

بررسی رفتار کنترل‌کننده‌های اصطکاکی برای حفاظت لرزه‌ی تجهیزات حساس

تورج تقی‌خانی (استادیار)

هادی صالحی (کارشناس ارشد)

دانشکده‌ی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

مهندسی عمران شریف
دوره‌ی ۲، شماره‌ی ۳، ص. ۱۴۷-۱۵۴، (زیرداشته تقی)

امروزه سیستم‌های کنترلی نیمه‌فعال به دلیل پایداری پاسخ سازه و قابلیت بالا در کنترل آن کاربرد گسترده‌ی یافته است. کنترل نیمه‌فعال با استفاده از میراگرهای اصطکاکی متغیر، به منظور بهبود مشخصه‌های اتلاف انرژی میراگرهای اصطکاکی غیرفعال در سال‌های اخیر مورد توجه زیادی قرار گرفته است. ارتعاشات لرزه‌ی ممکن است منجر به ایجاد شتاب‌ها و جابه‌جایی‌های بزرگ و در نهایت خرابی تجهیزات حساس شود. سیستم‌های کنترلی نیمه‌فعال با کنترل‌کننده‌های اصطکاکی و نیروی بسیار کم، از طریق محدودسازی شتاب ورودی و جابه‌جایی دستگاه قادرند پاسخ تجهیزات فوقانی را به خوبی کنترل کنند. هدف از این تحقیق، بررسی کارایی تکنولوژی کنترل نیمه‌فعال با استفاده از میراگرهای اصطکاکی متغیر در کاهش پاسخ لرزه‌ی تجهیزات، و نیز بررسی اثر الگوریتم کنترلی H_{∞} در سیستم‌های دارای کنترل‌کننده‌ی اصطکاکی است. این تحقیق نشان می‌دهد که استفاده از میراگرهای اصطکاکی متغیر با خصوصیت تطبیق‌پذیری در برابر ارتعاشات مختلف زلزله و نیاز به منبع انرژی کم، اگر چه سبب کاهش پاسخ شتاب ورودی به تجهیزات سازه می‌شود، جابه‌جایی دستگاه نسبت به طبقه را نیز در کم‌ترین میزان نگه می‌دارد. نتایج این مطالعه مشخص می‌کند که با استفاده از کنترل‌کننده‌های اصطکاکی و الگوریتم کنترلی مناسبی که بتواند اثر اختلالات و تحریکات بیرونی را در نظر بگیرد، می‌توان کمک مؤثری در افزایش قابلیت سیستم در کنترل پاسخ تجهیزات کرد.

واژگان کلیدی: کنترل لرزه‌ی سازه‌ها، کنترل نیمه‌فعال، میراگرهای اصطکاکی

متغیر، تجهیزات.

ttaghikhany@aut.ac.ir
hadi_salehi@aut.ac.ir

مقدمه

در سال‌های اخیر ارتقاء ایمنی ساختمان‌ها، پل‌ها، نیروگاه‌ها، و سد‌ها در برابر زلزله به طور گسترده مورد توجه قرار گرفته است، اما به لحاظ تاریخی تلاش کم‌تری در جهت ارتقاء عملکرد تجهیزات بحرانی، سیستم‌های تجهیزات حساس و فرایند آن در طول زلزله و بعد از آن صورت گرفته است. این در حالی است که خسارات مالی غیرسازه‌ی ناشی از زلزله‌ها ممکن است بیشتر از خسارات سازه‌ی باشد. به عنوان مثال، در زلزله‌ی نورتریج (آمریکا ۱۹۹۴)، بسیاری از وسایل و امکانات دچار خسارت موضعی شدند و تعدادی نیز کاملاً غیر قابل استفاده شدند که علت اصلی آن خرابی تجهیزات درگستره‌ی وسیعی از سیستم‌ها بود. زلزله‌ی ازمیت^۱ در هفدهم آگوست سال ۱۹۹۹ در قلب صنعتی‌ترین منطقه‌ی ترکیه رخ داد و نتایج بالقوه‌ی آن در مراکز صنعتی رخ نمود. آتش‌سوزی گسترده و خسارت سازه‌ی و غیرسازه‌ی، کارکرد بزرگ‌ترین پلایسگاه ترکیه را برای چندین ماه متوقف کرد و برخی از قسمت‌های آن نیز برای مدتی بیش از یک سال از کار افتادند.^[۱]

یکی دیگر از روش‌های حفاظت لرزه‌ی استفاده از راهکار کنترل فعال است. کنترل لرزه‌ی تجهیزات در واقع اصلاح خصوصیات آن شامل تغییر سختی، میرایی و جرم در برابر بارهای دینامیکی خارجی است تا خسارات وارده کمینه شود یا تجهیزات قادر به ارائه‌ی سرویس خود بعد از زلزله نیز باشند. تا امروز برخی روش‌های

تاریخ: دریافت ۲۹/۸/۱۳۸۷، داوری ۱۶/۱۰/۱۳۸۸، پذیرش ۱۲/۱۱/۱۳۸۸.

کنترل تجهیزات با موفقیت به اجرا درآمده و تعدادی نیز به صورت نظری معرفی شده‌اند.

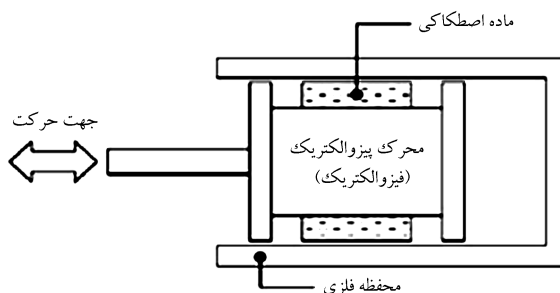
استراتژی کنترل نیمه‌فعال، بدون نیاز به منبع انرژی بزرگ موجب تطبیق پذیری عملکرد سیستم فعال در کاهش مؤثر پاسخ، در طول آرایش گسترده‌ی شرایط بارگذاری دینامیکی است، در حالی که استراتژی غیرفعال متضمن پایداری سیستم حین بارگذاری است. این دستگاه‌ها به منظور رفع نیاز به یک منبع انرژی خارجی، با نیروی بسیار کوچکی طراحی می‌شوند. به همین دلیل، فناوری کنترل نیمه‌فعال اخیراً به منظور کاهش پاسخ دینامیکی تجهیزات در معرض زلزله و باد به‌طور گسترده‌ی مورد مطالعه قرار گرفته است.^[۴]

