

کنترل سازه با استفاده از روش مود لغزشی با کنترل بنگ- بنگ تحت اثر زلزله

حسین غفارزاده^{*}، امیرحسین غفاری^۱، مجتبی عیدی^۲

^۱ دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

^۲ دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

دریافت: ۱۴۰۱/۳/۶، بازنگری: ۱۴۰۱/۶/۹، پذیرش: ۱۴۰۱/۶/۲۰، نشر آنلاین: ۱۴۰۱/۶/۲۰

چکیده

در این مقاله، به ارائه یک روش کنترلی جدید مبتنی بر ترکیب الگوریتم مود لغزشی و الگوریتم بنگ- بنگ (Bang-Bang) پرداخته شده است. الگوریتم مود لغزشی متداول در برخی موارد داری عملکرد مناسبی نمی‌باشد، به همین سبب، از ترکیب این الگوریتم با کنترل بنگ- بنگ به عنوان یک الگوریتم بهینه‌یاب بهره گرفته شده است. همچنین با توجه به استفاده از ابزار کنترل فعال در سازه مورد استفاده، علاوه بر الگوریتم مورد اشاره، با تعیین حدودی به اصلاح روند الگوریتم کنترلی و کاهش هرچه بیشتر پاسخ‌های سازه بر مبنای شاخص‌های انتخابی پرداخته شده است. این حدود علاوه بر تأثیر بر کاهش پاسخ‌ها، منجر به عدم فعال بودن سیستم کنترلی در همه زمان‌ها شده است، که به اقتصادی‌تر شدن طرح کمک شایانی می‌کند. لازم به ذکر است، به منظور دستیابی به مقادیر پاسخ‌های حداقلی سازه، با تغییر محل قرارگیری سیستم کنترلی در طبقات مختلف محل بهینه به دست آمده است. بدین منظور یک سازه برشی تحت تحریک زلزله نزدیک گسل مورد استفاده قرار گرفته است. نتایج اعمال الگوریتم ارائه شده در سازه، نشان از عملکرد مناسب این الگوریتم و کاهش مقادیر حداکثر پاسخ‌ها بوده است.

کلیدواژه‌ها: سازه برشی، کنترل مود لغزشی، الگوریتم بنگ بنگ، کنترل فعال.

۱- مقدمه

Quiñero و همکاران، ۲۰۱۴؛ Chu و همکاران، ۲۰۱۷)، الگوریتم کنترل مود لغزشی (Zribi و Almutairi، ۲۰۰۹؛ Mobayan و Baeanu، ۲۰۱۷) و دیگر روش‌های کنترلی اشاره کرد. به‌طور خاص در این مقاله مود لغزشی مورد استفاده قرار گرفته است. روش مود لغزشی از جمله روش‌ها و الگوریتم‌های مناسب برای کنترل سازه است، که با توجه به عملکرد مناسب در برابر نیروهای وارده، در تحقیقات گسترده‌ای مورد استفاده قرار گرفته است. این کنترل‌کننده در برابر اغتشاشات و تغییر پارامترها و همچنین نویزهای مزاحم کاملاً مقاوم می‌باشد. همچنین از دلایل کارایی این روش، می‌توان به سادگی طراحی و پیاده‌سازی آن در عمل اشاره کرد. علاوه بر موارد فوق‌الذکر، تحقیقات گسترده‌ای در این زمینه صورت گرفته است، که به برخی از آن‌ها در ادامه اشاره می‌شود.

در پژوهشی (Lee و همکاران، ۲۰۰۵) مود لغزشی اصلاح شده ارائه شد که باعث افزایش عملکرد الگوریتم کنترل مود لغزشی (SMC) گردید. با توجه به این که سیستم کنترلی مود لغزشی در مقابل نیروهایی که بیشتر از ظرفیت طراحی محرک، بر آن وارد

زلزله از جمله پدیده‌های مخرب طبیعی است که موجب آسیب‌های بسیاری در سازه‌های مختلف می‌گردد. به‌منظور کنترل و کاهش پاسخ‌های سازه‌ها، روش‌های کنترل مختلف و ابزارهای متفاوتی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در سالیان اخیر، فناوری کنترل فعال، مورد توجه بسیاری از طراحان و محققین قرار گرفته است. این تلاش‌های گسترده جلوه‌های متعددی از این ایده را به همراه داشته است که منجر به چندین استراتژی فعال‌سازی متمایز و طراحی کنترل‌کننده شده است (Chang و Spencer، ۲۰۱۰؛ Du و همکاران، ۲۰۰۸؛ Rashidi و همکاران، ۲۰۲۱). بدین سبب، در این مقاله از کنترل فعال بهره گرفته خواهد شد. همچنین تئوری‌های متعدد کنترلی با توجه به پژوهش‌های مختلف صورت گرفته در سالیان متوالی، ارائه شده است، به‌عنوان مثال می‌توان به الگوریتم کنترل H_2 (Wani و همکاران، ۲۰۲۱؛ Guo، ۲۰۱۶) الگوریتم کنترل H_∞ (Yin و همکاران، ۲۰۱۸؛ Li و همکاران، ۲۰۱۹)، تنظیم‌کننده درجه دوم خطی (LQR) (Palacios-

* نویسنده مسئول؛ شماره تماس: ۰۴۱-۳۳۳۹۲۵۱۵

۲- معادلات حرکت

با توجه به بهره‌گیری از سیستم کنترل فعال و سازه برشی، در این قسمت به بررسی معادلات حرکت مرتبط پرداخته خواهد شد. بدین طریق، معادله حرکت سازه‌ای با n درجه آزادی به صورت زیر بیان می‌گردد:

$$[M]\{\ddot{X}(t)\} + [C]\{\dot{X}(t)\} + [K]\{X(t)\} = [\gamma]\{U(t)\} + \{\delta\}\ddot{X}_g(t) \quad (1)$$

در معادله فوق‌الذکر، M ، C ، K به ترتیب نمایانگر ماتریس‌های جرم، میرایی و سختی هستند، همچنین، $x(t)$ ، $\dot{x}(t)$ ، $\ddot{x}(t)$ بردارهای تغییر مکان، سرعت و شتاب خواهد بود. نشانگر برداری δ ضریب نحوه اعمال تحریک وارده بر سازه است و $u(t)$ برابر با بردار نیروی کنترل است، که متناسب با ضریب ارائه شده در معادله بالا، در سازه توزیع می‌گردد. می‌توان ضریب تحریک وارده را به صورت زیر نمایش داد.

$$\{\delta\} = [-m_1, -m_2, \dots, -m_n]^T \quad (2)$$

می‌توان معادله (۱) را به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$\{\ddot{X}(t)\} = -[M]^{-1}[C]\{\dot{X}(t)\} - [M]^{-1}[K]\{X(t)\} + [M]^{-1}[\gamma]\{U(t)\} + [M]^{-1}[\delta]\{\ddot{X}_g(t)\} \quad (3)$$

به صورتی که:

$$\{Z(t)\} = \begin{Bmatrix} \{X(t)\} \\ \{\dot{X}(t)\} \end{Bmatrix} \quad (4)$$

با توجه به معادلات فضای حالت، معادلات اصلی سازه به صورت زیر قابل بیان خواهند بود:

$$\dot{Z}(t) = AZ(t) + BU(t) + E\ddot{X}_g(t) \quad (5)$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ M^{-1}H \end{bmatrix}, E = \begin{bmatrix} 0 \\ M^{-1}D \end{bmatrix} \\ A = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{bmatrix} \quad (6)$$

در معادله بالا، ماتریس A دارای ابعاد $(2n \times 2n)$ ، بردار B دارای ابعاد $(2n \times 2n)$ و E برابر با $2n$ خواهد بود. پس از معرفی فرمول‌بندی کلی مورد استفاده در این پژوهش، به ارائه معادلات مرتبط با الگوریتم‌های مود لغزشی و بنگ- بنگ پرداخته خواهد شد.

