح زیر بیان می‌شود:

$$\begin{cases} \dot{z}(t) = [A]z(t) + [B]u(t) \\ y(t) = [C]z(t) + [D]u(t) \\ z(t) = [\{x(t)\}, \{\dot{x}(t)\}, \{f_d(t)\}, \{f_a(t)\}]^T \end{cases} \quad (10)$$

که در آن $z(t) \in R^n$ بردار حالت، $u(t) \in R^r$ بردار نیروی فعال، $y(t) \in R^m$ بردار خروجی سیستم بوده و $B_{n \times r} = R^{n \times r}$ ماتریس وابسته به موقعیت نیروی محرک $u(t)$ بوده و در آن مختصه‌های مربوط به طبقه دارای محرک پایدارساز فعال یک و مابقی صفر می‌باشد. همچنین $C_{m \times n} \in R^{m \times n}$ ماتریس وابسته به خروجی بوده و درایه‌های مربوط به خروجی‌های مد نظر یک و مابقی صفر است. بعلاوه $D_{m \times r} \in R^{m \times r}$ ماتریس انتقال سیستم است که در این پژوهش تمامی عناصر آن صفر می‌باشد. (Xu و همکاران، ۲۰۱۶).

برای سازه مجهز به مهاربند شورون و میراگر ویسکوز، $A_{N \times N} = R^{N \times N}$ ماتریس سیستم نام دارد و با توجه به ماتریس-های پارامتری P_1 و P_2 به شرح زیر بیان می‌گردد:

$$[A]^{(N \times N)} = \begin{bmatrix} [I] & [0] \\ -[M]^{-1}[K] & -[M]^{-1}[C] \\ [0] & P_1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

که در آن ماتریس مربوط به موقعیت میراگر و مهاربند می‌باشد و به شرح زیر تعریف می‌شود:

$$[\gamma_p]_{(n+m) \times s} = \begin{bmatrix} [I]_{n \times n} [\theta_a]_{n \times s} \\ -[\theta_b]_{m \times n} [I]_{n \times n} [\theta_a]_{n \times s} \end{bmatrix} \quad (12)$$

که در آن θ_b ماتریس موقعیت مهاربندها و θ_a ماتریس موقعیت میراگرها در سازه می‌باشد. همچنین عناصر غیر صفر ماتریس P_1 و ماتریس قطری P_2 با توجه به رفتار دینامیکی میراگر ویسکوز براساس مدل ماکسول با ضریب میرایی C_k و زمان درنگ λ_k ، به شرح زیر محاسبه می‌گردد:

3. Feedback gain matrix

1. Linear time invariant (LTI)
2. Transfer function

۲-۳-۲- پایداری^۲

سیستم کنترلی پایدار سیستمی است که در آن، کاهش جابجایی لرزه‌ای طبقات همگرا باشد و به سمت نقطه‌ی تعادل اولیه یعنی حالت قبل از وقوع زلزله میل نماید. پایداری یک سیستم دینامیکی تحت کنترل به زبان ساده بیان می‌نماید که آیا تغییرات اندک در شتاب حرکت زمین به عنوان ورودی، و یا تغییرات برخی از متغیرهای حالت سیستم سازه‌ای، منجر به ایجاد تغییرات بزرگ در رفتار یا خروجی نهایی سیستم سازه‌ای می‌گردد یا خیر. در سیستم سازه ساختمانی وضعیت قبل از تأثیر زلزله یعنی سازه در شرایط ایستا، نقطه تعادل اولیه نام دارد و تحلیل پایداری کنترلی نیز حول این نقطه انجام می‌یابد. در شرایط تعادل اولیه رفتار مصالح سازه در محدوده ارتجاعی می‌باشد و هیچگونه تسلیم یا تشکیل مفاصل پلاستیک در اعضای سازه‌ای رخ نداده است. در صورت تشکیل برخی مفاصل پلاستیک در سازه، ممکن است تعداد نقاط تعادل ازدیاد پیدا کند که در این صورت بررسی و تشخیص پایداری کنترلی سیستم پیچیده تر می‌شود. بنابراین در این پژوهش حفظ رفتار خطی در مصالح سازه در حین وقوع زلزله فرض مناسبی است و این بدان مفهوم است که نیروهای عکس العمل ابزارهای کنترل، پاسخ‌های لرزه‌ای سازه را طوری مهار می‌نمایند که در طول رخداد زمین لرزه کاهش جابجایی طبقات به خوبی مشاهده گردد، در این صورت سازه از لحاظ کنترلی پایدار تلقی می‌شود و پاسخ طبقات آن حول نقطه تعادل اولیه نوسان می‌نمایند و سرانجام به وضعیت نقطه تعادل اولیه یعنی وضعیت قبل از تأثیر زلزله میل می‌کند.

یکی دیگر از روش‌های نمایش مدل سیستم دینامیکی سازه-های ساختمانی، تابع تبدیل می‌تواند باشد که در آن قطب‌ها یا ریشه‌های مخرج تابع تبدیل پایداری سیستم را مشخص می‌نماید. اگر تابع تبدیل از معادلات حالت سیستم استخراج شود و مرتبه آن با مرتبه معادلات حالت برابر باشد، در این صورت هیچ حذف صفر یا قطب رخ نداده است و چنین سیستمی نیز کنترل پذیر می‌باشد که در آن تعداد قطب‌ها با تعداد مقادیر ویژه برابر است و مقادیر قطب‌ها نیز با مقادیر ویژه برابر هستند. نظر به نامتغیر با زمان بودن معادله حالت سیستم دینامیکی خطی سازه ساختمانی و فرم ماتریسی رابطه (۱۹)، مخرج تابع تبدیل با رابطه (۲۰) بیان می‌شود (Xu و همکاران، ۲۰۱۶):

$$G(s) = C(sI - A)^{-1}B + D \quad (19)$$

$$\det(sI - A)^{-1} = 0 \quad (20)$$

که در آن I ماتریس واحد، s متغیر مختلط در تبدیل لاپلاس و G(s) تابع تبدیل سیستم است. همچنین معادله (۲۰)

$$PFI = \int_{t_0}^{\infty} [\{z(t)\}^T Q \{z(t)\} + \{u(t)\}^T R \{u(t)\}] dt \quad (16)$$

که در آن Q و R ماتریس‌های وزنی هستند و به ترتیب ماتریس‌های نیمه متعین مثبت و متعین مثبت می‌باشند. مقادیر ماتریس‌های وزنی برای سازه‌های ساختمانی را می‌توان به شرح زیر اختیار نمود (Ghaffarzadeh و همکاران، ۲۰۱۵):

$$Q = [I]_{N \times N}, R = 10^{-12} [I]_{r \times r} \quad (17)$$

۲-۳-۲- مفهوم و معیار کنترل پذیری و پایداری

۲-۳-۱- کنترل پذیری

اگر پیکربندی سازه طوری باشد که ابزارهای کنترل بتوانند در حین رخداد زلزله، پاسخ‌های لرزه‌ای را در زمان محدود کاهش داده و سرانجام به وضعیت اولیه یعنی حالت قبل از وقوع زلزله برسانند، چنین سازه‌ای را کنترل پذیر نامند؛ در غیر اینصورت سازه کنترل ناپذیر است و در خصوص پیکربندی آن باید تجدید نظر شود. متغیرهای حالت سیستم دینامیکی سازه‌های ساختمانی، جابجایی، سرعت و شتاب طبقات آن می‌باشند که تحت اثر شتاب حرکت زمین به عنوان ورودی سیستم، دچار تغییرات می‌گردند و قبل از اعمال روش‌های کنترل سازه، باید از مؤثر واقع شدن نیروی انواع ابزارهای کنترل کننده در کاهش پاسخ‌های لرزه‌ای اطمینان حاصل کرد. بنابراین موقعیت نیروهای کنترل کننده‌ی پاسخ‌های لرزه‌ای در طبقات سازه از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است و پاسخ به این سوال از طریق ارزیابی معیار کنترل پذیری صورت می‌گیرد. لازم به ذکر است که کنترل پذیری در سیستم‌های حلقه باز مورد بررسی قرار می‌گیرد و اگر سیستم حلقه باز کنترل پذیر باشد سیستم حلقه بسته نیز کنترل پذیر خواهد شد. همچنین اگر سیستم حلقه بسته با کنترل بازخورد متغیرهای حالت طراحی شود، همانند سیستم حلقه باز کنترل پذیر خواهد شد. اکنون با توجه به مفهوم ارائه شده، ماتریس کنترل پذیری سیستم دینامیکی سازه ساختمانی مجهز به ابزارهای کنترلی به شرح زیر بیان می‌گردد:

$$P_{n \times nr} = [B \quad AB \quad A^2B \quad \dots \quad A^{n-1}B] \quad (18)$$

که در آن معیار کنترل پذیر بودن سیستم آن است که مرتبه^۱ ماتریس کنترل پذیری برابر با مرتبه سطری ماتریس سیستم باشد (Xu و همکاران، ۲۰۱۶). این فرآیند در مطلب با توجه به ماتریس-های A و B و با استفاده از دستور $\text{ctrb}(A,B)$ قابل محاسبه و ارزیابی است.

3. Time invariant

1. Rank
2. Stability

جدول ۱- فرضیات، خواص هندسی و مکانیکی مدل‌ها

ردیف	خواص سازه‌ای	توصیف یا مقدار (واحد)
۱	نوع فولاد	St52
۲	شرایط و مقاطع ستونها	دوسر گیردار، IPB متوسط، خمش حول محور ضعیف مقطع
۳	جرم هر طبقه	با در نظر گرفتن ظرفیت کمانش ستونها، ۵۵ تن
۴	دیافراگم طبقات	صلب
۵	سختی هر طبقه	با فرض رفتار ستون دوسر گیردار تعیین می شود
۶	معیار محاسبه میرایی	فرمول رایلی
۷	نسبت میرایی اعضای سازه و مهاربندها	۵ درصد
۸	نوع مهاربندی سازه	بادبند شورون ^۱
۹	جرم مهاربند	۰٫۳ تن
۱۰	سختی مهاربند	۰٫۲۰ تن بر متر
۱۱	ضریب میرایی میراگر ویسکوز	۰٫۰۵۵۳ تن بر ثانیه
۱۲	زمان درنگ میراگر ویسکوز	۰٫۰۲۵ ثانیه
۱۳	تاریخچه زمانی شتاب حرکت زمین	زلزله طیس - ایران، RSN=137 (PEER, ۲۰۲۲)
۱۴	مدل تحلیل میراگر	مدل ماکسول
۱۵	رفتار مصالح سازه	خطی
۱۶	الگوریتم پایدارسازی فعال	تنظیم کننده خطی درجه دوم (LQR)

گرفته شد؛ همچنین از تاثیر سختی محوری اعضای تشکیل دهنده میراگر در ماتریس سختی سازه صرف نظر گردید.