از جمله سیستم‌های نیمه‌فعال که امروزه از آن استفاده می‌شود «میراگر اصطکاکی متغیر» (VFDS) است. این سیستم اغلب به‌عنوان یکی از مفاهیم عملی سیستم‌های کنترل نیمه‌فعال شناخته می‌شود و به منظور بهبود عملکرد میراگرهای اصطکاکی غیرفعال مطرح شده است. این میراگرها نیروی کنترلی را از طریق اصطکاک سطحی و کنترل افت دستگاه تولید می‌کنند و می‌توانند تغییر مکان و جابه‌جایی نسبی کف تجهیزاتی را که تحت تحریکات لرزه‌ی قرار گرفتند کاهش دهند. میراگر اصطکاکی متغیر از محرک‌های فیزوالکتریک به‌عنوان تنظیم‌کننده نیروی اصطکاکی و متعاقب آن نیروی نگه‌دارنده استفاده می‌کند. وظیفه‌ی این میراگر، اداره‌ی سطح ولتاژ ورودی به محرک فیزوالکتریک برای کنترل نیروی نگه‌دارنده روی مصالح اصطکاکی است. در این میراگرها به‌طور کلی نیروی نگه‌دارنده با سطح ولتاژ متناسب است.

براساس مشخصه‌های ارزیابی شده‌ی میراگر اصطکاکی متغیر، میراگر با دو جزء و عنصر مدل می‌شود: فنر خطی و یک لغزنده‌ی اصطکاکی متغیر که به‌صورت سری به یکدیگر متصل‌اند. فنر خطی یک عضو کشسان را که متصل به دستگاه اصطکاکی است شبیه‌سازی می‌کند و توسط لغزنده‌ی اصطکاکی مدل می‌شود. شکل ۱ مدل شماتیک میراگر اصطکاکی متغیر را نشان می‌دهد.^[۱]

در میراگرهای اصطکاکی متغیر، برای این که میراگر بتواند در هر زلزله با شدت دلخواه فعال شود، نیروی تماسی نرمال (نیروی نگه‌دارنده) اعمال شده بر سطح اصطکاکی تنظیم می‌شود. بدین صورت میراگر اصطکاکی نیمه‌فعال می‌تواند بار لغزشی را در زمان واقعی در پاسخ به حرکت سازه‌ی و تحریکات خارجی تنظیم کند.

مطالعات و تحقیقات عملی صورت‌گرفته روی میراگر اصطکاکی متغیر برای کنترل سازه‌ی به‌اندازه‌ی مطالعات تحلیلی انجام شده نیست. در سال ۱۹۹۵ یک دستگاه مهار لغزشی فعال (ASBD) که در آن نیروی نگه‌دارنده از طریق یک سازوکار هیدرولیکی تنظیم می‌شود معرفی شد.^[۵] یکی دیگر از سیستم‌های میراگر اصطکاکی متغیر (VFDS) که مورد بررسی و آزمایش قرار گرفته، سیستمی است که



شکل ۱. مدل شماتیک میراگر اصطکاکی متغیر.

در سال ۱۹۹۶ معرفی شد و در آن محرک‌های فیزوالکتریک به‌عنوان اعضای اصلی مدولاسیون نیروی نگه‌دارنده برای طراحی میراگر به‌کار می‌رود. این سیستم کنترلی در یک مدل آزمایشی ساختمان پنج طبقه که در هر طبقه یک میراگر اصطکاکی متغیر نصب شده بود، مورد استفاده قرار گرفت.^[۶] در سال ۲۰۰۱ یک میراگر اصطکاکی فیزوالکتریک پیشنهاد شد و آزمایشاتی نیز بر روی آن انجام گرفت.^[۷] همانند طراحی سیستم‌های VFDS، محرک فیزوالکتریک برای تنظیم نیروی نگه‌دارنده به کار می‌رود. در این میراگر، نیروی اصطکاکی قادر است به‌صورت پیوسته و از طریق ولتاژ ورودی به محرک فیزوالکتریک تغییر کند. میراگر اصطکاکی فیزوالکتریک به‌صورت عملی بر روی میز لرزان و به‌منظور کنترل نیمه‌فعال یک مدل ساختمانی سه طبقه و با الگوریتم‌های کنترلی پیشنهادی مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج این آزمایش نشان داد که محرک فیزوالکتریک به‌خوبی می‌تواند تغییرات فعال و فوری نیروی اصطکاکی را در فرکانس‌های کنترلی بالا تأمین کند.

اخیراً، در سال ۲۰۰۴، محققان یک ساختمان چندطبقه‌ی لرزه‌ی را که مجهز به میراگر اصطکاکی متغیر بود با استفاده از کنترل پیش‌بینی‌کننده مورد آزمایش قرار دادند. از دیگر مطالعات صورت گرفته بر روی میراگر اصطکاکی متغیر می‌توان به کنترل نیمه‌فعال دو ساختمان مرتبط (۲۰۰۶) اشاره کرد.^[۴] نتایج حاصل از این مطالعه نشان می‌دهد که این روش می‌تواند سبب کاهش پاسخ لرزه‌ی هر دو سازه شود. در سال ۲۰۰۶ از الگوریتم کنترل H_∞ و سیستم اصطکاکی متغیر در سازه‌های جداسازی شده‌ی هوشمند استفاده شد.^[۸] این الگوریتم می‌تواند به ایجاد تغییرات ثابت در نیروی اصطکاکی و عملکرد بهینه‌ی میراگر در کاهش پاسخ سازه تحت زلزله‌های حوزه‌ی نزدیک بینجامد. در همین راستا در سال ۲۰۰۷ نیز کنترل لرزه‌ی یک سازه با سیستم جداسازی شده‌ی هوشمند توسط میراگرهای متغیر نیمه‌فعال مورد بررسی قرار گرفت.^[۸]

در مطالعه‌ی دیگری که اخیراً (در سال ۲۰۰۷) بر روی میراگر اصطکاکی متغیر انجام گرفته، تأثیر این میراگر به‌همراه یک سیستم جداسازی شده در حفاظت لرزه‌ی تجهیزات حساس مورد بررسی قرار گرفته است.^[۹] براساس این مطالعات، سیستم جداسازی هوشمند (SIS) که ترکیبی است از یک سکوی جداسازی همراه با دستگاه اصطکاکی متغیر، به‌منظور بهبود عملکرد جداسازی لرزه‌ی مورد استفاده در حفاظت تجهیزات حساس پیشنهاد می‌شود. در این سیستم نیروی لغزشی میراگر متغیر در پاسخ به تحریکات خارجی، توسط کنترل‌کننده قابل تنظیم است. در حین زلزله، دستگاه اصطکاکی متغیر تأمین‌کننده‌ی نیروی استهلاکی قابل تطبیق به‌منظور کاهش پاسخ تجهیزات جداسازی شده برای سیستم جداساز هوشمند (SIS) است.