شود، عملکرد مطلوبی ایجاد نمی‌کند بنابراین برای بهبود این عملکرد نامطلوب نیروی کنترل به‌گونه‌ای تعیین می‌شود که شرایط اعمال شده بر مشتق هدف تابع لیاپانوف^۱ را برآورده کند. نتایج شبیه‌سازی برای سیستم‌های خطی و غیرخطی نشان داد که روش ارائه شده قادر به افزایش عملکرد برای پاسخ‌های سازه‌ای می‌باشد. همچنین، در سال ۲۰۱۰، پژوهشگران (Ehteram و Afkhamin، ۲۰۱۰) به بررسی کنترل غیرخطی سازه‌ای در معرض زلزله با استفاده از سیستم کنترلی مود لغزشی پرداختند. سازه سه‌طبقه مورد استفاده در این پژوهش، دارای سیستم جداگر لرزه‌ای بود، که توانست، به نحوه مناسبی پاسخ‌های ماکزیمم همه طبقات را کاهش دهد. غفارزاده و همکاران (Ghaffarzadeh و همکاران، ۲۰۱۹) به بررسی عملکرد یک سازه سه‌بعدی مجهز به سیستم کنترل جداگر لرزه‌ای فعال با الگوریتم کنترل مود لغزشی و فازی پرداخته‌اند. در این مقاله، سازه سه‌بعدی در نظر گرفته دارای پلانی با شکل (نامنظم در پلان) بوده است. همچنین با توجه به عیوب موجود در الگوریتم متداول مود لغزشی از منطق فازی نیز بهره‌گرفته شده است. با توجه به شاخص‌های ارائه شده در این مقاله، الگوریتم بیان شده دارای عملکردی مناسبی تحت زلزله‌های نزدیک گسل داشته است. برای کاهش محدودیت عملکرد عملگرها در الگوریتم مود لغزشی از یک الگوریتم کنترل بانام بنگ- بنگ استفاده شده است. این سیستم کنترلی جزئی از سیستم‌های بهینه‌سازی محسوب می‌شود، که البته پیش‌از این در برخی سازه‌ها مورد استفاده قرار گرفته است.

Lim و همکاران (۲۰۰۳) با بهره‌گیری از الگوریتم کنترل بنگ- بنگ اصلاح شده به بررسی و بهبود پاسخ‌های سازه مجهز به ابزار کنترل فعال پرداخته‌اند. در این پژوهش، دو سازه یک طبقه و پنج طبقه مورد استفاده قرار گرفته است. الگوریتم مورد استفاده منجر به جلوگیری از وقوع ناپایداری در سازه‌ها تحت زلزله‌های شدید شده است. در این مقاله با بهره‌گیری از ابزار کنترل فعال و ترکیب الگوریتم مود لغزشی و بنگ- بنگ به کاهش پاسخ‌های سازه تحت زلزله نزدیک گسل پرداخته شده است. به بیان دیگر، با توجه به کمبودهای موجود در الگوریتم مود لغزشی، که منجر به عدم ارائه پاسخ‌های مناسب سازه در هنگام اعمال تحریک‌های غیرمتداول می‌گردد، بر آن شدیم تا با بهره‌گیری هم‌زمان از دو الگوریتم مود لغزشی و بنگ- بنگ به اصلاح این نقیصه بپردازیم. بدین منظور، با اعمال سیستم کنترلی در طبقات مختلف سازه برشی اختیار شده بهینه‌یابی محل سیستم کنترلی با توجه به معیارهای انتخابی (کاهش حداکثر جابه‌جایی و میزان نیروی کنترلی) صورت گرفته است. همچنین با توجه به عملکرد الگوریتم پیشنهادی، شروطی برای بهینه‌سازی عملکرد ارائه شده است.

۲-۱- الگوریتم مود لغزشی

$$v = 0.5Z^T(t)vZ(t) \quad (11)$$

با استفاده از روش لیاپانوف و فرضیات زیر ادامه روند صورت خواهد پذیرفت:

$$VA + A^T V = -2Q \quad (12)$$

$$U(t) = -U_{\max} \operatorname{sgn}(S) \quad (13)$$

$$S = B^T V Z(t) \quad (14)$$

حال با مشتق گیری از رابطه اصلی لیاپانوف و جای گذاری فرضیات فوق الذکر رابطه زیر حاصل می گردد:

$$\dot{V} = -Z(t)QZ(t) - S^T U_{\max} \operatorname{sgn}(S) \quad (15)$$

با توجه به فرضیات در نظر گرفته شده، مقدار رابطه فوق همیشه منفی خواهد بود و این امر بیانگر پایداری سیستم کنترلی است.

۲-۲- الگوریتم بنگ-بنگ

سیستم کنترلی بنگ-بنگ جز سیستم‌های بهینه می-باشد که به اسامی دیگر از جمله سیستم کنترلی خاموش-روشن و یا سیستم کنترلی بازخورد ناگهانی نیز شناخته می‌شود. این کنترل گر اغلب برای بهینه‌سازی به کار برده می‌شود. البته در اکثر مواقع، کنترل بنگ-بنگ به تنهایی برای مسائل بهینه‌سازی و کنترلی به کار نمی‌رود و بیشتر با بهره‌گیری از ترکیب این الگوریتم با سایر سیستم‌های کنترلی موجود، باعث بهبود عملکرد سیستم کنترلی می‌شود. با توجه به خصوصیات روش کنترلی مود لغزشی، ترکیب این دو الگوریتم می‌تواند به بهبود عملکرد مود لغزشی گردد. از جمله عیوب روش کنترل مود لغزشی که موجب ترکیب این الگوریتم با الگوریتم بنگ-بنگ در این پژوهش شده است، می‌توان به عدم عملکرد مناسب در حین اعمال نیروی بیش از نیروی طراحی اشاره کرد. بنابراین برای کاهش محدودیت عملکرد عملگرها از یک الگوریتم کنترل با نام بنگ-بنگ استفاده می‌شود. کنترل بنگ-بنگ به صورت یک تابع علامت (sign) عمل می‌کند. این سیستم کنترلی ساختاری بسیار ساده نسبت به سیستم‌های دیگر دارد و در کاهش پاسخ حداکثری بسیار خوب عمل می‌کند. بنابراین، کنترل مود لغزشی ترکیب با کنترل بنگ-بنگ نقیصه فوق‌الذکر را رفع خواهد نمود.