پس از اطمینان از کنترل پذیری سیستم نامی، روش‌های کنترل لرزه‌ای سازه اتخاذ شده و با توجه به اطلاعات و فرضیات مندرج در جدول ۱ از قبیل مقاطع ستونها، جرم طبقات و مهاربندها، سختی طبقات و مهاربندها، میرایی طبقات و مهاربندها، ضریب میرایی و زمان درنگ میراگر ویسکوز با رفتار مدل ماکسول، مدل مجهز به ابزارهای کنترل غیرفعال تشکیل شده و مطابق روابط (۵) تا (۷) ماتریس‌های نهایی جرم، سختی و میرایی محاسبه شده و با تعریف تاریخچه زمانی جابجایی طبقات و بردار نیروهای خروجی ابزارهای کنترل براساس روابط (۴)، (۸) و (۹)، مطابق رابطه (۳)، معادله حرکت سیستم دینامیکی حاصل شکل می‌گیرد. در این گام ماتریس‌های موقعیت مهاربندها و ابزارهای کنترل لرزه-ای در پاسخ‌های لرزه‌ای خروجی سیستم دینامیکی مطابق روابط (۸) و (۹) تاثیر داده می‌شود. در ادامه مدل فضای حالت سیستم در حالت کنترل غیرفعال طبق رابطه (۱۰) توصیف شده و ماتریس سیستم دینامیکی A مطابق روابط (۱۱) تا (۱۳) تشکیل می‌شود، در نهایت با استفاده از دستور Isim در متلب می‌توان پاسخ‌های

مقادیر ویژه ماتریس سیستم را بر می‌تابد که همان قطب‌های سیستم می‌باشد. حال اگر در سیستم حذف صفر و قطب رخ دهد مرتبه تابع تبدیل کمتر از مرتبه معادلات حالت سیستم می‌شود و برخی از مقادیر ویژه ماتریس سیستم در تابع تبدیل نمایان نمی‌شوند. بنابراین هر قطب تابع تبدیل یکی از مقادیر ویژه ماتریس سیستم در معادلات حالت است و این در حالی است که همه مقادیر ویژه الزاماً قطب نیستند. اکنون با توجه به مفاهیم ارائه شده قضیه زیر در مورد سازه‌های ساختمانی بازنویسی می‌شود:

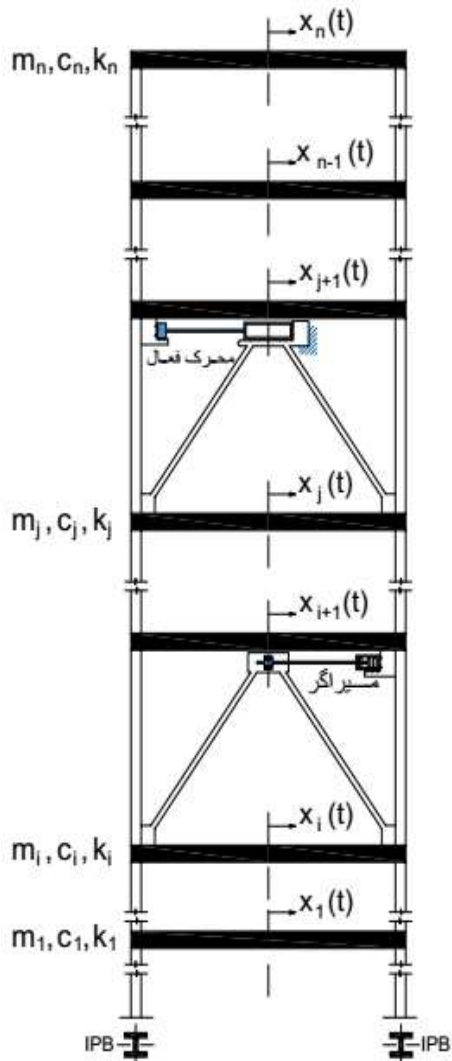
قضیه پایداری: اگر نمایش ریاضی سیستم‌های دینامیکی خطی زمان پیوسته و ایستای سازه‌های ساختمانی با تابع تبدیل بیان شود، در این صورت شرایط پایداری آن است که همه قطب-های سیستم مذکور در سمت چپ محور موهومی قرار بگیرد، یعنی همه قطب‌های حقیقی و قسمت حقیقی قطب‌های مختلط منفی باشند.

بنابراین با توجه به مقادیر ویژه ماتریس سیستم دینامیکی سازه ساختمانی، می‌توان در مورد پایداری اظهار نظر نمود.

۴-۲- شبیه‌سازی در متلب

در فرآیند شبیه‌سازی، برای ارزیابی پاسخ‌های لرزه‌ای، ابتدا مدل نامی یا اصلی تعریف می‌گردد. مدل نامی همان سازه اولیه کنترل نشده می‌باشد که تعداد طبقات و مولفه‌های جرم و سختی طبقات مطابق جدول ۱ معلوم است. براساس این مولفه‌ها ماتریس-های جرم و سختی سازه اولیه تعیین می‌شود، سپس به روش رایلی ماتریس میرایی محاسبه می‌گردد. در نهایت با اعمال تاریخچه زمانی شتاب حرکت زمین معادله حرکت (۲) برای سازه نامی تشکیل گردیده و به فرم فضای حالت توصیف می‌شود. در این حالت ماتریس سیستم A بدون هرگونه ابزارهای کنترلی تشکیل شده و با استفاده از دستور Isim در متلب، تاریخچه زمانی جابجایی طبقات سازه در حالت کنترل نشده استخراج می‌شود. پس از تحلیل مدل نامی، کنترل پذیری آن مطابق رابطه (۱۸) با استفاده از دستور ctrb در متلب ارزیابی می‌گردد. لازم به ذکر است که مدل نامی در سیستم دینامیکی سازه ساختمانی به دلیل کفایت تعداد و آرایش صحیح عناصر سازه‌ای، کنترل پذیر می‌باشد. در صورت افزودن ابزارهای کنترل غیر فعال، امکان عدم تامین کنترل پذیری وجود دارد که آن‌هم با تغییر آرایش ابزارهای مذکور امکان تامین شرط کنترل پذیری مهیا می‌شود. در این پژوهش فرضیات و اطلاعات مربوط به خواص هندسی و مکانیکی مورد نیاز مدل‌های سازه‌ای مطابق جدول ۱ انتخاب گردیده است. با توجه به اینکه اساس استراتژی در کنترل لرزه‌ای سازه‌ها، عدم تجربه خرابی اعضای سازه‌ای و ضرورت حفظ ایمنی و امکان بهره‌برداری پس از وقوع زلزله می‌باشد، رفتار مصالح سازه‌ای خطی در نظر

ماتریس‌های مورد نیاز محاسبه گردید که در آنها با توجه به مقادیر ویژه ماتریس سیستم A، در مورد پایداری سیستم کنترل لرزه‌ای اظهار نظر گردید. شکل ۲ نمایش مدل سازه n طبقه مجهز به مهاربندها و ابزارهای کنترل لرزه‌ای را نشان می‌دهد. همچنین در شکل ۳ نمودار روند شبیه‌سازی مدل‌های سازه‌ای ارائه شده است.



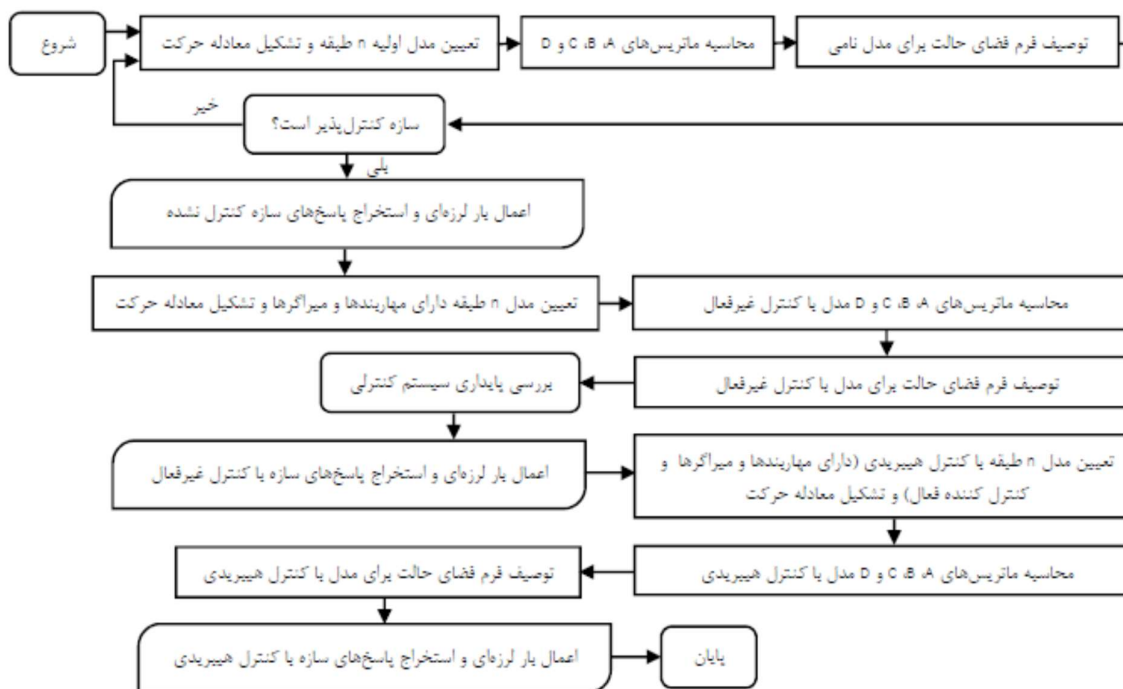
شکل ۲- نمایش مدل سازه‌ای n طبقه

لرزه‌ای خروجی از قبیل جابجایی طبقات و مهاربندها و نیز نیروی میراگرها را استخراج نمود. نکته قابل توجه تعیین ماتریس موقعیت مهاربند θ_b و ماتریس موقعیت میراگر ویسکوز θ_d است که با توجه به مرتبه ماتریس‌های موقعیت مذکور در رابطه (۱۲)، درایه‌های مربوط به طبقات دارای مهاربند یا میراگر یک و سایر درایه‌ها صفر می‌باشد. به عنوان مثال اگر یک سازه ۶ طبقه دارای ۲ عدد مهاربند و میراگر در طبقات یک و سه باشد، مرتبه ماتریس موقعیت 6×2 بوده که در آن $\theta(1, 1)$ و $\theta(3, 2)$ برابر یک و مابقی درایه‌ها صفر خواهد بود.

به طریق مشابه، با افزودن محرک فعال پایداری سازه به دارای ابزار کنترل غیرفعال، سیستم کنترل هیبریدی حاصل می‌شود که در این صورت بردار نیروی فعال به معادله حرکت سازه و متعاقباً به فرم توصیف فضای حالت اضافه می‌گردد. با استفاده از روابط (۱۰) تا (۱۳) مدل حاصل تحلیل شده و پایداری آن با استفاده از روابط (۱۹) و (۲۰) ارزیابی می‌شود، سپس پاسخهای لرزه‌ای سازه با سیستم کنترل هیبریدی از قبیل جابجایی طبقات سازه و مهاربندها و نیز نیروی عکس‌العمل میراگرها با استفاده از دستور Isim در متلب استخراج می‌گردد. همچنین نیروی محرک فعال پایداری سازه نیز با استفاده از دستور Iqr در متلب حاصل شده و با سایر مدل‌ها مقایسه می‌شود.