از طرف دیگر براساس مطالعات انجام شده در اوایل دهه‌ی ۹۰ در مورد کاربرد استراتژی کنترل نیمه‌فعال براساس روش‌های محدوده‌ی فرکانسی به‌منظور کنترل بهینه‌ی سازه‌های مهندسی، الگوریتم کنترل H_∞ (نوعی از کنترل روبااست^[۵]) به‌عنوان الگوریتمی مؤثر در کنترل نیمه‌فعال پاسخ سازه‌ها معرفی شد.^[۱۰] الگوریتم کنترل H_∞ یک روش کنترل دوطرفه است که در آن نیروی کنترلی و تحریکات خارجی به‌طور هم‌زمان در نظر گرفته می‌شود تا نرم بی‌نهایت تابع تبدیل را بین ورودی تحریکات و دسته‌ی از خروجی‌های تنظیم شده قرار دهد.

این الگوریتم، به‌دلیل ویژگی‌های خاص، در بسیاری از سیستم‌های کنترل سازه و به‌منظور کاهش پاسخ سازه مورد استفاده قرار می‌گیرد. به‌طور مثال، در سال ۲۰۰۴ یانگ و لین انرژی کنترل H_∞ و پایداری آن برای سازه‌های مهندسی و همچنین استراتژی‌های کنترل بر مبنای این الگوریتم را به‌منظور استفاده‌ی سازه‌های مهندسی عمران مورد بررسی قرار دادند.^[۱۰] از جمله کاربردهای مهم الگوریتم بهینه‌ی H_∞ که

که در آن $x(t)$ بردار تغییر مکان، M ، C و K به ترتیب ماتریس‌های جرم، میرایی و سختی، H ماتریس مکان کنترل‌کننده و η اثر ماتریس ضریب تحریکات است. $u(t)$ و $w(t)$ نیز به ترتیب بردار نیروی کنترلی و اختلالات است. برای سازه‌یی که تحت اثر زلزله است، $w(t) = \bar{x}(t)$ است که نمایانگر شتاب زلزله است. رابطه‌ی ۴ در فرم فضای حالت به صورت رابطه‌ی ۵ بیان می‌شود:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + E\ddot{u}_g(t) \quad (5)$$

که در آن $x(t)$ متغیر حالت سیستم و A ، B و E ماتریس‌های حالت سیستم هستند که از روابط ۶ و ۷ به دست می‌آیند:

$$A = \begin{bmatrix} \Lambda & I \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{bmatrix} \text{ و } B = \begin{bmatrix} 0 \\ M^{-1}\Lambda \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$E = - \begin{bmatrix} 0 \\ \Gamma \end{bmatrix} \quad (7)$$

مقادیر Λ و Γ مثلاً برای یک مدل سه‌درجه آزادی از طریق رابطه‌ی ۸ محاسبه می‌شود:

$$\Lambda = \begin{bmatrix} \Lambda & 0 & 0 \end{bmatrix}^T \text{ و } \Gamma = \begin{bmatrix} \Gamma & \Gamma & \Gamma \end{bmatrix}^T \quad (8)$$

در نهایت، مسئله‌ی الگوریتم کنترل H_∞ ، یافتن کنترل‌گری $K(s)$ است که با در نظر گرفتن γ داده شده و تابع تبدیل $T(s)$ ، بتواند رابطه‌ی ۹ را ارضا کند:

$$\|T(s)\|_\infty < \gamma \quad (9)$$

γ یک پارامتر عددی مثبت است که توسط طراح و به منظور تضمین این نکته که نرخ خروجی نسبت به ورودی تحت مقدار معین و از پیش تعیین‌شده محدود شود، انتخاب می‌شود.

مدل‌سازی و بیان مسئله

۱. مدل مطالعاتی

مشخصات دینامیکی تجهیزات از قبیل سختی یا میرایی ممکن است تصمیم‌گیری در مورد مدل‌سازی و روش طراحی سیستم جداسازی آنها را تحت تأثیر قرار دهد. براین اساس در سال ۱۹۹۸، آلمانان پارامترهای پاسخ بلوک صلب و روسازه‌ی انعطاف‌پذیر (با دوری تناوب ۰٫۵ ثانیه) با جداساز FPS جداسازی شده را مقایسه کرد. نتایج کار آنها نشان می‌دهد که اختلاف بین تغییر مکان جداساز برای هر دو نوع روسازه خیلی کم است. اگرچه بیشتر اعضای تجهیزات صلب‌اند، در صورت انعطاف‌پذیری باز هم اثر قابل ملاحظه‌یی بر پاسخ سیستم جداسازی ندارد.^[۱۲] بنابراین در تجهیزات جداسازی شده، پاسخ سیستم جداسازی لرزه‌یی با دقت قابل قبولی با فرض «تجهیزات + کف کاذب» به صورت جرم صلب به دست می‌آید. از طرف دیگر براساس مطالعات انجام‌شده در سال ۲۰۰۲ بر روی انواع جداسازها، برای روسازه‌های نه‌چندان انعطاف‌پذیر (مثلاً ساختمان‌های چندطبقه) می‌توان روسازه را به صورت صلب مدل کرد که در این صورت پاسخ تغییرمکان جداساز و شتاب روسازه با دقت بالایی با پاسخ مدل واقعی مطابقت دارد.^[۱۳]