۲-۳- الگوریتم مود لغزشی و بنگ-بنگ شرطی شده

با توجه به فعال بودن سیستم کنترلی الگوریتم ترکیبی مود لغزشی و بنگ-بنگ به منظور بهینه‌سازی پاسخ‌های سیستم از

مود لغزشی یکی از روش‌های کنترلی مقاوم در برابر اغتشاشات و تغییر پارامترها است، که به دلیل کارایی بالا و سادگی پیاده‌سازی به طور گسترده‌ای مورد استفاده محققین قرار گرفته است. ایده اصلی در این روش، در نظر گرفتن یک سطح متغیر با زمان (S) و هدایت مسیر پاسخ به سطح لغزش و نگهداری پاسخ در حدود این سطح می‌باشد. به بیان دیگر، سطح لغزش به صورتی طراحی می‌شود که حرکت در نظر گرفته شده، در سطح لغزش پایدار باشد. بایستی توجه داشت، که با وجود نویزهای سیستم، اغتشاش و یا ... چترینگ^۲ در الگوریتم مورد اشاره، به صورت ذاتی وجود خواهد شد. با توجه به توضیحات ذکر شده، پدیده چترینگ ایجاد شده، از جمله معایب این روش می‌باشد، که روش‌های مختلفی توسط محققین برای کاهش آن پیشنهاد شده است. با توجه به روند طراحی الگوریتم مود لغزشی، طراحی سطح لغزش بر اساس رابطه (۷) بنا خواهد شد:

$$S = PZ = 0 \quad (7)$$

در معادله فوق در صورتی که حرکت سطح لغزش، پایدار باشد، P دارای ابعاد $(r \times 2n)$ است. لازم به ذکر است، که به منظور نگه داشتن پاسخ‌ها بر روی سطح لغزش، بایستی مشتق S برابر با صفر باشد. شایان ذکر است، که τ مرتبط با تعداد کنترلرها می‌باشد. با صرف نظر کردن از تحریک خارجی و با مشتق گیری از معادله (۷) و بهره‌گیری از معادله (۵) خواهیم داشت:

$$U_{eq} = -(PB)^{-1} PAZ \quad (8)$$

و با جای گذاری معادله فوق در معادله اصلی فضای حالت خواهیم داشت:

$$\dot{Z} = [A - B(PB)^{-1} PA]Z \quad (9)$$

حال با بازنویسی معادله اصلی و به منظور به دست آوردن مجهولات معادله (ماتریس P) از روش LQR و یا مینیم کردن معادله درجه دوم بردارهای حالت استفاده خواهد شد:

$$J = \int_0^{\infty} Z^T(t)QZ(t)dt \quad (10)$$

در رابطه بالا، Q ماتریسی مثبت معین بوده و ابعاد آن برابر با ماتریس A می‌باشد. در مرحله دوم از الگوریتم مود لغزشی، طراحی کنترل گر به منظور هدایت مسیرهای پاسخ به سوی سطح لغزش انجام خواهد پذیرفت. برای کنترل پایداری روش، از تابع لیاپانوف بهره‌گرفته شده است:

در رابطه (۱۷)، $X_{n \max}(t)$ بیانگر بیشترین جابه‌جایی ایجاد شده در زمان t در حالت بدون کنترل می باشد. همچنین $X_{\max}(t)$ نمایانگر بیشترین جابه‌جایی ایجاد شده در زمان t و در حالت اعمال سیستم کنترلی در سازه است. می‌توان از دو رابطه بالا استنباط کرد که هرچه رابطه مبتنی بر جابه‌جایی دارای مقدار بیشتری باشد، سیستم کنترلی توانایی بیشتری در کاهش جابه‌جایی سازه خواهد داشت. بهره‌گیری از معادلات (۱۷) به منظور تعیین نیروی بهینه مورد استفاده در طبقات مختلف سیستم سازه‌ای، براساس ارزیابی دو پارامتر بدون بعد فوق‌الذکر تحت ضرایب مختلف از زلزله اعمال شده به سازه خواهد بود.

الگوریتم شرطی‌سازی^۴ بهره‌گرفته خواهد شد. بنابراین نیروی کنترل به صورت زیر به دست خواهد آمد:

$$U = \begin{cases} U_{\max} \operatorname{sgn}(S) & \text{if } |X| \geq X_d \\ 0 & \text{if otherwise} \end{cases} \quad (16)$$

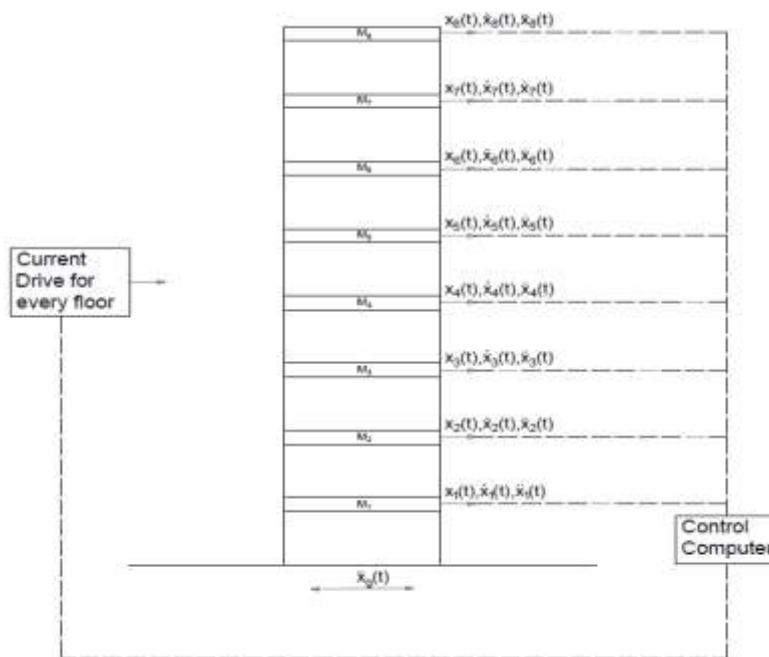
لازم به ذکر است، که در رابطه (۱۶)، X_d را می‌توان هر یک از پارامترهای شتاب، سرعت و جابه‌جایی سازه قرارداد. البته با توجه متداول بودن سنسورهای مبتنی بر تغییرمکان، شروط براساس تغییرمکان بنا خواهند شد (Cai و همکاران، ۲۰۰۰). به منظور بررسی و تعیین نیروی کنترل بهینه، در مرحله نخست دو پارامتر بدون بعد زیر برای هر یک از طبقات به دست خواهد آمد.

$$\eta_d = \frac{X_{n-\max}(t) - X_{\max}(t)}{X_{n-\max}(t)}$$

$$\eta_u = \frac{U_{\max}}{m(\ddot{X}_g(t))_{\max}} \quad (17)$$

جدول ۱- پارامترهای سازه سه طبقه (مثال عددی نخست)

طبقه	۱	۲	۳
جرم (ton)	۱	۱	۱
سختی (Kn/m)	۹۸۰	۹۸۰	۹۸۰



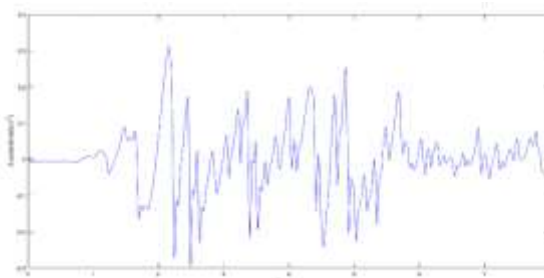
شکل ۱- سازه مورد بررسی

جدول ۲- پارامترهای سازه هشت طبقه (مثال عددی دوم)

