

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
دوری ۲۶-۲، 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 گیرد، 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 شده اند.

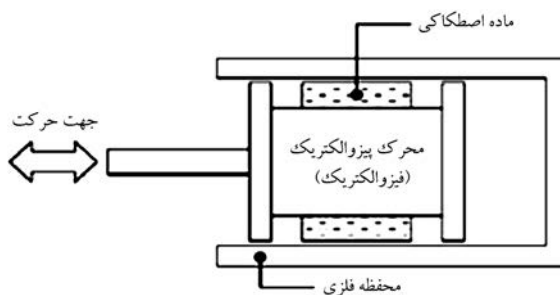
استراتژی کنترل نیمه فعال، بدون نیاز به منبع انرژی بزرگ موجب تطبیق پذیری عملکرد سیستم فعال در کاهش مؤثر پاسخ، در طول آرایش گسترده ی شرایط بارگذاری دینامیکی است، در حالی که استراتژی غیرفعال متضمن پایداری سیستم حین بارگذاری است. این دستگاه ها به منظور رفع نیاز به یک منبع انرژی خارجی، با نیروی بسیار کوچکی طراحی می شوند. به همین دلیل، فناوری کنترل نیمه فعال اخیراً به منظور کاهش پاسخ دینامیکی تجهیزات در معرض زلزله و باد به طور گسترده یی مورد مطالعه قرار گرفته است.^[۳]

از جمله سیستم های نیمه فعال که امروزه از آن استفاده می شود «میراگر اصطکاکی متغیر» (VFDS) است. این سیستم اغلب به عنوان یکی از مفاهیم عملی سیستم های کنترل نیمه فعال شناخته می شود 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 می کنند و می توانند تغییر مکان و جابه جایی نسبی کف تجهیزاتی را که تحت تحریکات لرزه یی قرار گرفتند کاهش دهند. میراگر اصطکاکی متغیر از محرک های فیزوالکتریک به عنوان تنظیم کننده نیروی اصطکاکی و متعاقب آن نیروی نگه دارنده استفاده می کند. وظیفه ی این میراگر، اداره ی سطح ولتاژ ورودی به محرک فیزوالکتریک برای کنترل نیروی نگه دارنده روی مصالح اصطکاکی است. در این میراگرها به طور کلی نیروی نگه دارنده با سطح ولتاژ متناسب است.

براساس مشخصه های ارزیابی شده ی میراگر اصطکاکی متغیر، میراگر با دو جزء و عنصر مدل می شود: فنر خطی و یک لغزنده ی اصطکاکی متغیر که به صورت سری به یکدیگر متصل اند. فنر خطی یک عضو کشسان را که متصل به دستگاه اصطکاکی است شبیه سازی می کند و توسط لغزنده ی اصطکاکی مدل می شود. شکل ۱ مدل شماتیک میراگر اصطکاکی متغیر را نشان می دهد.^[۴]

در میراگرهای اصطکاکی متغیر، برای این که میراگر بتواند در هر زلزله با شدت دلخواه فعال شود، نیروی تماسی نرمال (نیروی نگه دارنده) اعمال شده بر سطح اصطکاکی تنظیم می شود. بدین صورت میراگر اصطکاکی نیمه فعال می تواند بار لغزشی را در زمان واقعی در پاسخ به حرکت سازه یی و تحریکات خارجی تنظیم کند.