در سال ۲۰۰۶ مورد بررسی و استفاده قرار گرفته، سازه‌های دارای سیستم جداسازی شده‌ی هوشمند و همراه با سیستم‌های کنترلی نیمه‌فعال متغیر (نظیر میراگرهای اصطکاکی متغیر) است که برای کاهش پاسخ سازه استفاده شده است.^[۸]

در این مطالعه، حفاظت تجهیزات حساس داخل ساختمان در برابر زلزله، به‌عنوان اعضای که ممکن است در زلزله خسارت ببینند و تبعات ناشی از خسارات آنها جبران‌ناپذیر باشند، مورد بررسی قرار گرفته است. روش حفاظت مورد مطالعه براساس روش کف کاذب، که در مقدمه از آن به‌عنوان یکی از روش‌های مؤثر در حفاظت تجهیزات داخل ساختمان یاد شد، و با استفاده از میراگر اصطکاکی متغیر و استراژی کنترل نیمه‌فعال مؤثر H_∞ است که تحت کنترل قرار گرفته و پس از بررسی پاسخ سیستم، انتظار می‌رود میراگر متغیر همراه با الگوریتم H_∞ پاسخ تجهیزات را به‌خوبی کاهش دهد.

مسئله‌ی کنترل H_∞

برای بیان مسئله‌ی H_∞ ، سیستمی با نمودار بلوکی نشان داده شده در شکل ۲ را در نظر می‌گیریم. فرض می‌شود G یک سیستم خطی ثابت زمانی، w ورودی اختلالات، u ورودی کنترل، y متغیر اندازه‌گیری شده و بالاخره z متغیر عملکرد است که باید کمینه شود. ساختار کنترل سیستم نشان داده شده در شکل ۲ به صورت رابطه‌ی ۱ قابل بیان است:

$$\begin{bmatrix} z \\ y \end{bmatrix} = G(s) \begin{bmatrix} w \\ u \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11}(s) & G_{12}(s) \\ G_{21}(s) & G_{22}(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w \\ u \end{bmatrix} \quad (1)$$

در این حالت قانون کنترل عبارت است از:

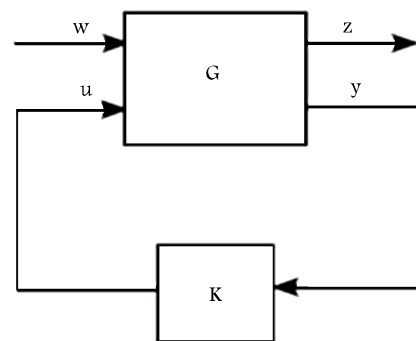
$$u = k(s)y \quad (2)$$

تمام ورودی‌های خارجی همانند سیگنال منبع، اختلالات، آشفتگی سیستم و اغتشاش حس‌گرها درون متغیر اختلال (w) تعریف می‌شود. متغیر عملکرد (z) نیز متشکل از متغیرهایی نظیر خطای ردیابی و ورودی محرک‌ها است. مسئله‌ی کنترل H_∞ ، یافتن کنترل‌گری (k) است که سیستم را چنان پایدار کند که اثر اختلالات w بر متغیر عملکرد (z) کمینه شود. تابع $T(s)$ بیان‌گر تابع تبدیل سیستم حلقه بسته از w تا z است.^[۱۱]

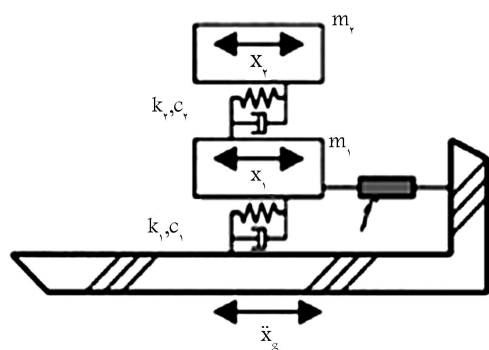
$$T(s) = G_{11} + G_{12}k(I - G_{22}k)^{-1}G_{21} \quad (3)$$

در حالت کلی، معادله‌ی حرکت یک سیستم را می‌توان چنین نشان داد:

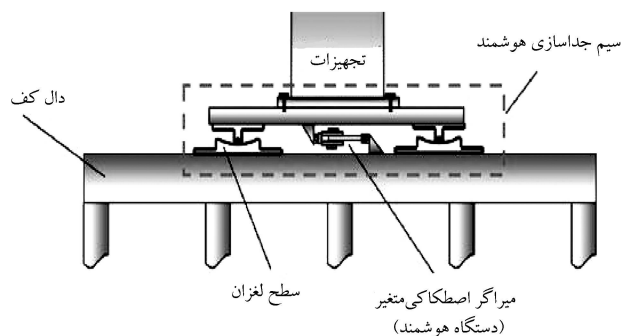
$$M\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + Kx(t) = Hu(t) + \eta w(t) \quad (4)$$



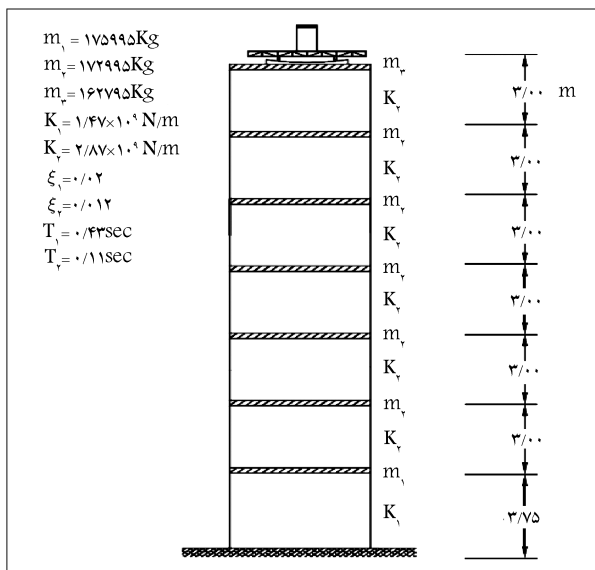
شکل ۲. ساختار کلی مسئله‌ی کنترل H_∞ .



شکل ۴. نمایش فضای حالت مدل.



شکل ۳. مدل شماییک سیستم جداسازی هوشمند (SIS).



شکل ۵. مدل ساختمان مورد مطالعه.