پارامترهای سازه							
طبقه	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷
جرم (ton)	۸۱۰	۸۱۰	۶۱۰	۶۱۰	۶۱۰	۶۰۰	۶۰۰
سختی (Kn/m)	۸۵۳۴۷۰	۸۱۳۴۷۰	۷۴۵۵۶۰	۶۸۶۷۰۰	۶۶۷۰۸۰	۶۲۷۸۴۰	۶۱۸۰۳۰

الگوریتم کنترل مود لغزشی و بنگ- بنگ و البته بدون شروط مورد بررسی قرار گرفته است. پاسخ‌های این سازه نمایانگر عملکرد مناسب این الگوریتم بوده است، البته مطابق توضیحاتی که پیش از این بیان شد، به‌منظور بهبود پاسخ‌ها، در سازه دوم از الگوریتم ترکیبی مود لغزشی و بنگ- بنگ شرطی بهره گرفته شده است. شایان ذکر است، با توجه به اولویت سنسورهای انتخابی که مبتنی بر جابه‌جایی بوده‌اند، به‌طور خاص، به بررسی و مقایسه پاسخ‌های جابه‌جایی این سیستم سازه‌ای در طبقات مختلف پرداخته شده است.

در وهله نخست، سیستم سازه‌ای با بهره‌گیری روش ترکیبی کنترل مود لغزشی و بنگ- بنگ^۵ و با جایگذاری سیستم کنترلی در تمام طبقات مورد بررسی قرار گرفته است. شکل ۳ نشانگر خلاصه‌ای از نتایج به‌دست‌آمده از تغییر محل جایگذاری سیستم کنترل در طبقات و همچنین نیروی مورد استفاده برای هر یک از حالات در سازه بوده است. در شکل (۳)، AP نشانگر محل قرارگیری در طبقه است. با توجه به شکل (۳) می‌توان دریافت که با اعمال سیستم کنترلی در طبقات بالاتر، نیروی کنترلی بیشتری برای کاهش جابه‌جایی سازه نیاز است. علاوه بر این، باعث افزایش جابه‌جایی در طبقات پایین‌تر و همچنین ایجاد شتاب بیشتر در طبقات به‌دلیل زیاد بودن نیروی کنترلی، می‌باشد. همچنین، بهترین مکان برای اعمال سیستم کنترلی با توجه به میزان نیروی کنترلی و همچنین کاهش جابه‌جایی سازه، طبقات اول می‌باشد. پس از بررسی اولیه روند کنترلی و تشخیص اولیه محل بهینه ابزار کنترل، کنترل ترکیبی مود لغزشی و بنگ- بنگ شرطی شده^۶ بیان می‌گردد. بدین منظور از شرط جابه‌جایی یک، سه و هفت سانتی‌متری برای سیستم کنترلی استفاده شده است. در عین حال، نیروی کنترلی مورد استفاده به‌منظور تعیین دقیق تأثیر هر یک از شروط اعمال شده ثابت در نظر گرفته شده است. بدین منظور می‌توان نتایج مرتبط با قرارگیری سیستم کنترلی شرطی در طبقه نخست سازه برشی را به‌صورت جدول (۴) و شکل (۴) نمایش داد. جدول (۴) و شکل (۴) بر اساس نیروی ۱۳۴۳ کیلو نیوتن بیان شده است. در شکل (۴)، تغییر مکان حاصل از سیستم ارائه شده و همچنین الگوریتم LQR نمایش داده شده است. شایان ذکر است، به منظور بررسی کارایی الگوریتم ارائه شده، پاسخ‌های سازه با بهره‌گیری از الگوریتم LQR نیز بیان شده است. می‌توان مشاهده کرد، که الگوریتم ارائه شده با توجه به شروط انتخابی عملکرد مناسب‌تری نسبت به الگوریتم LQR داشته است. همچنین، با توجه به مقدار شرط انتخابی، میزان کنترل صورت گرفته در سازه متفاوت بوده است. همچنین به‌منظور بررسی دقیق‌تر پاسخ‌های سازه مورد بررسی، شتاب سازه تحت کنترل



شکل ۲- رکورد زلزله EL-Centro

جدول ۳- تغییر مکان طبقات مختلف سازه سه طبقه

طبقه			
۳	۲	۱	تغییر مکان سیستم بدون کنترل (cm)
۱/۳۷۲	۱/۰۴	۰/۵۹۷	
تغییر مکان سیستم با SMBBC (cm)			
۰/۵۹۴	۰/۴۹۱	۰/۳۰۸	

۳- مشخصات سازه و تحریک وارده

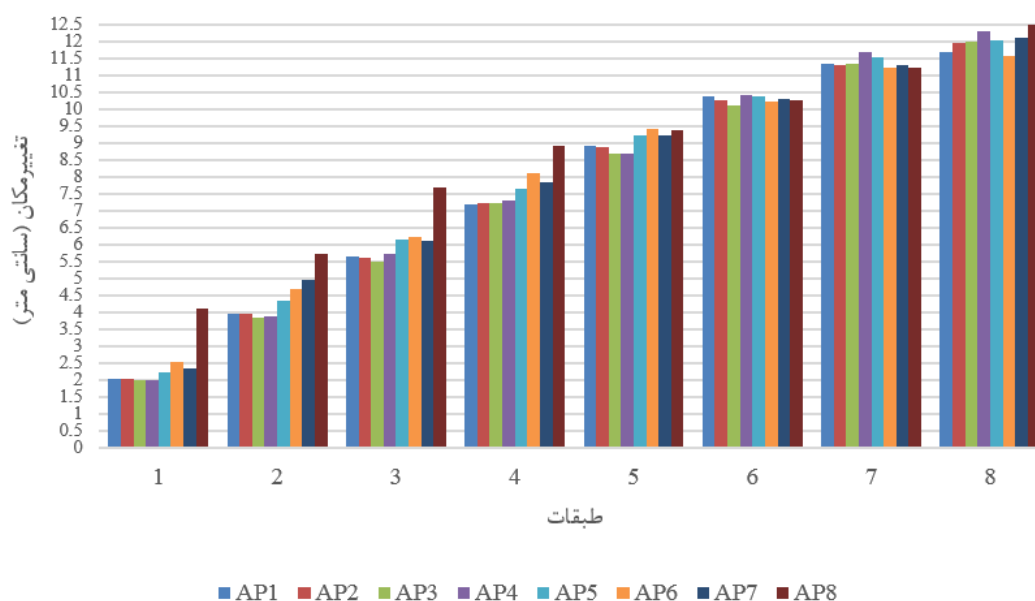
به‌منظور بررسی عملکرد الگوریتم طرح‌شده، دو سازه مورد بررسی قرار گرفته است، در سازه نخست، یک سازه سه طبقه معیار مورد استفاده قرار گرفته است (Cai و همکاران، ۲۰۰۰). سازه سه طبقه در هر طبقه دارای یک درجه آزادی در نظر گرفته شده است، که مشخصات سازه در جدول (۱) نمایش داده شده است. شایان ذکر است، که سیستم کنترل فعال در طبقه اول لحاظ شده است. همچنین در مثال دوم یک سازه هشت طبقه برشی در نظر گرفته شده است، که مشخصات آن به‌صورت جدول (۲) بیان شده است. سازه در نظر گرفته شده دارای زمان تناوب ۰/۹۷۳ و ضریب میرایی برابر با ۰/۳٪ در نظر گرفته شده است (شکل (۱)). زلزله EL-Centro به‌منظور بررسی عملکرد سازه، در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته است. بازه ۰ تا ۸ ثانیه‌ای این رکورد در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است، ماکزیمم شتاب تحریک وارده به دو سازه برابر با ۰/۱۲ شتاب زمین بوده است (شکل (۲)). مدل سازی سازه‌های فوق‌الذکر، تحت تحریک وارده و همچنین الگوریتم‌های مورد اشاره با استفاده از برنامه MATLAB و براساس مدل سازی عددی صورت گرفته است.