مطالعات و تحقیقات عملی صورت گرفته روی میراگر اصطکاکی متغیر برای کنترل سازه یی به اندازه ی مطالعات تحلیلی انجام شده نیست. در سال ۱۹۹۵ یک دستگاه مهار لغزشی فعال (ASBD) که در آن نیروی نگه دارنده از طریق یک سازوکار هیدرولیکی تنظیم می شود معرفی شد.^[۵] یکی دیگر از سیستم های 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 محرک های فیزوالکتریک به عنوان اعضای اصلی مدولاسیون نیروی نگه دارنده برای طراحی میراگر به کار می رود. 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 سیستم های VFDS، محرک فیزوالکتریک برای تنظیم نیروی نگه دارنده به کار می رود. در این میراگر، نیروی اصطکاکی قادر است به صورت پیوسته و از طریق ولتاژ ورودی به محرک فیزوالکتریک تغییر کند. میراگر اصطکاکی فیزوالکتریک به صورت عملی بر روی میز لرزان و به منظور کنترل نیمه فعال یک مدل ساختمانی سه طبقه و با الگوریتم های کنترلی پیشنهادی مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج این آزمایش نشان داد که محرک فیزوالکتریک به خوبی می تواند تغییرات فعال و فوری نیروی اصطکاکی را در فرکانس های کنترلی بالا تأمین کند.

اخیراً، در سال ۲۰۰۴، محققان یک ساختمان چند طبقه ی لرزه یی را که مجهز به میراگر اصطکاکی متغیر بود با استفاده از کنترل پیش بینی کننده مورد آزمایش قرار دادند. از دیگر مطالعات صورت گرفته بر روی میراگر اصطکاکی متغیر می توان به کنترل نیمه فعال دو ساختمان مرتبط (۲۰۰۶) اشاره کرد.^[۴] نتایج حاصل از این مطالعه نشان می دهد که این روش می تواند سبب کاهش پاسخ لرزه یی هر دو سازه شود. در سال ۲۰۰۶ از الگوریتم کنترل H_{∞} و سیستم اصطکاکی متغیر در سازه های جداسازی شده ی هوشمند استفاده شد.^[۸] این الگوریتم می تواند به ایجاد تغییرات ثابت در نیروی اصطکاکی و عملکرد بهینه ی میراگر در کاهش پاسخ سازه تحت زلزله های حوزه ی نزدیک بینجامد. در همین راستا در سال ۲۰۰۷ نیز کنترل لرزه یی یک سازه با سیستم جداسازی شده ی هوشمند توسط میراگرهای متغیر نیمه فعال مورد بررسی قرار گرفت.^[۸]

در مطالعه ی دیگری که اخیراً (در سال ۲۰۰۷) بر روی میراگر اصطکاکی متغیر انجام گرفته، تأثیر این میراگر به همراه یک سیستم جداسازی شده در حفاظت لرزه یی 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، به منظور بهبود عملکرد جداسازی لرزه یی مورد استفاده در حفاظت تجهیزات حساس پیشنهاد می شود. در این سیستم نیروی لغزشی میراگر متغیر در پاسخ به تحریکات خارجی، توسط کنترل کننده قابل تنظیم است. در حین زلزله، دستگاه اصطکاکی متغیر تأمین کننده ی نیروی استهلاکی قابل تطبیق به منظور کاهش پاسخ تجهیزات جداسازی شده برای سیستم جداساز هوشمند (SIS) است.

از طرف دیگر براساس مطالعات انجام شده در اوایل دهه ی ۹۰ در مورد کاربرد استراتژی کنترل نیمه فعال براساس روش های محدوددهی فرکانسی به منظور کنترل بهینه ی سازه های مهندسی، الگوریتم کنترل H_{∞} (نوعی از کنترل روبااست^[۵]) به عنوان الگوریتمی مؤثر در کنترل نیمه فعال پاسخ سازه ها معرفی شد.^[۱۰] الگوریتم کنترل H_{∞} یک روش کنترل دوطرفه است که در آن نیروی کنترلی و تحریکات خارجی به طور هم زمان در نظر گرفته می شود تا نرم بی نهایت تابع تبدیل را بین ورودی تحریکات و دسته یی از خروجی های تنظیم شده قرار دهد.