۳- مدل‌های سازه‌ای

برای ارزیابی پاسخ لرزه‌ای سازه‌های ساختمانی مبتنی بر مفهوم کنترل‌پذیری و پایداری سیستم کنترلی، مدل‌هایی از قبیل مدل نامی کنترل‌پذیر و سایر مدل‌های دارای سیستم کنترلی پایدار و ناپایدار در حالات کنترل غیرفعال و نیمه‌فعال مورد نیاز است. در این پژوهش، سیستم مهاربند شورون مجهز به میراگر سیال ویسکوز به عنوان ابزار کنترل‌کننده غیرفعال انتخاب شد و در حالت کنترل هیبریدی، کنترل‌کننده یا محرک فعال به سیستم کنترل لرزه‌ای سازه اضافه گردید. بدین منظور مدل‌های سازه‌های ۳، ۶، ۱۰ و ۲۱ طبقه در حالات سازه اصلی بدون کنترل، سازه با کنترل غیرفعال و سازه با کنترل هیبریدی مطابق جدول ۲ انتخاب شدند که در آنها ماتریس‌های موقعیت مهاربندهای شورون و ابزارهای کنترل غیرفعال و فعال در ارتفاع سازه متفاوت اتخاذ گردید. هدف از ایجاد تنوع در روش‌های کنترل، بررسی مفاهیم کنترل‌پذیری سازه اصلی و پایداری سیستم‌های کنترلی و نیز تأثیر این دو بر پاسخ‌های لرزه‌ای طبقات سازه مانند تاریخچه زمانی جابجایی‌ها و نیروی عکس‌العمل ابزارهای کنترلی بوده است. در تمامی مدل‌ها، مطابق فرآیند شبیه‌سازی توصیف شده، ابتدا کنترل‌پذیری مدل نامی یا اصلی ارزیابی گردید، سپس روش‌های کنترل لرزه‌ای غیرفعال و هیبریدی اتخاذ شد و با توجه به اطلاعات و فرضیات مندرج در جدول ۱، شبیه‌سازی شده و



شکل ۳- نمودار روند شبیه‌سازی مدل سازه‌ای

جدول ۲- مشخصات مدل‌های سازه‌ای کنترل شده و توصیف سیستم‌های کنترلی

شماره مدل	تعداد طبقه	سیستم کنترلی	مکان مهاربند شورون	مکان میراگر سیال ویسکوز	مکان محرک فعال پایدار ساز	مقاطع ستونها از طبقه یک به بالا (IPB)
۱	۳	کنترل نشده				IPB160, 140, 120
	۳	کنترل غیر فعال	طبقه ۱	طبقه ۱	-	
	۳	کنترل ترکیبی (هیبریدی)	طبقه ۱	طبقه ۱	طبقه ۱	
	۳	کنترل ترکیبی (هیبریدی)	طبقات ۱ و ۳	طبقه ۱	طبقه ۳	
۵	۶	کنترل نشده				IPB200, 200, 180, 160, 140, 120
	۶	کنترل غیر فعال	طبقه ۱	طبقه ۱	-	
	۶	کنترل ترکیبی (هیبریدی)	طبقه ۱	طبقه ۱	طبقه ۱	
	۶	کنترل ترکیبی (هیبریدی)	طبقات ۱ و ۳	طبقه ۱	طبقه ۳	
۹	۱۰	کنترل نشده				IPB240, 240, 220, 220, 200, 200, 180, 160, 140, 120
	۱۰	کنترل غیر فعال	طبقه ۱	طبقه ۱	-	
	۱۰	کنترل ترکیبی (هیبریدی)	طبقه ۱	طبقه ۱	طبقه ۱	
	۱۰	کنترل غیر فعال	طبقات ۵، ۶ و ۷	طبقات ۵ و ۷	-	
۱۳	۲۱	کنترل نشده				IPB450, 400, 360, 340, 320, 320, 300, 300, 280, 280, 260, 240, 240, 220, 220, 200, 200, 180, 160, 140, 120
	۲۱	کنترل غیر فعال	طبقات ۱، ۱۱ و ۲۱	طبقات ۱، ۱۱ و ۲۱	-	
	۲۱	کنترل ترکیبی (هیبریدی)	طبقات ۱، ۱۱ و ۲۱	طبقات ۱، ۱۱ و ۲۱	طبقات ۱، ۱۱ و ۲۱	

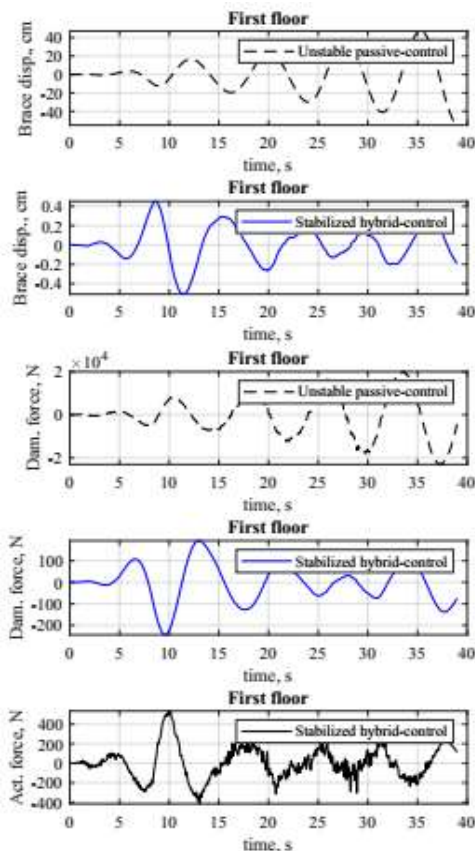
۴- نتایج و بحث

در این پژوهش ابتدا فرضیات و سیستم‌های کنترلی مدل‌ها در متلب پیاده‌سازی شده و مفاهیم کنترل پذیری و پایداری بررسی گردیدند، سپس پاسخ‌های لرزه‌ای مدل‌های یک تا پانزده استخراج و ترسیم شدند. بررسی مفهوم کنترل پذیری و پایداری داخلی با توجه به مشخصات هندسی و مکانیکی در سازه اصلی یا اولیه انجام

شد که در آن با محاسبه ماتریس کنترل پذیری و با توجه به کامل بودن مرتبه آن، کنترل پذیر بودن سیستم تأیید گردید. لازم به ذکر است که در صورت کنترل پذیر نبودن، تجدید نظر در سیستم سازه‌ای اولیه ضرورت پیدا می‌کند. مفهوم پایداری مربوط به سازه کنترل نشده و سیستم نامی سازه‌های کنترل شده با انواع ابزارهای فعال و غیرفعال می‌باشد.

جدول ۳- نتایج تحلیل کنترل پذیری و پایداری

شماره مدل	روش کنترل	نتیجه تحلیل
۱	کنترل نشده	کنترل پذیر و پایدار نامی
۲	کنترل غیر فعال	ناپایدار
۳	کنترل هیبریدی	پایدار
۴	کنترل هیبریدی	پایدار
۵	کنترل نشده	کنترل پذیر و پایدار نامی
۶	کنترل غیر فعال	ناپایدار
۷	کنترل هیبریدی	پایدار
۸	کنترل هیبریدی	پایدار
۹	کنترل نشده	کنترل پذیر و پایدار نامی
۱۰	کنترل غیر فعال	ناپایدار
۱۱	کنترل هیبریدی	پایدار
۱۲	کنترل غیر فعال	پایدار
۱۳	کنترل نشده	کنترل پذیر و پایدار نامی
۱۴	کنترل غیر فعال	ناپایدار
۱۵	کنترل هیبریدی	پایدار



شکل ۴- پاسخ‌های لرزه‌ای مدل‌های ۱، ۲ و ۳ (۳ طبقه)، شامل تاریخچه زمانی جابجایی مهاربند، پاسخ میراگر و پاسخ کنترل کننده فعال در حالات سیستم کنترلی پایدار و ناپایدار.

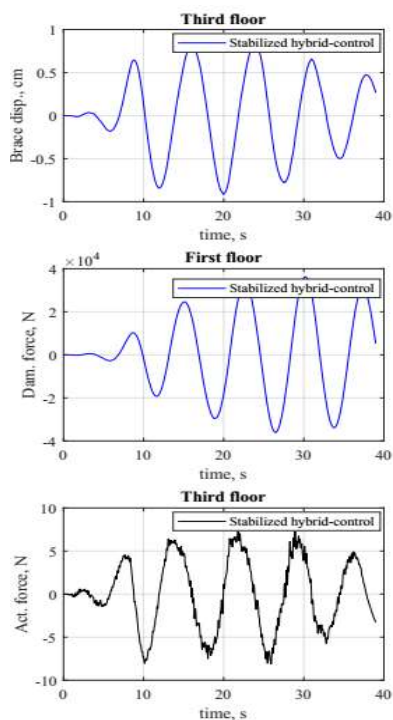
حالات کنترل نشده، کنترل غیرفعال با میراگر و مهاربند در طبقه اول و کنترل هیبریدی با میراگر و مهاربند و محرک فعال در طبقه اول نشان داده شده است.

مطابق شکل ۴، در طول رخداد زمین‌لرزه پاسخ‌های جابجایی مهاربند و نیروی میراگر در حالت کنترل غیرفعال ناپایدار واگرا شد، در صورتی که استفاده از محرک فعال و تبدیل سیستم کنترل غیرفعال ناپایدار به سیستم کنترل هیبریدی پایدار موجب کاهش دامنه پاسخ جابجایی مهاربند و نیروی میراگر و همگرایی آنها گردید. پاسخ نیروی کنترل کننده فعال نیز در انتهای شکل ۶-الف نشان داده شده است. در شکل ۵ جابجایی طبقات در حالات کنترل نشده، کنترل غیرفعال ناپایدار و کنترل هیبریدی پایدار نشان داده شده است. در این مدل در حالت کنترل غیرفعال، ابزار کنترلی فقط برای کاهش جابجایی طبقه اول تأثیر گذاشت در حالی که در حالت کنترل هیبریدی پایدار، جابجایی تمام طبقات ۹۴ درصد کاهش یافت. مقادیر عددی پاسخ‌های لرزه‌ای مدل‌های سه طبقه در جدول ۴ ارائه شده است.