۴- نتایج

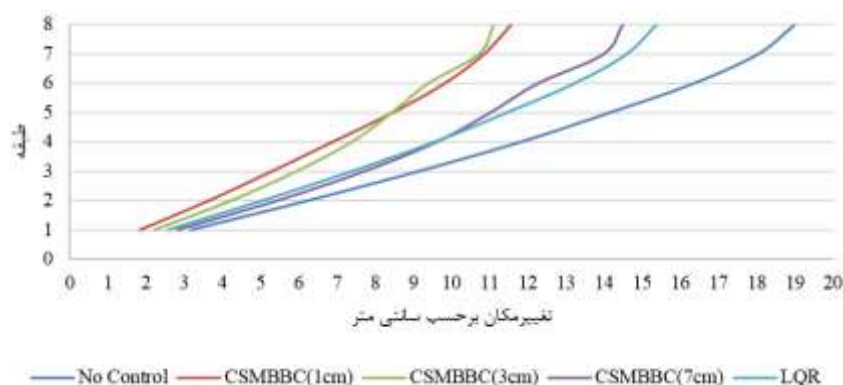
با توجه به توضیحات ارائه شده در بخش‌های پیشین، به‌منظور بررسی کارایی و عملکرد سیستم الگوریتم جدید ارائه شده، این روش در دو سازه مورد بررسی قرار گرفته است. در سازه نخست، از یک سازه معیار بهره گرفته شده است (Cai و همکاران، ۲۰۰۰). به‌صورت اختصار پاسخ‌های سیستم سازه‌ای سه طبقه را می‌توان در جدول (۳) نمایش داد، که عملکرد سیستم با استفاده از

به‌عنوان مثال به نیروی کنترل در سه حالت شرطی در حالت قرارگیری سیستم در طبقه اول اشاره کرد، که در شکل (۶) نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با شرطی سازی نیروی کنترلی نیازی به اعمال نیروی کنترلی در تمام مدت وقوع زلزله وجود ندارد و زمانی نیروی کنترلی بر سازه اعمال خواهد شد که از شرط تعریف شده در سیستم کنترلی عبور کند، که این شرط مقدار جابه‌جایی مجاز تعریف شده در سیستم کنترلی می‌باشد.

ترکیبی مود لغزشی و بنگ- بنگ شرطی در جدول (۴) بیان شده است. همچنین تغییرات تاریخچه زمانی جابه‌جایی، سرعت و شتاب طبقه اول با اعمال سیستم کنترلی شرطی به‌صورت شکل (۵) نمایش داده شده است. با توجه به نمودار می‌توان بیان کرد، که با افزایش شرط به هفت سانتی‌متر، میزان مقادیر پاسخ حداکثر در برخی موارد از حالت کنترل نشده نیز افزایش یافته است. اما با کاهش شرط عملی و افزایش زمان بهره‌گیری از سیستم کنترلی این وضعیت شرایط مناسبی را تجربه کرده است. همچنین می‌توان



شکل ۳- تغییر مکان سازه در طبقات مختلف با توجه به قرارگیری سیستم کنترلی در طبقات مختلف

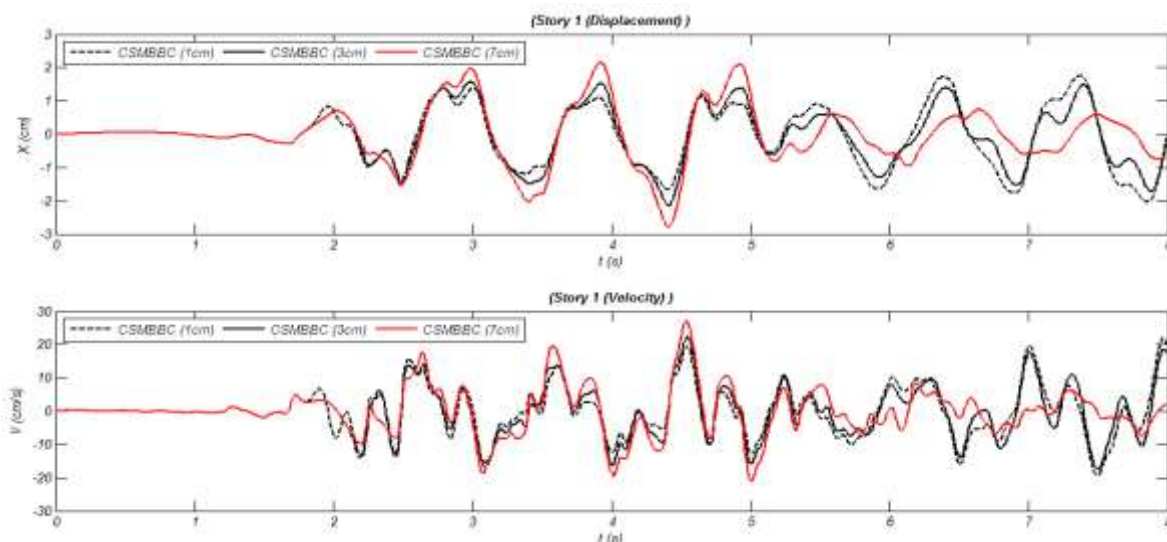


شکل ۴- پاسخ‌های سازه در حالت استفاده از سیستم کنترل شرطی ترکیب مود لغزشی و بنگ- بنگ