زلزله، مشخصات سازه‌یی را که تجهیزات داخل آن قرار دارد، باید مورد مطالعه قرار داد.^[۱۲] بدین منظور در این مطالعه از مدل سازه‌یی در نظر گرفته شده برای بررسی عملکرد سیستم SCF در جداسازی تجهیزات داخلی، استفاده شده است. مشخصات ساختمان استفاده شده که یک ساختمان هفت طبقه است، نظیر ماتریس‌های جرم، سختی و میرایی، در شکل ۵ ارائه و همچنین مشخصات مدل تجهیزات و کف کاذب مورد مطالعه در جدول ۱ بیان شده است.

در این مطالعه شتاب‌نگاشت زلزله‌های السترو (۱۹۴۰)، کوبه (۱۹۹۵)، نورتریج (۱۹۹۴) و طبس (۱۹۷۸) به‌عنوان زلزله‌ی وارده به سازه مورد بررسی قرار گرفته‌اند. برای بررسی تأثیر طبقات در پاسخ لرزه‌یی تجهیزات، پاسخ طبقات چهارم و هفتم سازه به‌عنوان ارتعاشات ورودی برای تجهیزات مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۳. مدل رایانه‌یی

مدل مطالعاتی شامل یک مدل دو درجه آزادی است که تحت شتاب طبقات چهارم و هفتم سازه‌یی قرار دارد و در معرض زلزله قرار گرفته است. برای مدل‌سازی رایانه‌یی از نرم‌افزار Matlab استفاده شده است. در برنامه‌نویسی از معادله‌ی حالت سیستم استفاده شده و خروجی‌های سیستم (شامل تغییرمکان، سرعت و شتاب) تحت زلزله‌های مختلف به دست آمده است.

در این مطالعه از مدل «تجهیزات + کف کاذب» که لامبرو و کنستانتینو روی مراکز رایانه‌یی ارائه داده‌اند، استفاده شده است. تجهیزات که به صورت یک درجه آزادی بر روی کف کاذب مدل می‌شود دارای فرکانس اصلی ۴۰ هرتز است که با مطالب قبلی مبنی بر مدل صلب برای تجهیزات مطابقت دارد.^[۱۲] با در نظر گرفتن سیستم جداسازی هوشمند که در شکل ۳ نشان داده شد، در این مطالعه فرض می‌شود عملگر استراتژی نیمه‌فعال با استفاده از میراگر اصطکاکی متغیر و الگوریتم H_∞ برای حفاظت لرزه‌یی تجهیزات مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این کار محدودیت نیروی عملگر و همچنین اثر تأخیر زمانی در نظر گرفته نشده است.

۲. مدل ریاضی برای تحلیل

یک مدل دو درجه آزادی به منظور طرح کنترل در نظر گرفته شده است. رفتار تجهیزات و کف کاذب جداسازی شده، هر دو، خطی فرض شده است. نمایش معادلات حرکت در فضای حالت برای سیستم جداسازی لرزه‌یی در شکل ۴ نشان داده شده است.

$$\dot{X} = AX + BU + E\ddot{x}_f \quad (10)$$

$$X = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & \dot{x}_1 & \dot{x}_2 \end{bmatrix}^T \quad (11)$$

که در این رابطه x_1 و x_2 به ترتیب تغییر مکان کف کاذب و تجهیزات نسبت به زمین، \ddot{x}_f و u نیروی کنترل اعمالی عملگر و شتاب طبقه، m_1 ، m_2 ، k_1 ، k_2 ، c_1 و c_2 جرم، سختی و ضریب میرایی برای کف کاذب و تجهیزات است.

$$A = \begin{pmatrix} [0] & [I] \\ M^{-1}K & -M^{-1}C \end{pmatrix} \quad (12)$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1/m_1 & 0 \end{bmatrix}^T \quad (13)$$

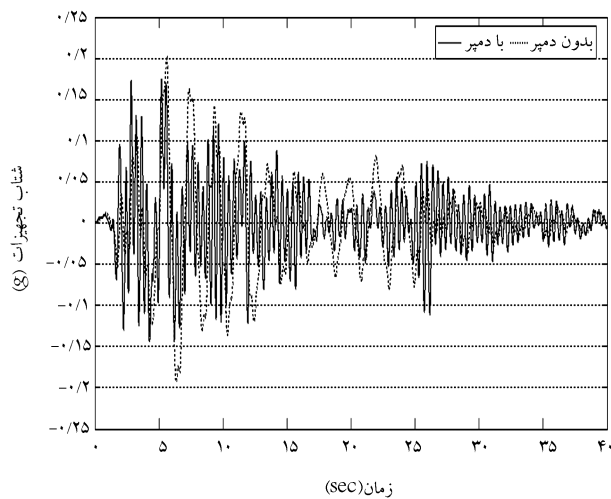
$$E = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 & -1 \end{bmatrix}^T \quad (14)$$

$$M = \begin{pmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{pmatrix} \quad (15)$$

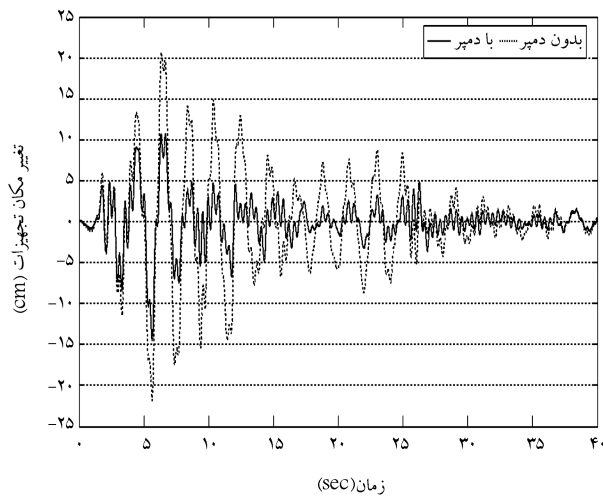
$$K = \begin{pmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 \end{pmatrix} \quad (16)$$

$$C = \begin{pmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 \\ -c_2 & c_2 \end{pmatrix} \quad (17)$$

نیروی وارد بر تجهیزات داخل ساختمان علاوه بر این که به موج زلزله‌ی وارده بستگی دارد، به مشخصات سازه‌یی داخل آن نیز وابسته است. لذا علاوه بر شتاب‌نگاشت



شکل ۶. مقایسه‌ی پاسخ شتاب تجهیزات در حالت کنترل شده و کنترل نشده (زلزله‌ی السنترو - طبقه‌ی چهارم).