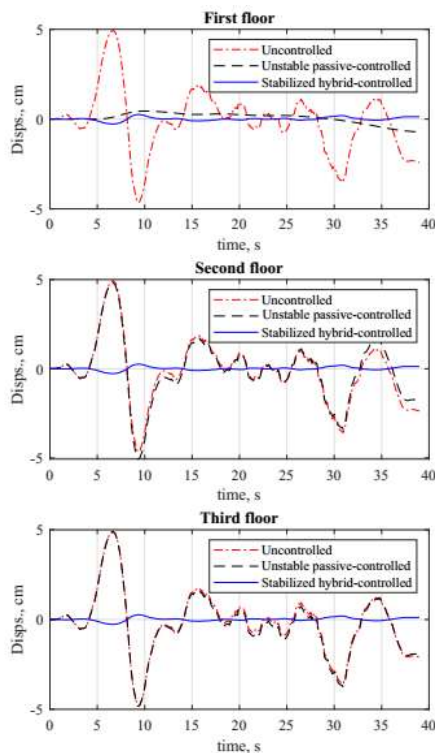
سیستم نامی هر مدل کنترل شده همان سیستم مکانیکی سازه‌ای می‌باشد که در آن خواص مکانیکی ابزارهای کنترل فعال و غیرفعال به خواص مکانیکی سازه و متعاقباً به ماتریس سیستم سازه‌ای تأثیر می‌گذارند. با این توصیف اضافه نمودن میراگر، مهاربند شورون و محرک فعال به سیستم سازه‌ای منجر به افزوده شدن خواص هندسی و مکانیکی آنها به خواص هندسی و مکانیکی سازه اصلی شد و منجر به تغییر یافتن ماتریس سیستم گردید و بدین طریق مدل نامی متناظر با سیستم کنترلی حاصل گشت که کارآمدی و اثرگذاری آن در کنترل لرزه‌ای سازه حائز اهمیت است. برای بررسی اثرات روش کنترل اتخاذی باید با توجه به مقادیر ویژه ماتریس سیستم، از پایدار بودن سیستم کنترلی مطمئن بود، در جدول ۳ نتایج کنترل‌پذیری و پایداری مدل‌ها ارائه شده است.

۴-۱- پاسخ‌های لرزه‌ای مدل‌های سه طبقه

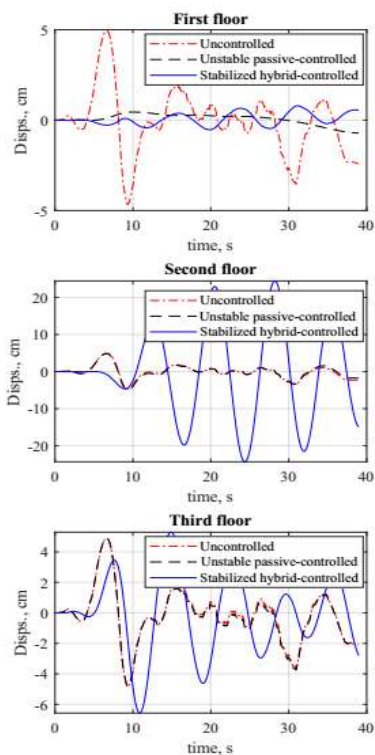
تاریخچه زمانی پاسخ‌های لرزه‌ای سازه‌های سه طبقه از قبیل جابجایی طبقات، جابجایی مهاربند، نیروی میراگر و نیروی کنترل کننده فعال مربوط به مدل‌های ۱ تا ۴ به ترتیب در اشکال ۴، ۵، ۶ و ۷ نمایش داده شده است. ابتدا مدل ۱ تعریف شد و کنترل-پذیری و پایداری اولیه آن با توجه به مرتبه و مقادیر ویژه ماتریس سیستم ارزیابی گردید، سپس مدل مذکور تحت نیروی زلزله تحلیل شد و پاسخ آن جهت مقایسه با پاسخ سایر مدل‌های سه طبقه استخراج گردید. مشابه مدل اولیه، ماتریس سیستم در مدل‌های دارای ابزارهای کنترلی بررسی شد و ضمن ارزیابی کنترل-پذیری و پایداری سایر مدل‌های سه طبقه منتخب، نتایج حاصل در جدول ۳ درج گردید. در شکل ۴ پاسخ مدل‌های سه طبقه، در



شکل ۶- پاسخ‌های لرزه‌ای مدل ۴ (۳ طبقه). شامل جابجایی مهاربند، پاسخ میراگر و پاسخ کنترل کننده فعال در حالت سیستم کنترل مرکب پایدار.



شکل ۵- پاسخ‌های لرزه‌ای مدل‌های ۱، ۲ و ۳ (۳ طبقه). شامل تاریخچه زمانی جابجایی طبقات در حالات کنترل نشده، کنترل غیر فعال ناپایدار و کنترل مرکب پایدار



شکل ۷- پاسخ‌های لرزه‌ای مدل ۴ (۳ طبقه). شامل جابجایی طبقات در حالات کنترل نشده، کنترل غیر فعال ناپایدار و کنترل مرکب پایدار.

در ادامه بررسی‌های سازه سه طبقه، مدل ۴ با حالات کنترل غیرفعال با یک مهاربند و میراگر در طبقه اول و کنترل هیبریدی با یک مهاربند و محرک فعال در طبقه سوم و یک مهاربند و میراگر در طبقه اول اتخاذ گردید. در شکل‌های ۶ و ۷ نتایج شبیه‌سازی این مدل ترسیم شده است. در این روش کنترل هیبریدی، دامنه بزرگ پاسخ میراگر و دامنه کوچک پاسخ محرک فعال، در مقایسه با پاسخ‌های متناظر در شکل ۴، نشان داد که دور کردن محرک فعال پایدارساز از بزار کنترل غیرفعال در سیستم کنترل هیبریدی، سبب واگرایی پاسخ و افزایش شدید نیروی میراگر گردید، همچنین در اثر تغییر مکان محرک، نیروی کنترل کننده فعال مقدار بسیار اندک ۴/۸ نیوتن را تجربه کرد که نشان دهنده عدم استفاده از کارایی کنترل کننده فعال حالت مذکور می‌باشد. مقادیر عددی پاسخ‌ها در جدول ۴ درج شده است.

مطابق شکل ۷، سیستم کنترل هیبریدی مربوط به مدل ۴ در کنترل جابجایی طبقه سوم عملکرد مناسبی نشان نداد، چرا که حداکثر دامنه پاسخ طبقه سوم در مقایسه با سازه کنترل نشده، بیشتر شده است. در جدول ۴ جذر میانگین مربعات پاسخ‌های لرزه‌ای مدل‌های سه طبقه درج شده است.

جدول ۴- مقادیر جذر میانگین مربعات پاسخ‌های لرزه‌ای مدل‌های سه طبقه‌ی کنترل شده

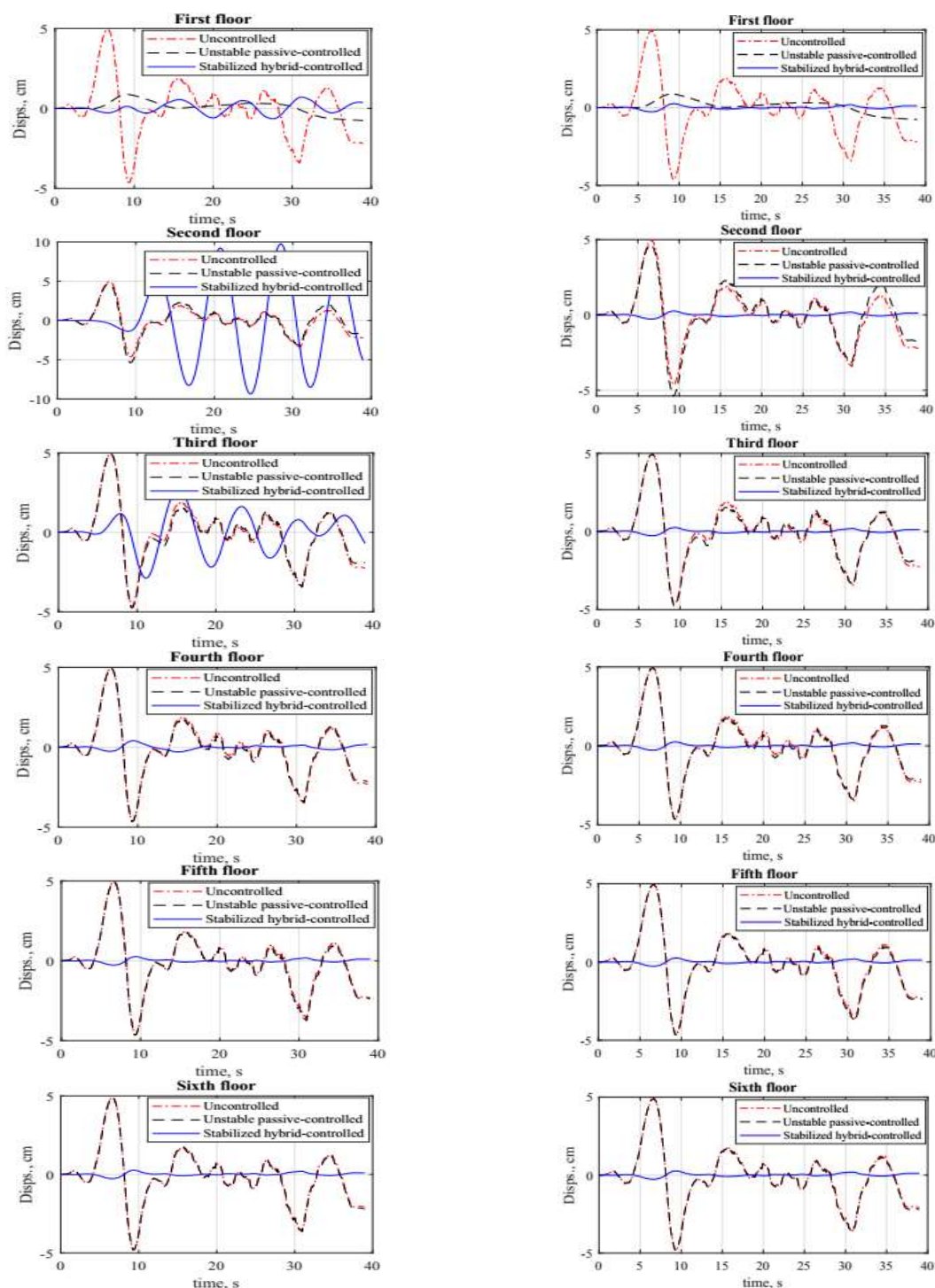
شماره مدل	شماره طبقه	ابزار کنترل	وضعیت پایداری	جابجایی طبقات (سانتیمتر) (جذر میانگین مربعات و درصد تغییر)	جذر میانگین مربعات جابجایی	جذر میانگین مربعات نیروی میراگر (نیوتن)	جذر میانگین مربعات نیروی محرک فعال (نیوتن)
				RMS	مهاربند	میراگر	محرک
				درصد تغییر	(سانتیمتر)	(نیوتن)	(نیوتن)
۲	۱	مهاربند و میراگر	ناپایدار	۰/۳۰۲۴ کاهش	واگرا	۹۵۲۷/۵	-
	۲	-	-	۱/۷۶۷۰ بدون تغییر	-	-	-
	۳	-	-	۱/۷۸۶۲ بدون تغییر	-	-	-
۳	۱	مهاربند، میراگر و محرک فعال	پایدار	۰/۰۹۷۸ کاهش	۰/۱۸۵۷	۸۹	۱۶۵/۵
	۲	-	-	۰/۰۹۷۷ کاهش	-	-	-
	۳	-	-	۰/۰۹۷۵ کاهش	-	-	-
۴	۱	مهاربند و میراگر	پایدار	۰/۳۴۰۸ کاهش	۰/۴۷۲۴	۹۹/۷۵	-
	۲	-	-	۱۲/۴۹۴۷ افزایش	-	-	-
	۳	مهاربند و محرک فعال	-	۲/۵۹۶۷ افزایش	واگرا	-	۴/۸

۴-۲- پاسخ‌های لرزه‌ای مدل‌های شش طبقه

به منظور بررسی بیشتر موضوع، سازه‌های شش طبقه مطابق مدل‌های ۵، ۶، ۷ و ۸ اتخاذ گردید. مشابه مدل‌های سه طبقه، کنترل‌پذیری، پایداری نامی و نیز پایداری سیستم‌های کنترلی مورد ارزیابی قرار گرفت و نتایج حاصل در جدول ۳ درج شد. سپس ضمن تحلیل لرزه‌ای، پاسخ جابجایی طبقات مدل‌های ۵، ۶ و ۷ مطابق شکل ۸ استخراج گردید. بررسی پاسخ جابجایی طبقات در شکل ۸ نشان داد که سیستم کنترل لرزه‌ای غیرفعال ناپایدار، تنها در کاهش جابجایی طبقه اول تاثیر گذاشت، در حالی که در سازه با سیستم کنترل هیبریدی پایدار، جابجایی تمام طبقات سازه کاهش پیدا کرد.