این الگوریتم، به دلیل ویژگی های خاص، در بسیاری از سیستم های کنترل سازه و به منظور کاهش پاسخ سازه مورد استفاده قرار می گیرد. به طور مثال، در سال ۲۰۰۴ یانگ و لین انرژی کنترل H_{∞} و پایداری آن برای سازه های مهندسی و همچنین استراتژی های کنترل بر مبنای این الگوریتم را به منظور استفاده ی سازه های مهندسی عمران مورد بررسی قرار دادند.^[۱۰] از جمله کاربردهای مهم الگوریتم بهینه ی 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:

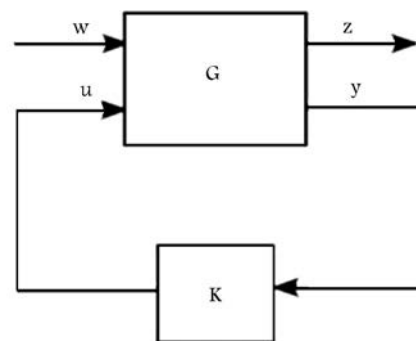
$$u = k(s)y \quad (2)$$

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]

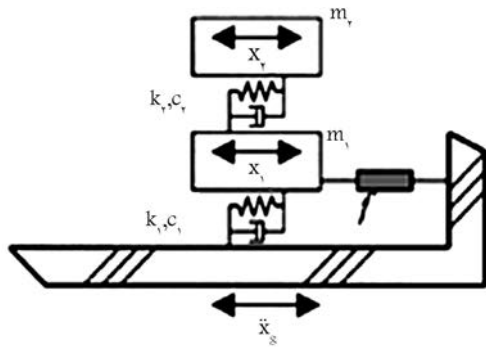
$$T(s) = G_{11} + G_{12}k(I - G_{22}k)^{-1}G_{21} \quad (3)$$

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

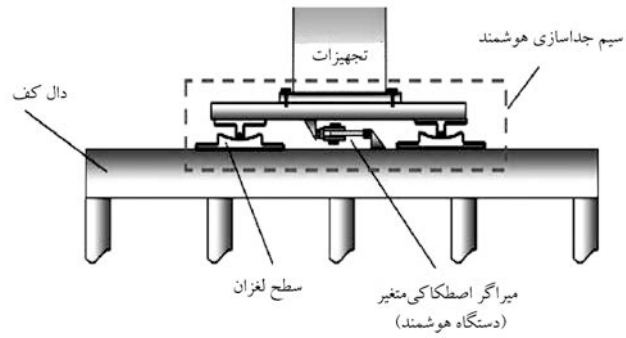
$$M\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + Kx(t) = Hu(t) + \eta w(t) \quad (4)$$



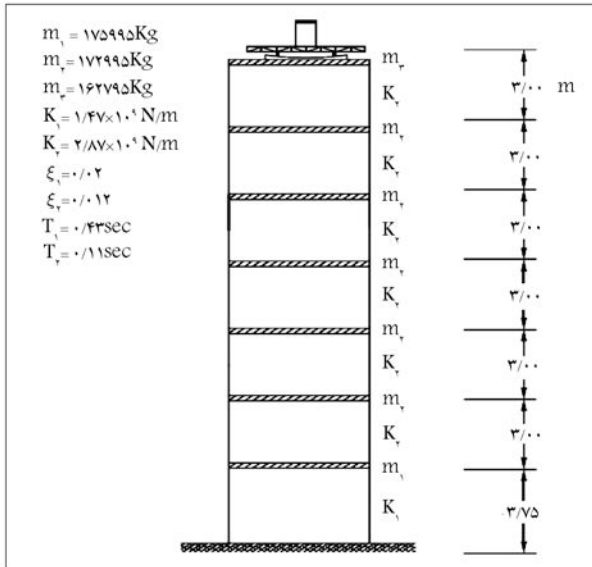
شکل ۲. ساختار کلی مسئله‌ی کنترل H_∞ .



شکل ۴. نمایش فضای حالت مدل.



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



$m_1 = 175995 \text{ Kg}$
 $m_2 = 172995 \text{ Kg}$
 $m_3 = 162795 \text{ Kg}$
 $K_1 = 1.47 \times 10^9 \text{ N/m}$
 $K_2 = 2.87 \times 10^9 \text{ N/m}$
 $\xi_1 = 0.02$
 $\xi_2 = 0.02$
 $T_1 = 0.47 \text{ sec}$
 $T_2 = 0.11 \text{ sec}$

شکل ۵. مدل ساختمان مورد مطالعه.