شکل ۷. مقایسه‌ی پاسخ تغییر مکان تجهیزات در حالت کنترل شده و کنترل نشده (زلزله‌ی السنترو - طبقه‌ی چهارم).

۶ تا ۷ ثانیه، بیش از ۶۰٪ است که این امر گویای عملکرد کاملاً مؤثر سیستم میراگر اصطکاکی متغیر تحت الگوریتم کنترل H_{∞} است. این میزان کاهش با توجه به شکل ۸ در سرعت نسبی سیستم نیز مشهود است.

نتایج به دست آمده تحت زلزله‌ی السنترو در طبقه‌ی هفتم و براساس اشکال ۹ و ۱۰ نیز بیان‌گر کاهش شتاب، جابه‌جایی و سرعت بیشینه بوده ولی از میزان آن کاسته شده است؛ این مطلب بیان‌گر کاهش اثر سیستم میراگر اصطکاکی متغیر تحت الگوریتم H_{∞} در طبقه‌ی بالاتر است که شتاب بیشتری دارد.

چنان که از نتایج به دست آمده در بالا مشاهده می‌شود، با استفاده از میراگر اصطکاکی متغیر و الگوریتم نیمه‌فعال H_{∞} به‌طور کلی پاسخ تجهیزات تحت زلزله‌ی السنترو برای هر دو طبقه‌ی چهارم و هفتم کنترل شده است. با استفاده از تحلیل‌های انجام‌شده این نتیجه حاصل شد که پاسخ شتاب، تغییر مکان و سرعت تجهیزات با استفاده از میراگر اصطکاکی متغیر و الگوریتم H_{∞} ، در مقایسه با سیستم جداسازی لرزه‌ی کاملاً مؤثر بوده و ضمن کاهش شتاب، هم‌زمان کاهش جابه‌جایی و سرعت را نیز به‌همراه دارد.

جدول ۱. مشخصات مدل تجهیزات + کف کاذب مورد مطالعه.

سیستم	مشخصات	مقادیر
کف کاذب	m_1 (Kg)	۲۶۳۱٫۵۳
	k_1 (N/m)	۲۵۹۴۶
	c_1 (N.sec/m)	۳۳۰٫۵
	ε_1	٪۲
	T_1 (sec)	۲
تجهیزات	m_2 (Kg)	۱۸۱٫۵
	k_2 (N/m)	۱۱۴۵۸۸۷۴
	c_2 (N.sec/m)	۱۸۲۴
	ε_2	٪۲
	T_2 (sec)	۰٫۲۵

بررسی نتایج

پاسخ لرزه‌ی تجهیزات علاوه بر این که به مشخصات موج زلزله بستگی دارد، به مشخصات دینامیکی سازه‌ی که در آن قرار گرفته‌اند نیز وابسته است. در این موارد پاسخ لرزه‌ی سازه به‌منزله‌ی ارتعاشات ورودی به تجهیزات عمل می‌کند. در این بخش اثر میراگر اصطکاکی متغیر با الگوریتم H_{∞} در پاسخ سیستم «تجهیزات + کف کاذب» مورد بررسی و مقایسه قرار می‌گیرد. بدین ترتیب که میراگر نیمه‌فعال به کف کاذب متصل شده و قسمتی از میرایی انرژی ورودی را به عهده می‌گیرد؛ البته میزان جذب انرژی ورودی بستگی به شکل حلقه‌های هیستریزس میراگر و کل سیستم دارد.

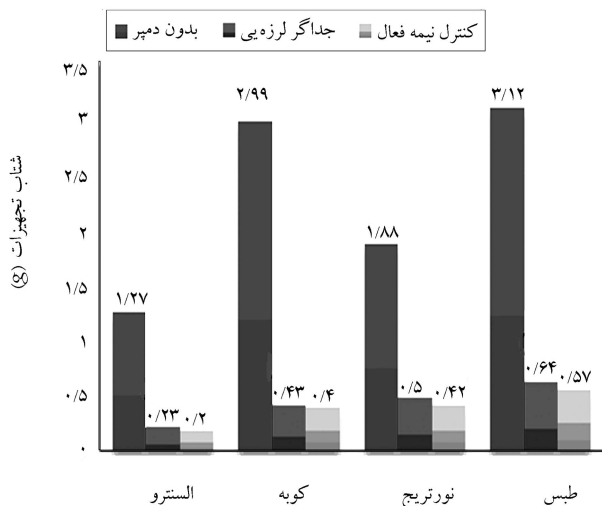
ابتدا نتایج پاسخ تجهیزات با جداساز لرزه‌ی بدون میراگر که بر روی کف کاذب قرار دارد، برای زلزله‌ی السنترو و کوبه، در طبقات چهارم و هفتم، مورد بررسی قرار گرفت. نتایج به دست آمده نشان داد که جداساز با دوره تناوب ۲ ثانیه به‌خوبی توانسته است پاسخ شتاب تجهیزات را به‌مقدار قابل ملاحظه‌ی کاهش دهد. با توجه به نتایج به دست آمده معلوم شد که پاسخ تغییر مکان کف کاذب که روی جداساز لرزه‌ی قرار گرفته، قابل ملاحظه است که این مسئله باعث محدودیت کاربرد جداسازهای لرزه‌ی می‌شود.

نتایج پاسخ سیستم برای زلزله السنترو

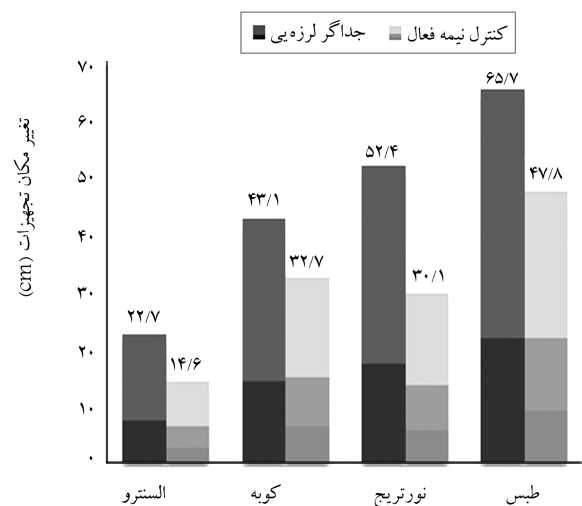
در این بخش، پس از آن که عملکرد تجهیزات بر روی کف کاذب که زیر آن میراگر اصطکاکی متغیر قرار گرفته تحت زلزله‌های یادشده مورد بررسی قرار گرفت، به بحث در مورد نتایج سیستم تحت زلزله‌ی السنترو می‌پردازیم. در این بررسی پارامترهایی مانند پاسخ شتاب تجهیزات، تغییر مکان نسبی آن به طبقه و سرعت نسبی آن به طبقه، در طبقات چهارم و هفتم با سیستم‌های جداسازی شده مورد مقایسه قرار گرفته است.