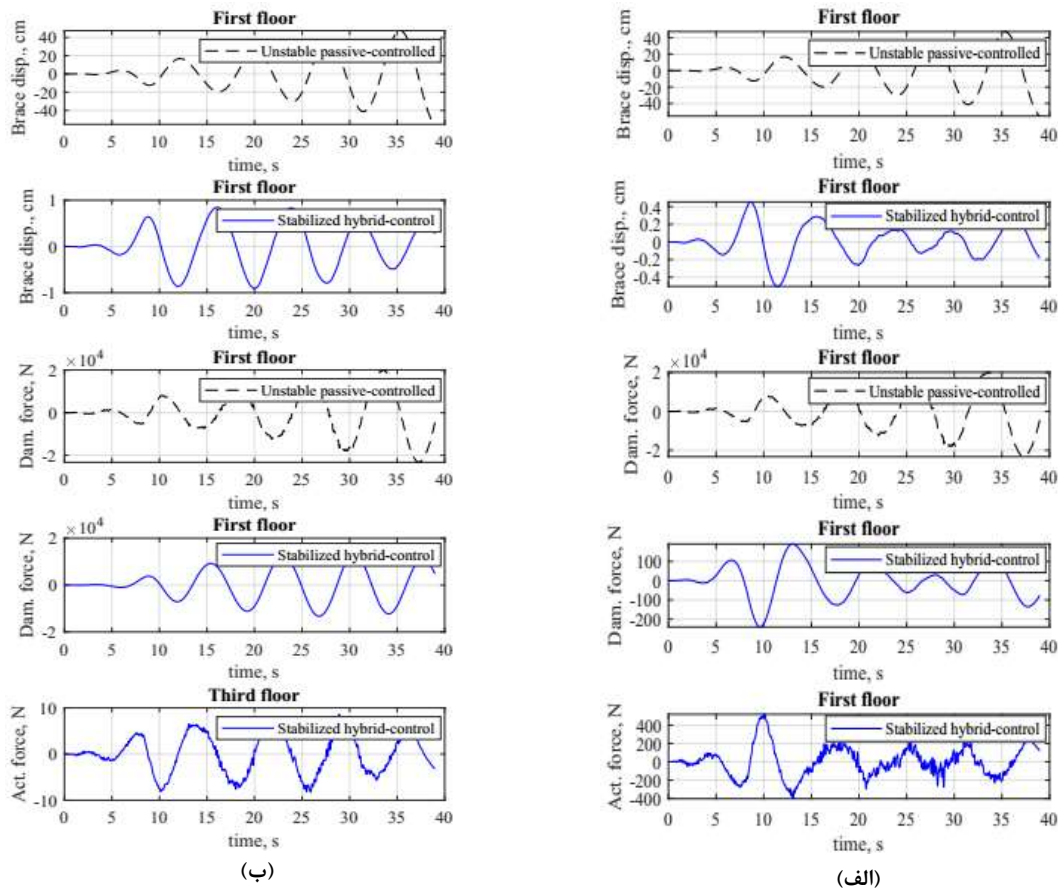
برای نشان دادن اهمیت مکان کنترل کننده فعال، مدل ۸ تعریف گردید که در آن محرک فعال به طبقه سوم انتقال داده شد. تغییر دادن مکان محرک، موجب افزایش جابجایی طبقات دوم و سوم در سازه با سیستم کنترل هیبریدی پایدار گردید و نشان داد که قرار دادن ابزارهای کنترل فعال و غیرفعال در طبقه

یکسان حائز اهمیت است و در کنترل پاسخ‌های لرزه‌ای تاثیر بسزایی دارد. در شکل ۹ پاسخ این مدل ارائه شده است که در آن جابجایی طبقه دوم حتی در مقایسه با سازه کنترل نشده افزایش یافته است. همچنین در شکل ۱۰ پاسخ‌های لرزه‌ای مهاربند، میراگر و محرک فعال مربوط به مدل‌های ۵، ۶، ۷ و ۸ ارائه شده است که در آن تاثیر مکان محرک فعال در تغییر تاریخچه زمانی پاسخ‌های مهاربند، میراگر و محرک فعال مشهود است. مطابق شکل ۱۰-الف، نصب همزمان میراگر و محرک فعال در سیستم کنترل هیبریدی در یک طبقه، پاسخ‌های لرزه‌ای مهاربند، میراگر و محرک فعال را همگرا نموده و کاهش داد، اما به توجه به شکل ۱۰-ب، دور بودن محرک فعال از میراگر، سبب افزایش نیروی میراگر شده و کاهش اندرکنش محرک فعال مشاهده شد. در جدول ۵ مقادیر عددی پاسخ‌های لرزه‌ای مدل‌های شش طبقه درج شده است که می‌توان پاسخ‌های لرزه‌ای مدل‌های مذکور را با هم‌دیگر مقایسه کرد. در ادامه اشکال ۹ و ۱۰ و جدول ۵ ملاحظه می‌گردد.



شکل ۸- جابجایی طبقات مدل های ۵، ۶ و ۷ (۶ طبقه) در حالات کنترل نشده، کنترل غیر فعال ناپایدار و کنترل مرکب پایدار.

شکل ۹- جابجایی طبقات مدل ۸ (۶ طبقه) در حالات کنترل نشده، کنترل غیر فعال ناپایدار و کنترل مرکب پایدار.



شکل ۱۰- جابجایی مهاربند، پاسخ میراگر و پاسخ کنترل کننده فعال در مدل های ۵، ۶، ۷ و ۸ (۶ طبقه الف) حالت کنترل با میراگر، مهاربند و محرک فعال در طبقه اول. ب) حالت کنترل با میراگر و مهاربند در طبقه اول و محرک فعال در طبقه سوم.

جدول ۵- مقادیر جذر میانگین مربعات پاسخ های لرزه ای مدل های شش طبقه ی کنترل شده

شماره مدل	شماره طبقه	ابزار کنترل	وضعیت پایداری	جابجایی طبقات (سانتیمتر) (جذر میانگین مربعات و درصد تغییر) RMS	جذر میانگین مربعات جابجایی مهاربند (سانتیمتر)	جذر میانگین مربعات نیروی میراگر (نیوتن)	جذر میانگین مربعات نیروی محرک فعال (نیوتن)
۶	۱	مهاربند و میراگر	ناپایدار	۰/۴۰۷۸ کاهش ۷۷	۹۶۰۰/۸۸	-	-
	۳	-	-	۱/۷۴۲۳ کاهش ۱	-	-	-
	۶	-	-	۱/۷۸۴۷ افزایش ۱	-	-	-
۷	۱	مهاربند، میراگر و محرک فعال	پایدار	۰/۰۹۶۵ کاهش ۹۴	۸۷/۹	۱۶۱/۷۵	-
	۳	-	-	۰/۰۹۶۷ کاهش ۹۵	-	-	-
	۶	-	-	۰/۰۹۷۴ کاهش ۹۵	-	-	-
۸	۱	مهاربند و میراگر	پایدار	۰/۳۳۰۹ کاهش ۸۱	۰/۴۷۸۵	۱۰۴/۴	-
	۳	مهاربند و محرک فعال	-	۱/۲۱۳۹ کاهش ۳۱	واگرا	۶/۲	-
	۶	-	-	۰/۰۹۶۷ کاهش ۹۵	-	-	-

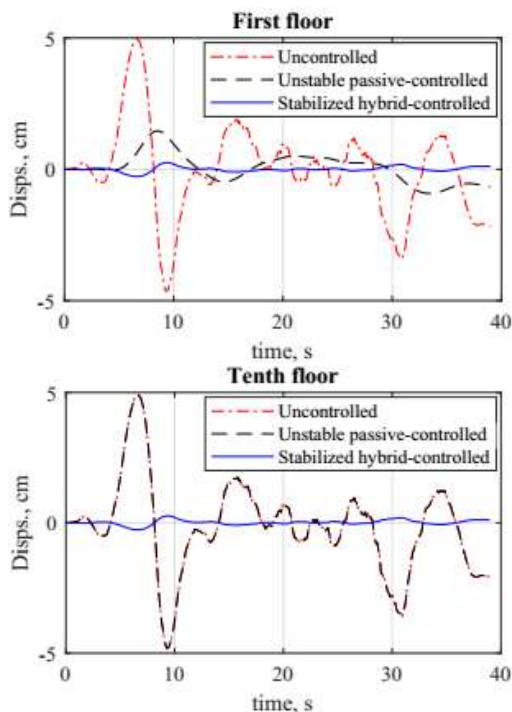
۳-۴- پاسخ‌های لرزه‌ای مدل‌های ده طبقه

مطابق مدل‌های ۹، ۱۰، ۱۱ و ۱۲ بررسی تأثیر سیستم کنترلی غیرفعال پایدار و مقایسه آن با سیستم کنترل غیرفعال ناپایدار و هیبریدی پایدار، در سازه ده طبقه انجام گردید که پاسخ‌های لرزه‌ای حاصل در اشکال ۱۱، ۱۲ و ۱۳ ارائه شده است. ابتدا کنترل-پذیری و پایداری نامی سازه کنترل نشده مورد ارزیابی قرار گرفت که نتایج آن در جدول ۳ مشهود است. سپس مدل‌های ۱۰ و ۱۱ به ترتیب دارای سیستم کنترلی غیرفعال ناپایدار و هیبریدی پایدار، با تجهیز سازه به میراگر و مهاربند و محرک فعال در طبقه اول تعریف گردید.