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 عملکرد 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.

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

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

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

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

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

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

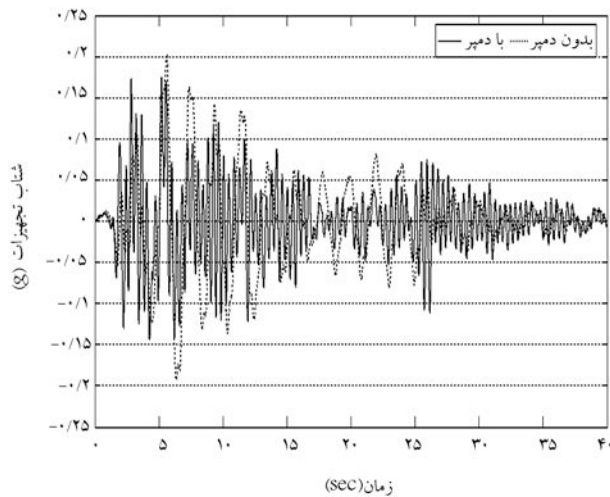
نیروی وارد بر تجهیزات داخل ساختمان علاوه بر این که به موج زلزله‌یی وارد بستگی دارد، به مشخصات سازه‌یی داخل آن نیز وابسته است. لذا علاوه بر شتاب‌نگاشت

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.

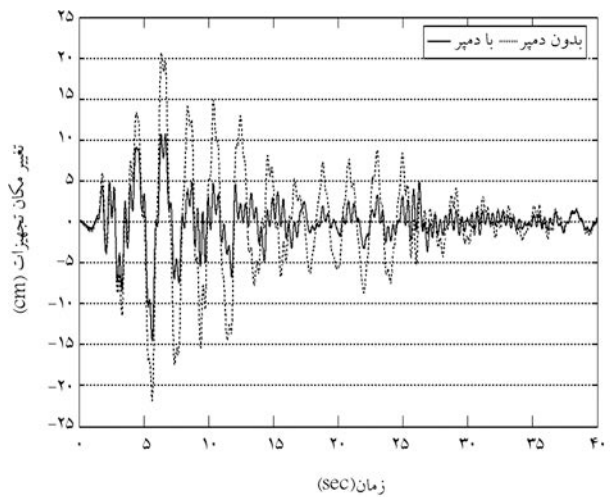
در این مطالعه شتاب‌نگاشت زلزله‌های السنترو (۱۹۴۰)، کوبه (۱۹۹۵)، نورتریج (۱۹۹۴) و طیس (۱۹۷۸) به عنوان زلزله‌یی وارد به سازه مورد بررسی قرار گرفته‌اند. برای بررسی تأثیر طبقات در پاسخ لرزه‌یی تجهیزات، پاسخ طبقات چهارم و هفتم سازه به عنوان ارتعاشات ورودی برای تجهیزات مورد بررسی قرار می‌گیرد.

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 تغییر مکان، سرعت و شتاب) تحت زلزله‌های مختلف به دست آمده است.



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



شکل ۷. مقایسه‌ی پاسخ تغییر مکان تجهیزات در حالت کنترل شده و کنترل نشده (زلزله‌ی السنسترو - 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 السنسترو 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 السنسترو 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 لرزه‌یی 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)	۰/۰۲۵

بررسی نتایج

پاسخ لرزه‌یی تجهیزات علاوه بر این که به مشخصات موج زلزله بستگی دارد، به مشخصات دینامیکی سازه‌یی که در آن قرار گرفته‌اند نیز وابسته است. در این موارد پاسخ لرزه‌یی 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.