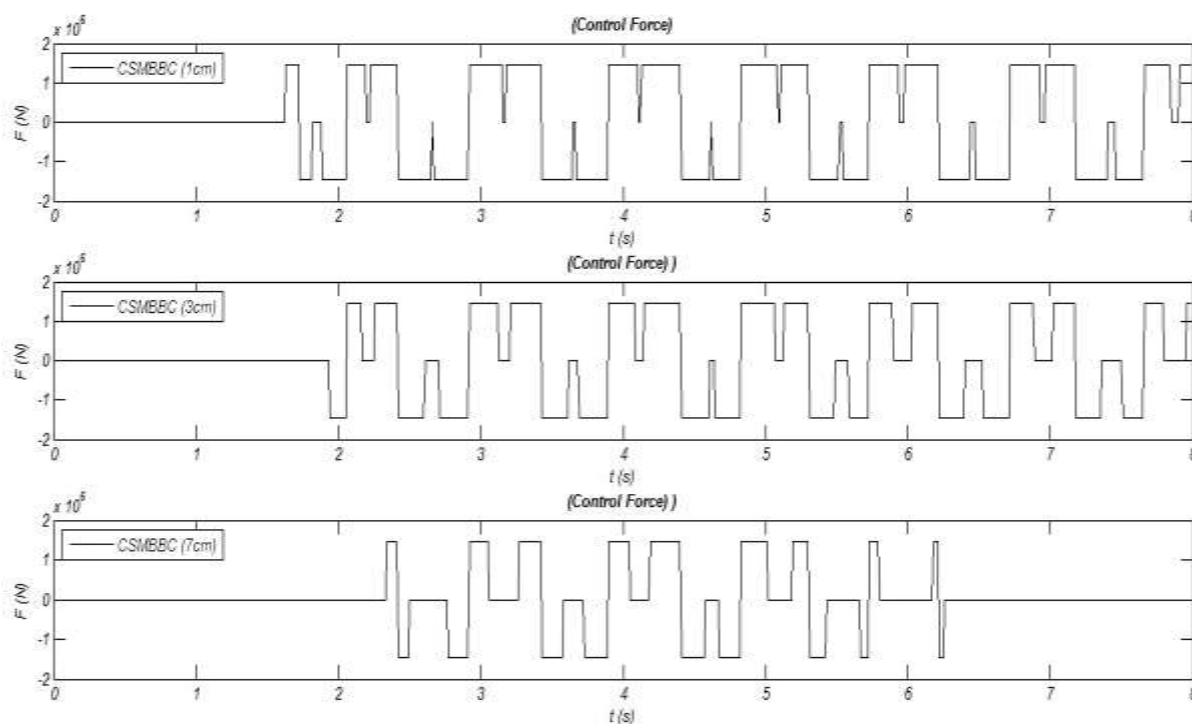
جدول ۴- پاسخ‌های سازه در حالت استفاده از سیستم کنترل شرطی ترکیب مود لغزشی و بنگ- بنگ

مؤلفه	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸
کنترل نشده	۴۸۴/۸	۵۸۰/۳	۷۱۷/۱	۸۳۳	۸۴۱/۶	۸۹۲/۶	۹۶۹/۷	۱۱۳۷
CSMBBC (1cm)	۸۳۲/۵	۷۷۳/۹	۶۵۴	۵۷۴/۳	۵۲۶/۳	۶۲۷/۴	۷۸۴/۵	۸۷۹/۶
CSMBBC (3cm)	۸۲۱/۲	۷۴۹/۷	۶۶۴	۶۶۹/۸	۶۲۳/۵	۶۸۷/۷	۸۷۹/۹	۸۴۲/۲
CSMBBC (7cm)	۶۷۰/۲	۷۱۳/۲	۸۱۷/۵	۷۸۷/۱	۶۹۹	۸۱۴/۸	۱۰۳۲	۹۷۷/۵

شتاب (cm/s²)



شکل ۵- نمودار تاریخچه زمانی سرعت و شتاب طبقه اول تحت سیستم کنترلی شرطی واقع شده در طبقه اول



شکل ۶- نیروی کنترل با قرارگیری سیستم کنترلی در طبقه اول

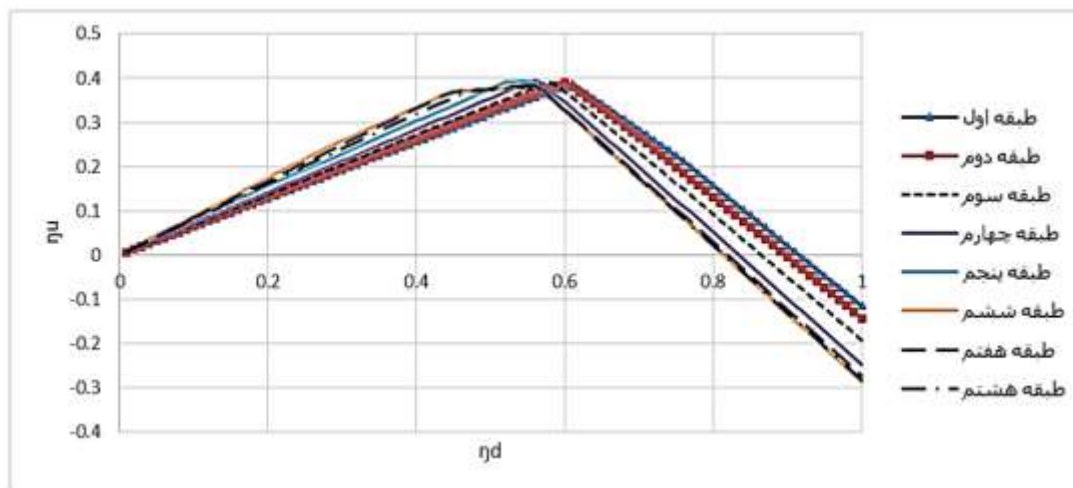
شایان ذکر است، تعیین پاسخهای سازه‌ای در الگوریتم ترکیبی مود لغزشی و بنگ- بنگ شرطی، بر اساس یک روند تکراری بوده است. به بیان دیگر، همان‌طور که پیش از این بیان شد، به‌منظور تعیین مقدار نیروی کنترل بهینه مورد استفاده برای کاهش پاسخهای سازه، از دو پارامتر بدون بعد تعریف شده در معادله (۱۷) بهره گرفته شده است. بدین صورت که دو رابطه ذکر شده در معادله (۱۷) برای ضرایب 0.01 تا 5 برابر نیروی زلزله تکرار شده است. به‌عنوان مثال با در نظر گرفتن بازه مورد اشاره

برای دو پارامتر بدون بعد و با قرارگیری سیستم کنترلی در طبقه دوم سیستم سازه‌ای، نموداری به صورت شکل (۷) برای هر طبقه ایجاد خواهد شد. در شکل (۷) می‌توان مشاهده کرد، که با توجه به این‌که حداکثر مقادیر η_{ii} ما بین 0.55 تا 0.62 می‌باشد. با انتخاب ضریب 0.58 نیروی بهینه حاصل خواهد شد. شایان ذکر است، با توجه به شکل (۷)، مقادیر بیش از 0.8 نه تنها منجر به کاهش پاسخهای سازه نمی‌شود، بلکه این مقادیر با انتخاب این ضریب افزایش می‌یابد. با انتخاب ضریب 0.58 ، نیروی بهینه برابر

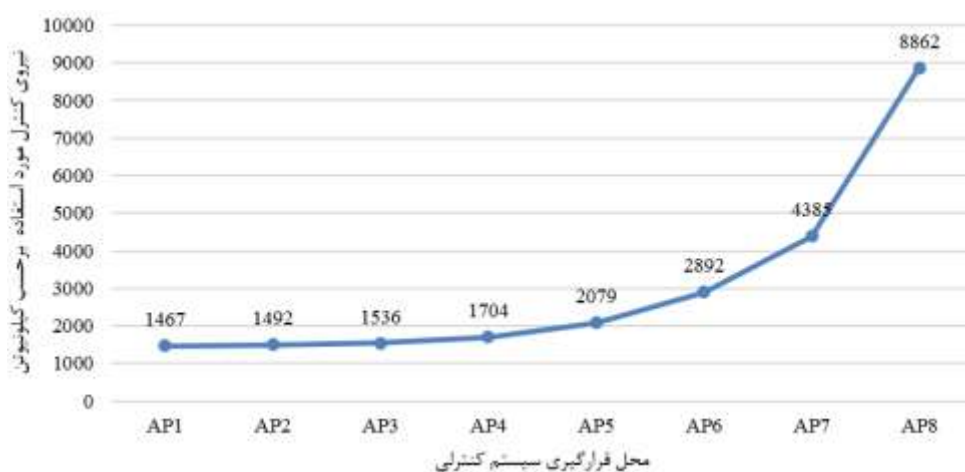
است. براین اساس، می‌توان دریافت که نیروی کمتری برای کاهش جابه‌جایی با جایگذاری سیستم کنترلی در طبقات پایین‌تر مورد نیاز خواهد بود.