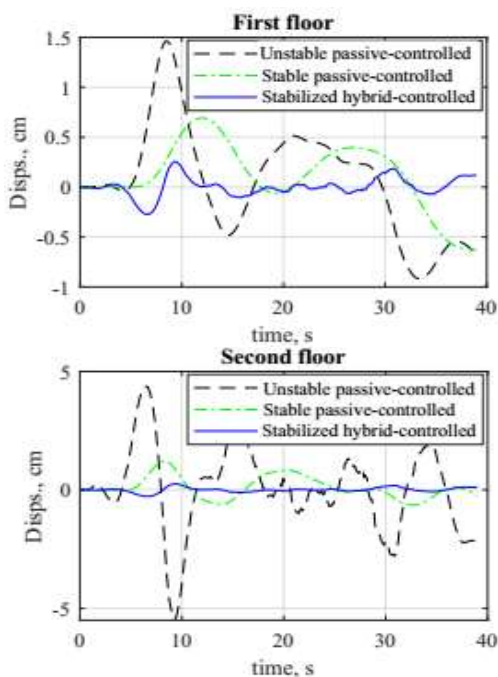
در مدل ۱۱، پاسخ جابجایی طبقات اول و دهم سازه، مطابق شکل ۱۱ و جدول ۶، در حالت کنترل هیبریدی پایدار، به ترتیب ۹۲ و ۹۴/۳ درصد کاهش یافت. با تغییر دادن مکان و تعداد مهاربندها و میراگرها به شرح مدل ۱۲، سیستم کنترلی سازه مورد ارزیابی قرار گرفت که در آن مقادیر ویژه ماتریس سیستم با سه مهاربند در طبقات ۵، ۶ و ۷ و دو میراگر در طبقات ۵ و ۷ بررسی گردید. نتایج نشان داد که قسمت حقیقی مقادیر ویژه ماتریس سازه با سیستم کنترلی غیرفعال همگی منفی شد، بنابراین سیستم کنترلی غیرفعال با نصب یک مهاربند در طبقه ۶ پایداری خود را بدست آورد که خروجی این سیستم با نتایج سازه با سیستم کنترل هیبریدی پایدار مربوط به مدل ۱۱ در جدول ۶ قابل مقایسه می‌باشد.

در شکل‌های ۱۲ و ۱۳، پاسخ طبقات سازه با سیستم کنترلی غیرفعال ناپایدار (مدل ۱۰) و سیستم کنترل غیرفعال پایدار (مدل ۱۲) و نیز سیستم کنترل هیبریدی پایدار (مدل ۱۱) نشان داده شده است که در آن عدم کفایت سیستم کنترل غیرفعال پایدار در کاهش پاسخ تمامی طبقات منتخب مشهود است.

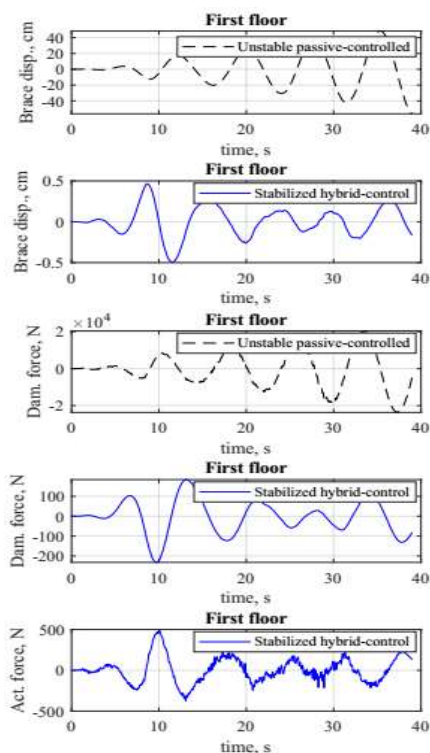
در شکل ۱۴-الف، پاسخ‌های لرزه‌ای مهاربندها، میراگرها و محرک فعال مدل‌های ۱۰، ۱۱ و ۱۲ ارائه شده است که در آن در سازه با سیستم کنترلی غیرفعال ناپایدار، واگرایی مهاربند و نیروی میراگر طبقه اول نمایان است. شکل ۱۴-ب نیز پاسخ‌های سازه با سیستم کنترلی غیرفعال پایدار را نشان داده است که در آن جابجایی مهاربندها و نیروی میراگرها همگرا شده و کاهش یافته اند. در شکل ۱۴ نمودارهای تاریخچه زمانی پاسخ‌های لرزه‌ای مدل‌های ده طبقه و در جدول ۶ مقادیر عددی پاسخ‌ها نشان داده شده است.



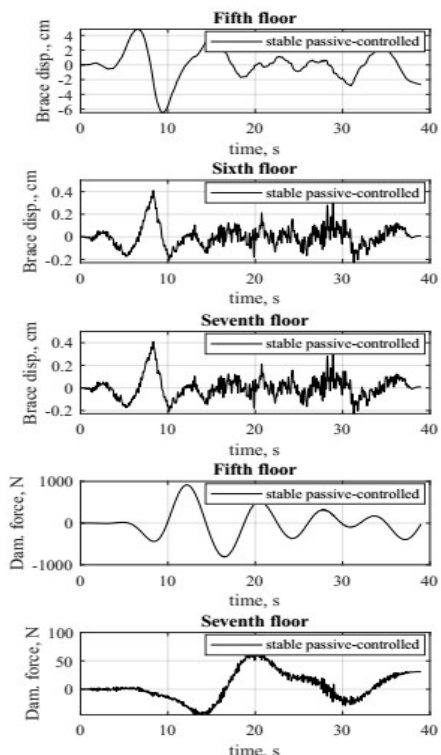
شکل ۱۱: جابجایی طبقات اول و دهم مدل‌های ۹، ۱۰ و ۱۱ (طبقه) در حالات کنترل نشده، کنترل غیر فعال ناپایدار و کنترل مرکب پایدار.



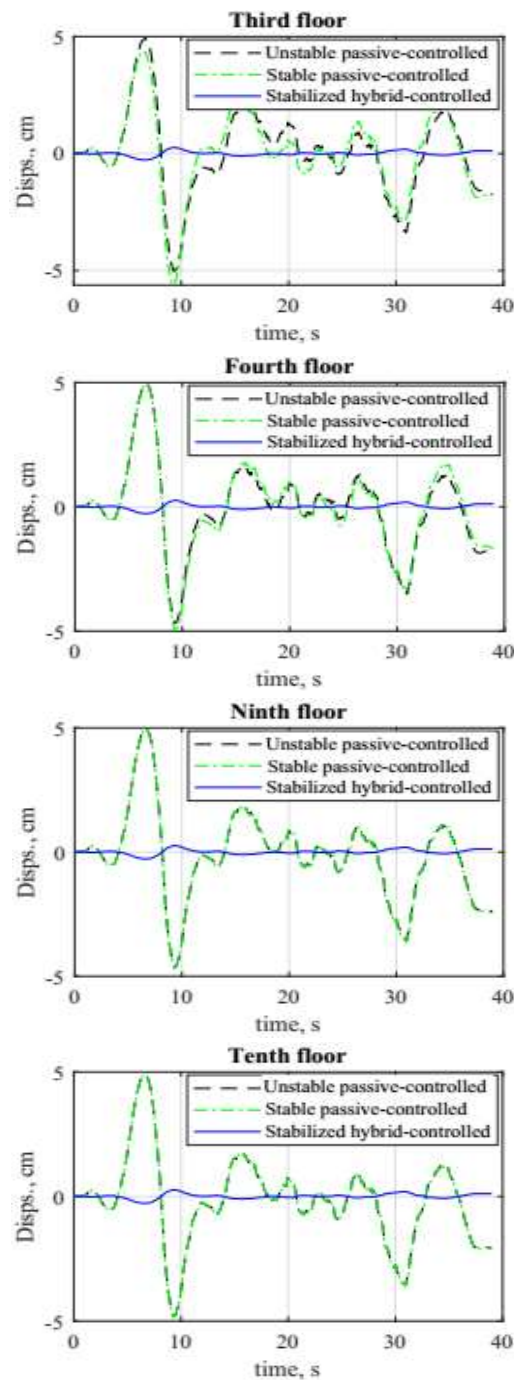
شکل ۱۲- جابجایی طبقات اول و دوم مدل‌های ۱۰، ۱۱ و ۱۲ (طبقه) در حالات کنترل نشده، کنترل غیر فعال پایدار و کنترل غیر فعال ناپایدار.



(الف)



(ب)



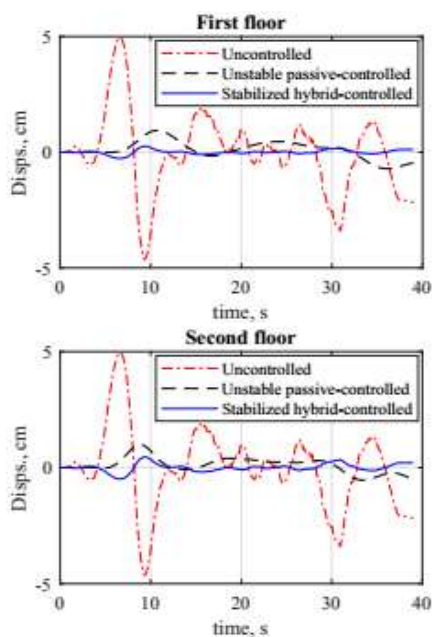
شکل ۱۳- جابجایی طبقات سوم، چهارم، نهم و دهم مدل‌های ۱۰، ۱۱ و ۱۲ (۱۰ طبقه) در حالات کنترل نشده، کنترل غیر فعال پایدار و کنترل غیر فعال پایدار.

شکل ۱۴- جابجایی مهاربند، پاسخ میراگر و محرک فعال مدل‌های ۱۰، ۱۱ و ۱۲ (۱۰ طبقه). الف) حالت کنترل غیر فعال پایدار (مدل ۱۰) و کنترل مرکب پایدار (مدل ۱۱). ب) حالت کنترل غیر فعال پایدار (مدل ۱۲).

جدول ۶- مقادیر جذر میانگین مربعات پاسخ‌های لرزه‌ای مدل‌های ده طبقه‌ی کنترل شده

شماره مدل	شماره طبقه	ابزار کنترل	وضعیت پایداری	جابجایی طبقات (سانتیمتر) (جذر میانگین مربعات و درصد تغییر)	جذر میانگین مربعات جابجایی مهاربند (سانتیمتر)	جذر میانگین مربعات نیروی میراگر (نیوتن)	جذر میانگین مربعات نیروی محرک فعال	
				RMS				
				درصد تغییر				
۱۰	۱	مهاربند و میراگر	ناپایدار	۶۵ کاهش	۱۰۷۶۴/۵	-	-	
	۲	-	-	۱ کاهش	-	-	-	
	۵	-	-	۱ کاهش	-	-	-	
	۶	-	-	۱ کاهش	-	-	-	
	۷	-	-	۰/۵ کاهش	-	-	-	
	۱۰	-	-	۰/۵ کاهش	-	-	-	
	۱۱	۱	مهاربند، میراگر و محرک فعال	پایدار	۹۲ کاهش	۰/۲۳۴۷	۲۲۶/۴	۱۰۲/۸
۱۱	۲	-	-	۹۴ کاهش	-	-	-	
	۵	-	-	۹۵ کاهش	-	-	-	
	۶	-	-	۹۵ کاهش	-	-	-	
	۷	-	-	۹۴/۵ کاهش	-	-	-	
	۱۰	-	-	۹۴/۳ کاهش	-	-	-	
	۱۲	۱	-	پایدار	۵۹ کاهش	-	-	-
		۲	-	-	۷۸ کاهش	-	-	-
۵		مهاربند و میراگر	-	۱۳ کاهش	۲/۳۵۱۲	-	۲۸۰/۶	
۶		مهاربند	-	۱۰ کاهش	۰/۱۶۵۲	-	-	
۷		مهاربند و میراگر	-	۶ کاهش	۰/۱۶۱۱	-	۴۶/۲	
۱۰		-	-	۰/۵ کاهش	-	-	-	
					۱/۷۵۱۰			

مهاربند در طبقه اول و شباهت پاسخ سایر مهاربندها به پاسخ سازه کنترل نشده در مدل با سیستم کنترل غیرفعال ناپایدار را نشان داده است.