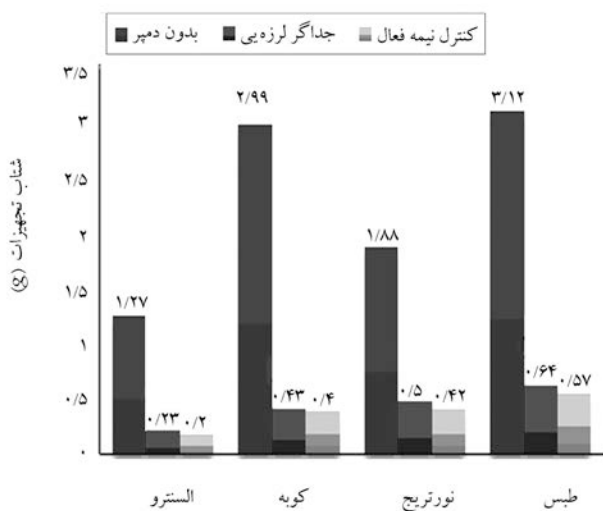
ابتدا نتایج پاسخ تجهیزات با جداساز لرزه‌یی و بدون میراگر که بر روی کف کاذب قرار دارد، برای زلزله‌ی السنسترو و کوبه، در طبقات چهارم و هفتم، مورد بررسی قرار گرفت. نتایج به دست آمده نشان داد که جداساز با دوره تناوب ۲ ثانیه به‌خوبی توانسته است پاسخ شتاب تجهیزات را به‌مقدار قابل ملاحظه‌یی کاهش دهد. با توجه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

نتایج پاسخ سیستم برای زلزله السنسترو

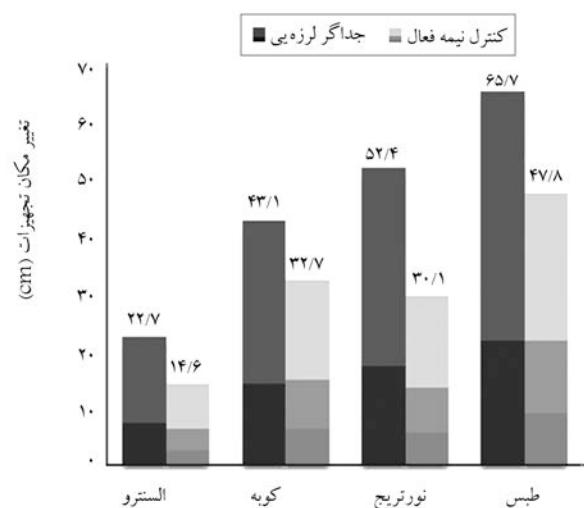
در این بخش، پس از آن که عملکرد تجهیزات بر روی کف کاذب که زیر آن میراگر اصطکاکی متغیر قرار گرفته تحت زلزله‌های یادشده مورد بررسی قرار گرفت، به بحث درمورد نتایج سیستم تحت زلزله‌ی السنسترو می‌پردازیم. در این بررسی پارامترهایی مانند پاسخ شتاب تجهیزات، تغییر مکان نسبی آن به طبقه و سرعت نسبی آن به طبقه، در 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 السنسترو است، در حالی که جابه‌جایی سیستم به‌نحو قابل توجهی کاهش یافته است (شکل ۷).

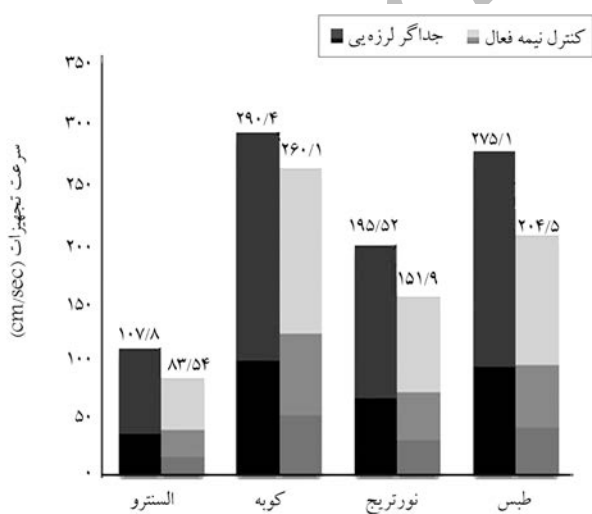
شکل ۷ بیان‌گر آن است که کاهش میزان جابه‌جایی حداکثر در زمان‌های حدود