با ۱۴۶۷ کیلو نیوتن به دست می‌آید.

به منظور بررسی دقیق‌تر نیروی صرف شده در سیستم کنترلی با توجه به قرارگیری در طبقات مختلف، شکل (۸) نمایش داده شده است. این نمودار نشانگر مقدار نیروی بهینه در طبقات مختلف



شکل ۷- نحوه محاسبه نیروی بهینه در الگوریتم شرطی مود لغزشی و بنگ- بنگ با توجه به قرارگیری در طبقه دوم سازه



شکل ۸- تغییرات نیروی کنترل اعمالی به سازه متناسب با تغییر در طبقات در الگوریتم شرطی مود لغزشی و بنگ- بنگ

که، با جایگذاری ابزار کنترلی در طبقات تحتانی، حداقل انرژی برای کاهش پاسخهای سازه مورد نیاز است. همان‌طور که قابل انتظار است، با توجه به شروط اعمالی در برخی موارد کاهش بسیار مناسبی در پاسخهای به دست آمده است. البته در شروط بزرگ موجود، در برخی موارد پاسخها دچار افزایش شده‌اند. بهترین حالت با توجه به مصرف انرژی و کاهش پاسخها سیستم کنترلی با شرط سه سانتی‌متری و با اعمال در طبقه اول بوده است، که نشان از بهبود عملکرد سیستم نسبت به الگوریتم‌های متداول و بدون حالت شرطی است.

۵- بحث و نتیجه‌گیری

این پژوهش، به ارائه یک الگوریتم کنترل جدید مبتنی بر شرطی‌سازی ترکیب الگوریتم مود لغزشی و بنگ- بنگ پرداخته است. براین اساس، با توجه به بهینه‌یابی محل استقرار سیستم کنترلی، این سیستم در تمام طبقات سازه مورد بررسی قرار گرفته است و با عنایت به سه شرط اختیار شده برای الگوریتم ارائه شده، ابزار کنترلی در تمام زمان وقوع زلزله به جهت بهره‌وری مناسب‌تر استفاده نشده است. بدین سبب، سه شرط یک، سه و هفت سانتی‌متری برای جابه‌جایی در نظر گرفته شده است. با توجه به نتایج حاصل از تحلیل‌های متوالی صورت گرفته، می‌توان بیان کرد

- design approach for robust stabilization of uncertain nonlinear systems with perturbation based on optimally-tuned global sliding mode control", *Journal of Vibration and Control*, 2017, 23 (8), 1285-1295. <https://doi.org/10.1177/1077546315592516>.
- Palacios-Quiñonero F, Rubió-Massegú J, Rossell JM, Karimi HR, "Recent advances in static output-feedback controller design with applications to vibration control of large structures", *Modeling, Identification and Control*, 2014, 35 (3), 169-190. <https://doi.org/10.4173/mic.2014.3.4>.
- Rashidi H, Khanlari K, Zarfam P, Ghafory-Ashtiany M, "A novel approach of active control of structures based on the critically damped condition", *JVC/Journal of Vibration and Control*, 2021, 27 (13-14), 1511-1523. <https://doi.org/10.1177/1077546320944300>.
- Wani ZR, Tantray M, Sheikh JI, "Experimental and numerical studies on multiple response optimization-based control using iterative techniques for magnetorheological damper-controlled structure", *Structural Design of Tall and Special Buildings*, 2021, 30 (13), 1-22. <https://doi.org/10.1002/tal.1884>.
- Yin X, Li X, Liu L, Wang Y, "A probabilistic robust mixed H_2 / H_∞ fuzzy control method for hypersonic vehicles based on reliability theory", *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 2018, 229 (5), 388-405. <https://doi.org/10.1177/1729881417754153>
- Almutairi NB, Zribi M, "Sliding mode control of a three-dimensional overhead crane", *JVC/Journal of Vibration and Control*, 2009, 15 (11), 1679-1730. <https://doi.org/10.1177/1077546309105095>.
- Cai GP, Huang JZ, Sun F, Wang C, "Modified sliding-mode bang-bang control for seismically excited linear structures", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2000, 29 (11), 1647-1657. [https://doi.org/10.1002/1096-9845\(200011\)29:11<1647::AID-EQE981>3.0.CO;2-4](https://doi.org/10.1002/1096-9845(200011)29:11<1647::AID-EQE981>3.0.CO;2-4).
- Chang C-M, Spencer BF, "Active base isolation of buildings subjected to seismic excitations", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2010, 39 (13), 1493-1512. <https://doi.org/10.1002/eqe.1040>
- Chang C-M, Spencer BF, "Active base isolation of buildings subjected to seismic excitations", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2010, 39 (13), 1493-1512. <https://doi.org/10.1002/eqe.1040>.
- Chu SY, Yeh SW, Lu LY, Peng CH, "Experimental verification of leverage-type stiffness-controllable tuned mass damper using direct output feedback LQR control with time-delay compensation", *Earthquake and Structures*, 2017, 12 (4), 425-436. <https://doi.org/10.12989/eas.2017.12.4.425>.
- Du H, Zhang N, "Active Vibration Control of Structures Subject to Parameter Uncertainties and Actuator Delay", *Journal of Vibration and Control*, 2008, 14 (5), 689-709. <https://doi.org/10.1177/1077546307083173>
- Ehteram S, Afkhamin B, "Nonlinear Control of Buildings Subjected to Earthquakes by Using Sliding Mode Controller (SMC)", *Modern Applied Science*, 2019, 4 (12), doi:10.5539/mas.v4n12p170
- Ghaffarzadeh H, Ghaffari AH, Yang TY, "Fuzzy-sliding mode control of nonlinear smart base-isolated building under earthquake excitation", *Structural Design of Tall and Special Buildings*, 2019, 28 (1), 1-14. <https://doi.org/10.1002/tal.1557>.
- Guo SX, "Non-probabilistic robust reliability method and reliability-based performance optimization for active vibration control of structures and dynamic systems with bounded uncertain parameters", *JVC/Journal of Vibration and Control*, 2016, 22 (6), 1472-1491. <https://doi.org/10.1177/1077546314539373>.
- Lee SH, Min KW, Lee YC, "Modified sliding mode control using a target derivative of the Lyapunov function", *Engineering Structures*, 2005, 27 (1), 49-59. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2004.08.010>.
- Li W, Xie Z, Wong PK, Cao Y, Hua X, Zhao J, "Robust nonfragile H_∞ optimum control for active suspension systems with time-varying actuator delay", *Journal of Vibration and Control*, 2019, 25 (18), 2435-2452. <https://doi.org/10.1177/1077546319857338>.
- Lim CW, Chung TY, Moon SJ, "Adaptive bang-bang control for the vibration control of structures under earthquakes", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2003, 32 (13), 1977-1994. <https://doi.org/10.1002/eqe.310>.
- Mobayen S, Baleanu D, "Linear matrix inequalities

EXTENDED ABSTRACT

Sliding Mode Control Method Combined with Bang-Bang Control for Structures under Earthquake Excitation

Hossein Ghaffarzadeh^{*}, Amir Hossein Ghaffari, Mojtaba Eidi

Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz

Received: 27 May 2022; Review: 21 August 2022; Accepted: 11 September 2022

Keywords:

Shear Building, Sliding Mode Control Strategy, Bang-Bang Algorithm, Active Control.