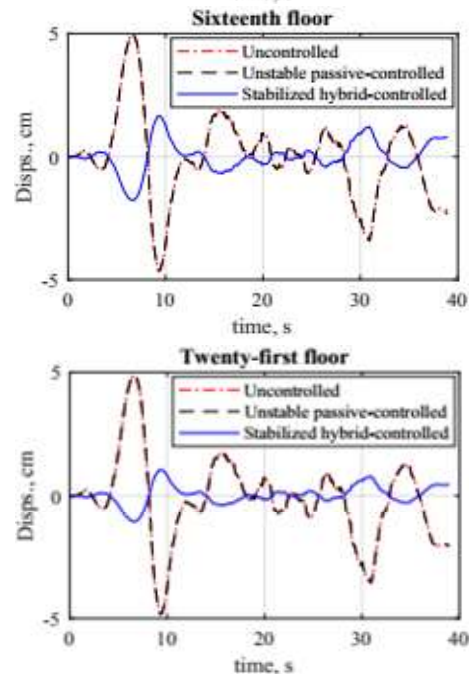
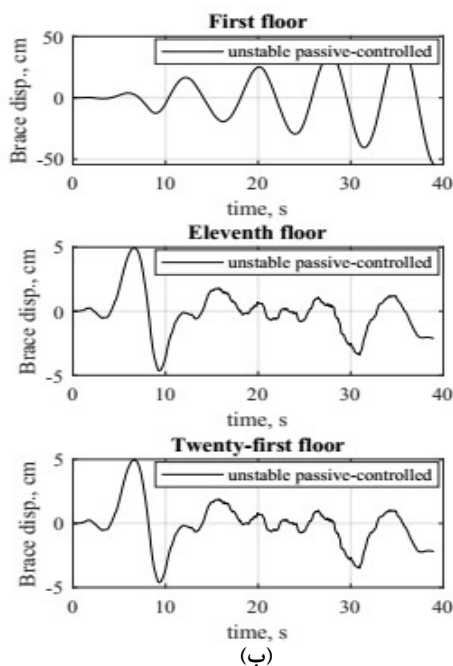
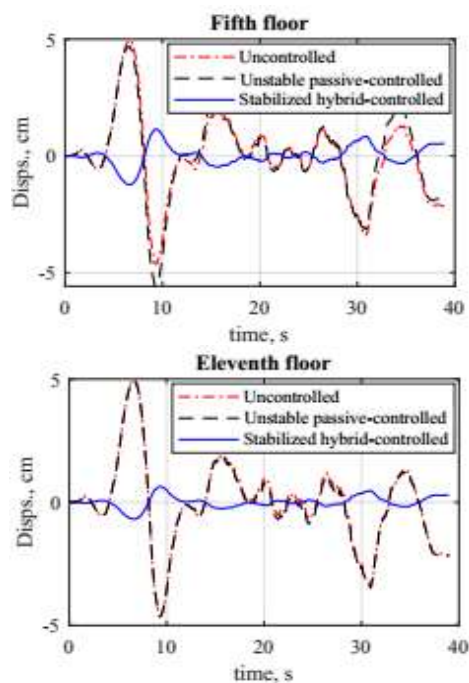
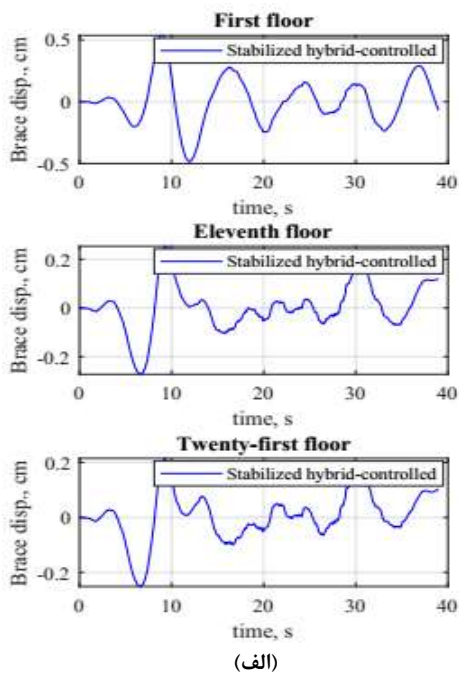


شکل ۱۵- جابجایی طبقات کنترل شده مدل‌های ۱۳، ۱۴ و ۱۵ (۲۱ طبقه) در حالات کنترل نشده، کنترل غیرفعال ناپایدار و کنترل مرکب پایدار.

۴-۴- پاسخ‌های لرزه‌ای مدل‌های بیست و یک طبقه

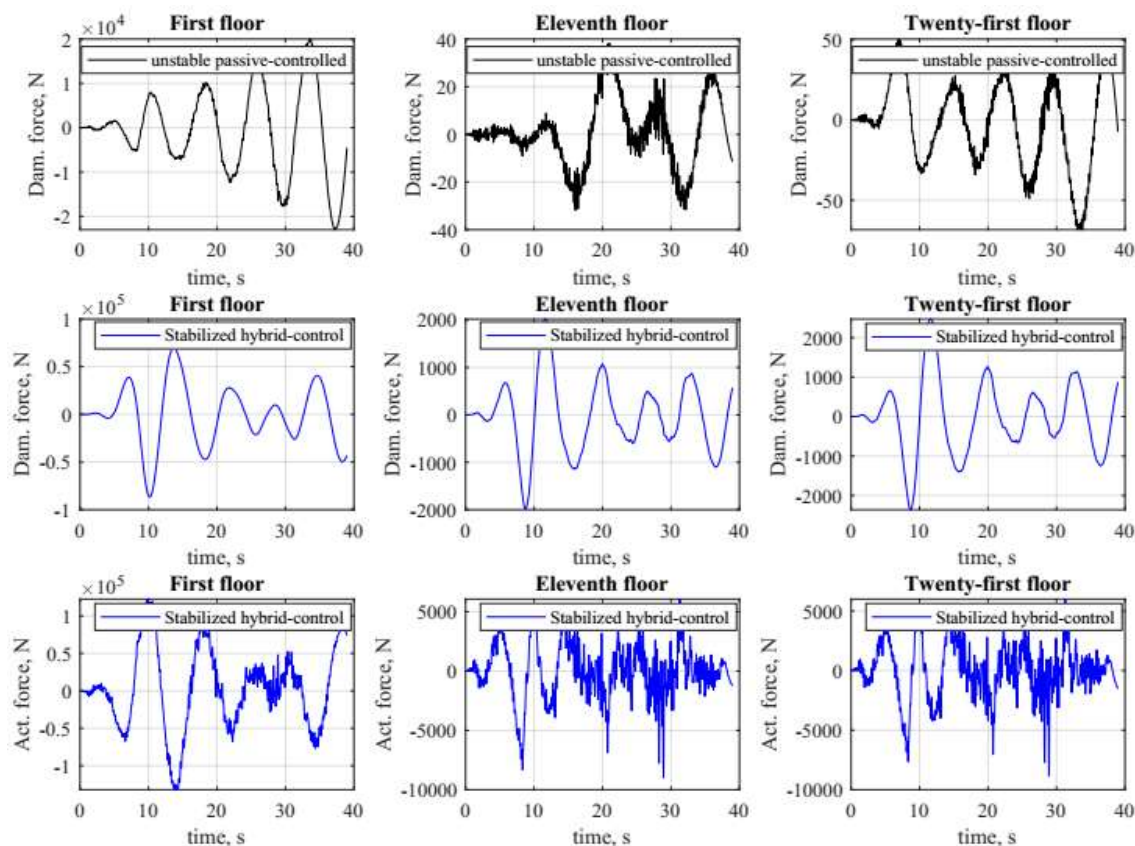
برای تکمیل بحث، یک سازه ۲۱ طبقه مطابق مدل‌های ۱۳، ۱۴ و ۱۵ اتخاذ گردید و در آن از مهاربند و میراگر و محرک فعال به طور همزمان در طبقات ۱، ۱۱ و ۲۱ جهت کنترل پاسخ‌های لرزه‌ای استفاده شد. ابتدا کنترل‌پذیری و پایداری نامی سازه کنترل نشده مورد ارزیابی قرار گرفت، سپس مقادیر ویژه ماتریس سازه با سیستم کنترلی غیر فعال (مدل ۱۴) استخراج گردید و در آن ناپایداری سیستم کنترلی غیرفعال مشاهده شد. جهت پایدارسازی سیستم کنترلی از سه محرک فعال در طبقات دارای میراگر و مهاربند استفاده شد و سیستم کنترل هیبریدی پایدار حاصل گشت.

در شکل‌های ۱۵ و ۱۶ پاسخ طبقات ۱، ۲، ۵، ۱۱، ۱۶ و ۲۱ ارائه شده که در آن تأثیر سیستم کنترل هیبریدی پایدار در کاهش پاسخ لرزه‌ای طبقات مشهود است. شکل ۱۷ نیز پاسخ مهاربندهای طبقات ۱، ۱۱ و ۲۱ را در حالات کنترل غیرفعال ناپایدار و کنترل هیبریدی پایدار نشان می‌دهد که در آن مطابق شکل ۱۷-الف پاسخ مهاربندها در سازه با سیستم کنترل هیبریدی پایدار به طور چشمگیر کاهش یافته است. شکل ۱۷-ب نیز واگرایی پاسخ



شکل ۱۷- جابجایی مهاربندهای مدل‌های ۱۳، ۱۴ و ۱۵ (۲۱) (طبقه). الف) حالت کنترل مرکب پایدار. ب) حالت کنترل غیر فعال ناپایدار.

شکل ۱۶- جابجایی طبقات کنترل شده‌ی پنجم، یازدهم، شانزدهم و بیست و یکم مدل‌های ۱۳، ۱۴ و ۱۵ (۲۱) (طبقه). در حالات کنترل نشده، کنترل غیر فعال ناپایدار و کنترل مرکب پایدار.



شکل ۱۸- پاسخ میراگرها و محرک‌های فعال مدل‌های ۱۴ و ۱۵ (۲۱ طبقه) در حالات کنترل غیر فعال ناپایدار و مرکب پایدار.