شکل ۶ بیان‌گر کاهش دامنه‌ی پاسخ شتاب بیشینه به میزان ۲۰٪ تحت زلزله‌ی السنترو است، در حالی که جابه‌جایی سیستم به‌نحو قابل توجهی کاهش یافته است (شکل ۷).

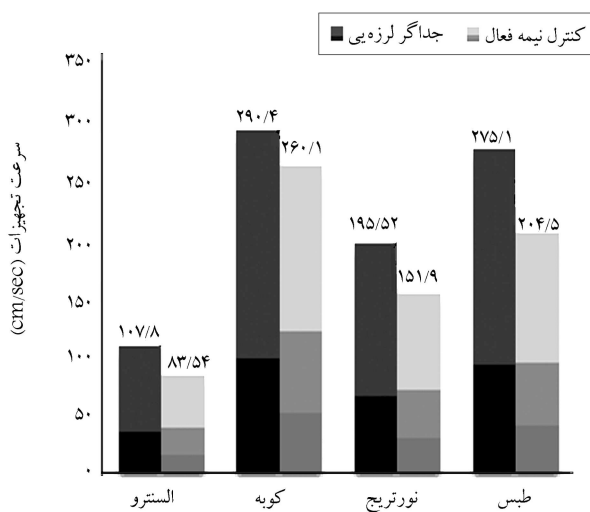
شکل ۷ بیان‌گر آن است که کاهش میزان جابه‌جایی حداکثر در زمان‌های حدود



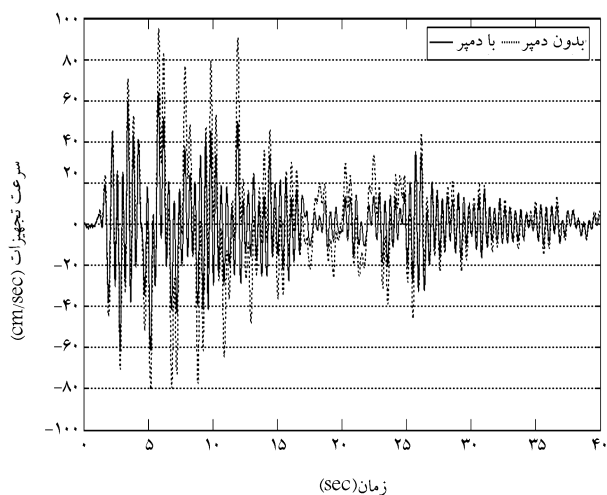
شکل ۱۱. مقایسه‌ی پاسخ شتاب بیشینه‌ی تجهیزات (طبقه‌ی هفتم).



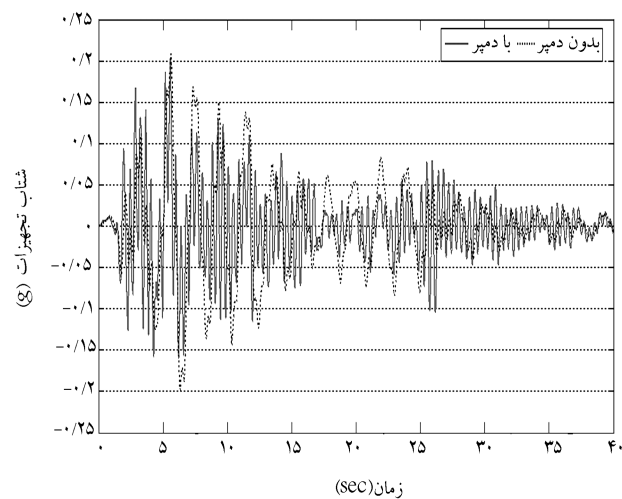
شکل ۱۲. مقایسه‌ی پاسخ تغییر مکان بیشینه‌ی تجهیزات (طبقه‌ی هفتم).



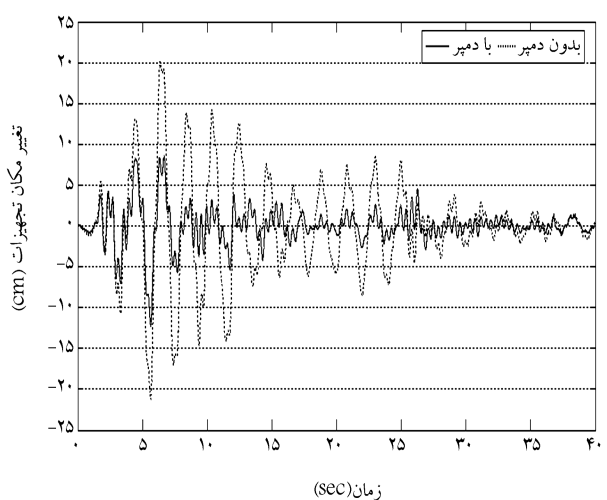
شکل ۱۳. مقایسه‌ی پاسخ سرعت بیشینه‌ی تجهیزات (طبقه‌ی هفتم).



شکل ۸. مقایسه پاسخ سرعت تجهیزات در حالت کنترل شده و کنترل نشده (زلزله السنترو- طبقه چهارم).



شکل ۹. مقایسه‌ی پاسخ شتاب تجهیزات در حالت کنترل شده و کنترل نشده (زلزله‌ی السنترو - طبقه‌ی هفتم).



شکل ۱۰. مقایسه‌ی پاسخ تغییر مکان تجهیزات در حالت کنترل شده و کنترل نشده (زلزله‌ی السنترو - طبقه‌ی هفتم).