1. Introduction

In the present paper, the improved sliding mode control algorithm are presented. This strategy is based on the combination of sliding mode control and Bang-Bang control theory. The Bang-Bang theory can switch abruptly between the on and off situation, this property can improve the performance of sliding mode control strategy. Also, three thresholds used to decrease the time of using the control system and optimizing the responses of structure.

2. Methodology

In this paper, the sliding mode control strategy employed to linear and shear building. This control method is a widely used method in different structures but has many weaknesses. For this reason, Bang-Bang control strategy and three different thresholds utilized to optimize the responses of selected structure. Due to the prevalence of displacement-based sensors, three limits based on the displacement have been used (1cm-3cm-7cm). These limits can help to reduce the time of using the control algorithm. Also, the controller is placed on different floors to find the best location for decreasing the responses of structure under the seismic excitation (Fig. 1).

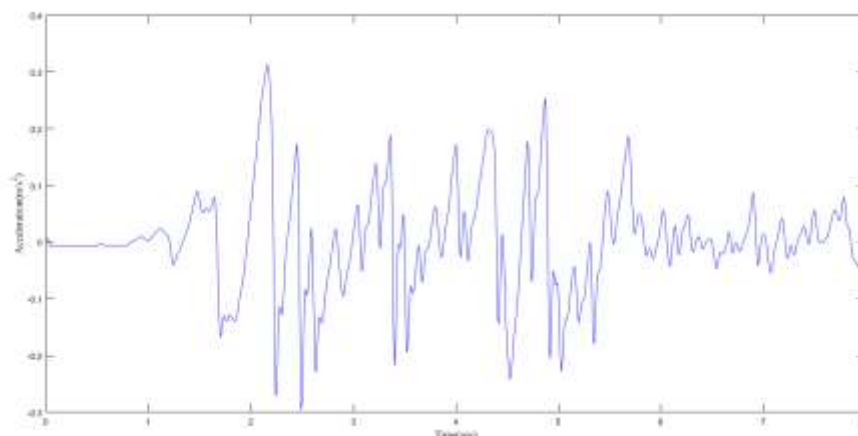


Fig. 1. El-Centro excitation

* Corresponding Author

E-mail addresses: ghaffar@tabrizu.ac.ir (Hossein Ghaffarzadeh), a.h.ghaffari@hotmail.com (Amir Hossein Ghaffari), mojtaba195@gmail.com (Mojtaba Eidi).

3. Results and discussion

In order to investigate the performance of proposed strategy, the eight-floor building is considered. Also, the responses of the structure based on the different location of controller by considering the three limits are achieved. The using the control forces of proposed algorithm can be expressed in Fig. 2. The maximum of forces is fixed. But the time of using the controlling system has been different from each other. This feature can help the performance of control system under the seismic excitation.

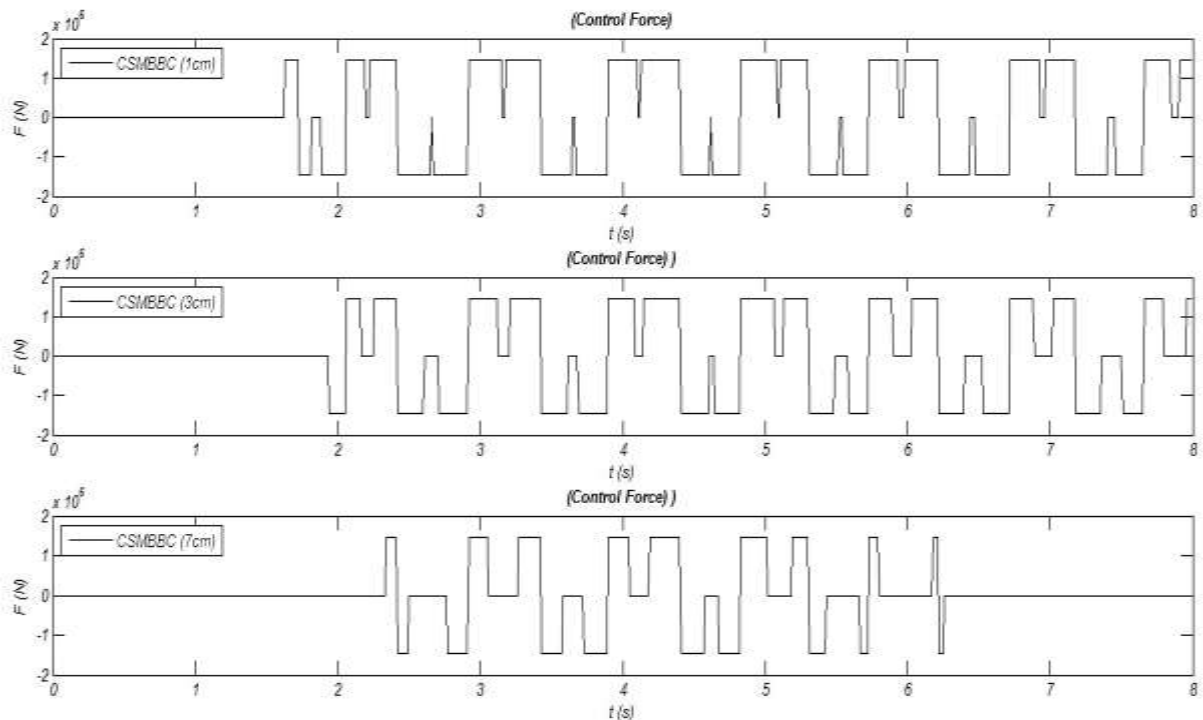


Fig. 2. The control force (the controller located on the first floor)

4. Conclusions

This paper presents a new control method based on the combination of sliding mode control and Bang-Bang control. The control system is located in different floors for finding the best responses of structure. Based on the mentioned process, locating the control system on the lower floors lead to optimum responses. Also, using the three limits (1cm, 3cm and 7cm) leads to different range of results, however the best performance of control strategy under the selected seismic excitation gained by locating the control system on the first floor and by adjusting the 3-cm limit.

5. References

- Cai GP, Huang JZ, Sun F, Wang C, "Modified sliding-mode bang-bang control for seismically excited linear structures", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2000, 29 (11), 1647-1657. [https://doi.org/10.1002/1096-9845\(200011\)29:11<1647::AID-EQE981>3.0.CO;2-4](https://doi.org/10.1002/1096-9845(200011)29:11<1647::AID-EQE981>3.0.CO;2-4).
- Ghaffarzadeh H, Ghaffari AH, Yang TY, "Fuzzy-sliding mode control of nonlinear smart base-isolated building under earthquake excitation", *Structural Design of Tall and Special Buildings*, 2019, 28 (1), 1-14. <https://doi.org/10.1002/tal.1557>.