جدول ۷- مقادیر جذر میانگین مربعات پاسخ‌های لرزه‌ای مدل‌های بیست و یک طبقه‌ی کنترل شده

شماره مدل	شماره طبقه	ابزار کنترل	وضعیت پایداری	جایجایی طبقات (سانتیمتر) (جذر میانگین مربعات و درصد تغییر)		مهرابند (سانتیمتر)	مربعات نیروی میراگر (نیوتن)	مربعات نیروی محرک فعال (نیوتن)
				RMS	درصد تغییر			
۱۴	۱	مهرابند و میراگر	ناپایدار	۰/۶۰۵۱	۶۴ کاهش	واگرا	۱۱۵۳۱/۲	-
	۲	-	-	۰/۶۸۴۱	۶۱ کاهش	-	-	-
	۵	-	-	۱/۷۳۱۱	۱/۳ کاهش	-	-	-
	۱۱	مهرابند و میراگر	-	۱/۷۴۳۳	۱ کاهش	۱/۸۱۵۸	۱۶/۴	-
	۱۶	-	-	۱/۷۵۰۹	۰/۴ کاهش	-	-	-
	۲۱	مهرابند و میراگر	-	۱/۷۵۸۱	۰/۵ کاهش	۱/۷۹۲۳	۲۲/۳	-
۱۵	۱	مهرابند، میراگر و محرک فعال	پایدار	۰/۰۹۶۵	۹۴ کاهش	۰/۲۶۴۷	۲۸۳۵۰/۷	۴۴۳۲۶/۸
	۲	-	-	۰/۰۹۷۳	۹۵ کاهش	-	-	-
	۵	-	-	۰/۳۸۴۴	۷۸ کاهش	-	-	-
	۱۱	مهرابند، میراگر و محرک فعال	-	۰/۲۳۵۶	۸۶/۵ کاهش	۰/۱۴۵۳	۶۷۵/۳	۲۶۸۰/۷
	۱۶	-	-	۰/۴۹۳۲	۷۲ کاهش	-	-	-
	۲۱	مهرابند، میراگر و محرک فعال	-	۰/۳۶۲۱	۷۹/۲ کاهش	۰/۱۴۲۸	۷۴۲/۲	۲۱۳۵/۶

شدند. در ادامه در جدول ۷ مقادیر عددی پاسخ‌های لرزه‌ای مدل‌های ۲۱ طبقه ارائه شده است که مقایسه‌ی پاسخ‌ها نشان می‌دهد سیستم کنترل هیبریدی پایدار (مدل ۱۵) در مقایسه با سیستم کنترل غیرفعال ناپایدار (مدل ۱۴) در کاهش پاسخ‌های لرزه‌ای طبقات سازه تأثیر بسزایی داشته است.

در پایان شایان ذکر است با توجه به تأثیر پایداری و ناپایداری سیستم کنترلی در پاسخ‌های لرزه‌ای سازه، با شناسایی متغیرهای هندسی و مکانیکی سایر روش‌های کنترل غیرفعال، نیمه‌فعال، فعال و ترکیبی، ارزیابی پایداری سایر سیستم‌های کنترلی امکان‌پذیر می‌باشد؛ بنابراین توسعه پژوهش مشابه پیشنهاد می‌گردد.

۱ - تعداد و موقعیت ابزارهای کنترل، رفتار دینامیکی سیستم ثانویه حاصل از ترکیب مدل اولیه سازه با ابزارهای کنترلی را تغییر داد، بنابراین پایداری و ناپایداری هر سازه با سیستم کنترلی مد نظر به عنوان سیستم دینامیکی ثانویه باید مجزا انجام شود.

۲ - پایداری سیستم کنترلی موجب عملکرد مناسب ابزارهای جذب و استهلاک انرژی گردید و در نهایت پاسخ‌های لرزه‌ای به شدت کاهش یافت، لذا سیستم کنترلی در هر سازه باید پایدار باشد.

۳ - با توجه به اینکه استفاده از سیستم‌های کنترلی ناپایدار منجر به ازدیاد شدید پاسخ‌های لرزه‌ای در برخی طبقات گردید، بنابراین در حالت کلی باید از بکارگیری سیستم‌های کنترلی ناپایدار اجتناب نمود.

۴ - در سازه‌های با سیستم کنترل غیرفعال، موقعیت مهاربندها و ابزارهای جذب و استهلاک انرژی بر پایداری سیستم کنترلی غیرفعال مؤثر واقع گردید، بر این اساس موقعیت آنها در ارتفاع سازه باید طوری باشد که پایداری سیستم کنترلی تضمین گردد.

۵ - دور کردن محرک فعال از ابزار کنترل غیرفعال موجب افزایش نیروی میراگر و جابجایی برخی طبقات شد، بنابراین بهتر است محرک و میراگر به طور همزمان در طبقه یکسان نصب شوند.

تاریخچه زمانی پاسخ میراگرها و محرک‌های فعال مدل‌های ۱۴ و ۱۵ در شکل ۱۸ نمایش داده شده است. بررسی رفتار میراگرها نشان داد که نیروی میراگرهای طبقات ۱۱ و ۲۱ در سازه با سیستم کنترلی غیرفعال ناپایدار در مقایسه با نیروی میراگر طبقه اول کاهش یافت که دلیل آن عدم تأثیر میراگر در کاهش پاسخ‌های لرزه‌ای بود. پاسخ میراگر و محرک فعال سازه با سیستم کنترل هیبریدی در سطر دوم و سوم شکل ۱۸ نمایان شده است که در آن مقادیر نیروهای میراگر و محرک فعال در طبقات قابل توجه بوده و نشان دادند که در سیستم کنترل هیبریدی، ابزارهای کنترل غیرفعال و فعال در کاهش پاسخ‌های لرزه‌ای مؤثر واقع

۵- نتیجه گیری

در فرآیند کنترل لرزه‌ای سازه، پیکربندی اولیه یا اصلی قبل از اعمال روش‌های کنترل باید به گونه‌ای باشد که عملکرد روش‌های کنترل لرزه‌ای غیرفعال، نیمه‌فعال و فعال به طور شایسته مفید و مؤثر واقع گردد. با توجه به اینکه پیکربندی یک سازه از پارامترهایی از قبیل جرم، سختی و میرایی اعضای سازه‌ای و ابزارهای کنترلی تأثیر می‌پذیرد، ضرورت کفایت سیستم دینامیکی سازه اولیه قبل از اعمال روش‌های کنترل لرزه‌ای از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. بنابراین بیان مفهوم و معیار کنترل‌پذیری و تشکیل ماتریس متناظر مدل نامی و اثبات کنترل‌پذیری آن از نخستین اقدامات در مسائل کنترل لرزه‌ای می‌تواند به شمار رود. از آنجا که تعداد و موقعیت ابزارهای کنترل بر رفتار سیستم دینامیکی حاصل تأثیر می‌گذارد، اطمینان از عملکرد مفید و مؤثر سیستم کنترلی منتخب ضرورت دارد. عملکرد سیستم کنترلی منتخب با توجه به بررسی مفهوم پایداری قابل توصیف می‌باشد که در این پژوهش توجه به سیستم دینامیکی ثانویه حاصل از ترکیب سازه اولیه و ابزارهای کنترل لرزه‌ای، مدل‌هایی با سیستم کنترلی پایدار و ناپایدار مورد بررسی قرار گرفت که اهم نتایج حاصل به شرح زیر ارائه می‌گردد:

مراجع

- Chacko, Sanjay Joseph, and Rajesh Joseph Abraham. "On LQR controller design for an inverted pendulum stabilization." *International Journal of Dynamics and Control* 11.4 (2023): 1584-1592.
- Cheng, Franklin Y., Hongping Jiang, and Kangyu Lou. *Smart structures: innovative systems for seismic response control*. CRC press, 2008.
- Cetin, Huseyin, Ersin Aydin, and Baki Ozturk. "Optimal design and distribution of viscous dampers for shear building structures under seismic excitations." *Frontiers in Built Environment* 5 (2019): 90.
- El Ouni, Mohamed Hechmi, et al. "Review of vibration control strategies of high-rise buildings." *Sensors* 22.21 (2022): 8581.
- Ajay, Lingala, and M. Anil Kumar. "Torsional Vibration Control of a Structure using Fluid Viscous Dampers." *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Vol. 1197. No. 1. IOP Publishing, 2021.
- Babaei, Mehdi, and Mostafa Moradi. "Multi-objective Optimization of Steel Frames with Added Viscous Dampers using Imperialist Competitive Algorithm." *Computational Engineering and Physical Modeling* 5.۱ (۲۰۲۲): ۶۹-۸۸.
- Center, P. E. E. R. "Peer ground motion database. Pacific Earthquake Engineering Research Center." University of California, Berkeley, CA, <http://ngawest2.berkeley.edu> (2013).

- control strategies." *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi* 2.1 (2012): 27-36.
- Kurata, Narito, and Takuji Kobori. "Reliability of applied semiactive structural control system." *Journal of Structural Engineering* 129.7 (2003): 914-921.
- López-Queija, Javier, et al. "Review of control technologies for floating offshore wind turbines." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 167 (2022): 112787.
- Modiri, Farzaneh, and Ehsan Darvishan. "Active Structural Control by Backstepping Design Considering Soil-structure Interaction Effects." *Journal of Rehabilitation in Civil Engineering* 10.4 (2022): 97-108.
- Pourzeynali, S., H. H. Lavasani, and A. H. Modarayi. "Active control of high rise building structures using fuzzy logic and genetic algorithms." *Engineering Structures* 29.3 (2007): 346-357.
- Saaed, Tarek Edrees, et al. "A state-of-the-art review of structural control systems." *Journal of Vibration and Control* 21.5 (2015): 919-937.
- Velagić, Jasmin, et al. "Design of LQR controller for 3D trajectory tracking of octocopter unmanned aerial vehicle." 2022 8th International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT). Vol. 1. IEEE, 2022.
- Xu, You-Lin, and Jia He. *Smart civil structures*. CRC Press, 2017.
- Xu, Zhao-Dong, et al. *Intelligent vibration control in civil engineering structures*. Academic Press, 2016.
- Zhang, Zhenkai, and Yongbo Peng. "Reliability based optimization for semi-actively controlled seismic structures." (2019).
- Garrido, Hernán, Oscar Curadelli, and Daniel Ambrosini. "On the assumed inherent stability of semi-active control systems." *Engineering Structures* 159 (2018): 286-298.
- Ghaffarzadeh, H., E. Alizadeh Dehrod, and H. Aghayi Par. "Semi-active fuzzy control of structures subjected to near-fault ground motions having forward directivity and fling step using friction damping system with amplifying braces (fdsab)." *Iranian Journal of Science and Technology. Transactions of Civil Engineering* 39.C2 (2015): 299.
- Gu, Hongyan, et al. "Research on vibration mechanism and control technology of building structure under earthquake action." *Journal of Vibroengineering* 23.6 (2021): 1395-1406.
- Hazaveh, Nikoo K., et al. "Seismic behavior of a self-centering system with 2-4 viscous damper." *Journal of Earthquake Engineering* 24.3 (2020): 470-484.
- Hazaveh, Nikoo, et al. "Seismic behaviour of a non-linear structure with passive D3 viscous damper." (2021).
- He, Wenfu, et al. "Experimental research on the seismic characteristics of a precast frame structure with a viscous damper." *Journal of Earthquake Engineering* 27.4 (2023): 959-980.
- Jian, Longji, Feifei Song, and Yuansong Huang. "Research on semiactive control of civil engineering structure based on neural network." *Wireless Communications and Mobile Computing* 2020 (2020): 1-9.
- KINAY, Gökçe, and Gürsoy Turan. "A hybrid control of seismic response by passive and semi-active