در حفاظت تجهیزات داخل ساختمان ذکر شد. برای این منظور، با استفاده از میراگر اصطکاکی متغیر و استراتژی کنترل نیمه فعال H_∞ پاسخ سیستم بررسی شد. به منظور بررسی تأثیر طبقات در پاسخ لرزه‌ی تجهیزات، پاسخ طبقات چهارم و هفتم سازه به عنوان ارتعاشات ورودی برای تجهیزات مورد بررسی قرار گرفت. نتایج به دست آمده نشان داد که جداسازی لرزه‌ی به میزان قابل توجهی پاسخ شتاب تجهیزات را کاهش داده اما سبب افزایش پاسخ تغییر مکان و سرعت می‌شود.

همچنین این بررسی‌ها نشان داد که: ۱. کنترل نیمه فعال با استفاده از میراگر اصطکاکی متغیر به خوبی توانسته است پاسخ سیستم جداساز لرزه‌ی را بهبود بخشد و ضمن کاهش تغییر مکان جانبی جداساز، شتاب را نیز کاهش دهد. ۲. عملکرد سیستم میراگر اصطکاکی متغیر با الگوریتم H_∞ در کاهش شتاب برای زلزله‌های الاسترو و نورتریج که در مقایسه با زلزله‌ی کوبه سطح شتاب کم‌تری دارند، بهتر است. ۳. عملکرد سیستم مورد نظر در کاهش پاسخ تغییر مکان و سرعت تحت تمامی زلزله‌ها مؤثر است.

در نهایت با توجه به بررسی‌های انجام شده، مطابق انتظار مشخص شد که میراگر اصطکاکی متغیر همراه با الگوریتم کنترل H_∞ و با در نظر گرفتن اثر اختلافات بیرونی پاسخ شتاب، تغییر مکان و سرعت تجهیزات را برای هر دو طبقه به خوبی کاهش داده و عملکرد مؤثری دارد.

نکته‌ی کلی در مورد عملکرد سیستم این است که برای زلزله‌ی الاسترو عملکرد میراگر اصطکاکی متغیر در کاهش شتاب بیشینه و مخصوصاً جابه‌جایی جانبی و سرعت بسیار مؤثر است. در حالی که برای زلزله‌ی کوبه که سطح شتاب آن بیش از زلزله‌ی الاسترو است عملکرد میراگر اصطکاکی متغیر با الگوریتم H_∞ در کاهش شتاب بیشینه، تفاوت چندانی با سیستم جداسازی لرزه‌ی ندارد، اما در کاهش جابه‌جایی جانبی و سرعت که برای تجهیزات بسیار مهم است از کارایی بالایی برخوردار است. به منظور کنترل دقیق‌تر، به مقایسه‌ی پاسخ شتاب، تغییر مکان و سرعت سیستم با استفاده از میراگر متغیر و جداسازی لرزه‌ی برای طبقه‌ی هفتم و تحت هر چهار زلزله‌ی اشاره شده پرداخته‌ایم (شکل‌های ۱۱ تا ۱۳).

نتیجه‌گیری

در این مطالعه، حفاظت تجهیزات حساس داخل ساختمان در برابر زلزله به عنوان اعضای که ممکن است در زلزله خسارت ببینند و تبعات ناشی از خسارات آنها جبران‌ناپذیر باشند، مورد بررسی قرار گرفت. روش حفاظت مورد مطالعه براساس روش کف کاذب است که در مقدمه به عنوان یکی از روش‌های مؤثر

پانویس

1. Northridge
2. Izmit
3. raised floor
4. friction pandulum system (FPS)
5. Robust

منابع

1. Johnson, G.S., *Equipment and Systems. Earthquake Engineering Handbook*, Chapter 20, Chen W.F., Scawthorn C. (eds.), CRC Press, pp. 1-29 (2003).
2. Lambrou, V. and Constantinou, M.C. "Study of seismic isolation systems for computer floors", *Technical Report*, (NCEER-94-0020), pp.112-121 (July 1994).
3. Christenson, R.E., *Semi-active control of civil structures for natural hazard mitigation: Analytical and experimental studies*, M.Sc. thesis, University of Notre Dam, Indiana (2001).
4. NG, C.L. and XU, Y.L. "Semiactive control of a building complex with variable friction dampers", *Engineering Structure*, **40**, pp. 1-17 (2006).
5. Kannan, S.; Uras, H.M. and Aktan, H.M. "Active control of building seismic response by energy dissipation", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **24**, pp. 747-759 (1995).
6. Hirai, J.; Naruse, M. and Abiru, H. "Structural control with variable friction damper for seismic response", *Proceedings of 11th World Conference on Earthquake Engineering*, Acapulco, Mexico, pp. 886-893 (1996).
7. Garrett, G.T. and Chen, G.D. "Experimental characterization of piezoelectric friction dampers" *Proceedings of SPIE Symposium on Smart Structures and Materials: Smart Systems for Bridges, Structures, and Highways*, Bellingham, Wash., **4330**, pp. 405-414 (2001).
8. Narasimhan, S. and Nagarajaiah, S. "Smart base isolated buildings with variable friction systems: H_∞ controller and SAIVF device", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **35**, pp. 921-942 (2006).
9. Lu, L.Y. "Predictive control of smart isolation system for precision equipment subjected to near-fault earthquakes", *Engineering Structures*, pp. 1-20 (2007).

10. Liu, M. "Robust H_∞ control for uncertain delayed nonlinear systems based on standard neural network models", *Neurocomputing*, **71**, pp. 3469-3492 (2008).
11. Yang, J.N.; Lin, S. and Jabbari, F. " H_∞ -based control for civil engineering structures", *Structural Control and Health Monitoring*, **11**, pp. 223-237 (2004).
12. Almazan, J.L.; De La Llera, J.C. and Inaudi, J.A. "Modeling aspect of structural isolated with the frictional pendulum system", *Earthquake Engineering Structures*, **27**, pp. 845-867 (1998).
13. Kulkarni, J.A. and Jangid, R.S. "Rigid body response of base-isolated structures," *Journal of Structural Control*, **9**, pp. 171-188 (2001).
14. Hamidi, M. and El Naggar, M.H. "On the performance of SCF in seismic isolation of interior equipment of building", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **36**, pp. 1581-1604 (2007).