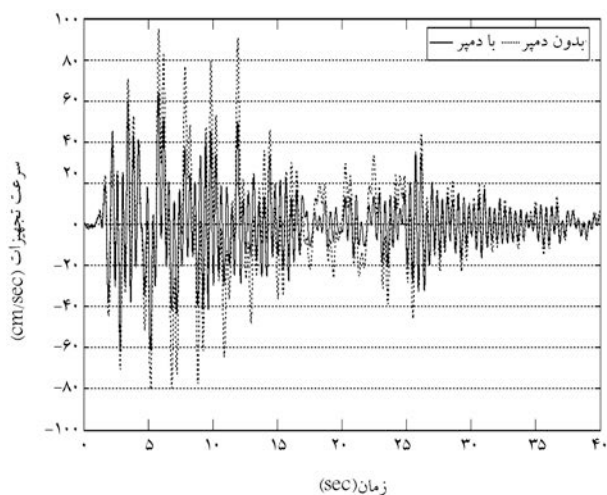
شکل ۱۱. مقایسه‌ی پاسخ شتاب بیشینه‌ی تجهیزات (طبقه‌ی هفتم).



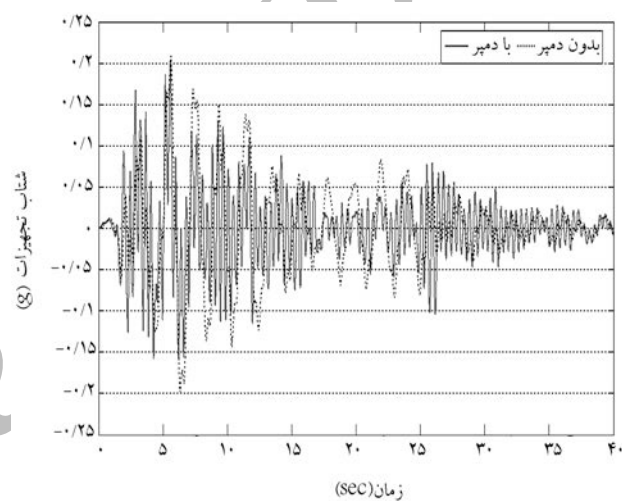
شکل ۱۲. مقایسه‌ی پاسخ تغییر مکان بیشینه‌ی تجهیزات (طبقه‌ی هفتم).



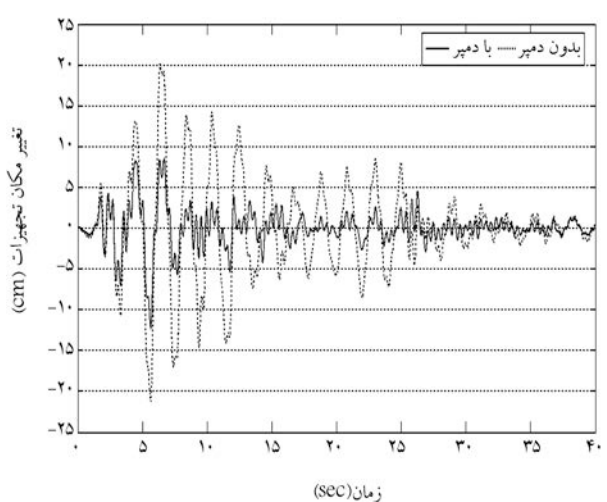
شکل ۱۳. مقایسه‌ی پاسخ سرعت بیشینه‌ی تجهیزات (طبقه‌ی هفتم).



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



شکل ۹. مقایسه‌ی پاسخ شتاب تجهیزات در حالت کنترل شده و کنترل نشده (زلزله استرو - طبقه هفتم).



شکل ۱۰. مقایسه‌ی پاسخ تغییر مکان تجهیزات در حالت کنترل شده و کنترل نشده (زلزله استرو - طبقه 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).