

# کنترل نیمه‌فعال سازه‌ی یک درجه آزادی به روش PID تحت تحریک زلزله با استفاده از میراگر MR

سید امیر کیوان قربانی تنها\*<sup>۱</sup>، فلیکس وبر<sup>۲</sup> و مسعود متولی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> استادیار دانشکده مهندسی عمران، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران

<sup>۲</sup> محقق ارشد گروه مهندسی سازه، آزمایشگاه‌های فدرال علم مواد و فناوری سوییس (EMPA)

<sup>۳</sup> استادیار دانشکده مهندسی عمران، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران و رئیس گروه مهندسی سازه،

آزمایشگاه‌های فدرال علم مواد و فناوری سوییس (EMPA)

(تاریخ دریافت: ۱۳۸۶/۱۰/۰۳، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده: ۱۳۹۰/۰۹/۲۰، تاریخ تصویب: ۱۳۹۰/۱۱/۲۳)

## چکیده

در این مقاله کنترل ارتعاشات یک سازه‌ی یک درجه آزادی تحت اثر تحریک زلزله به روش نیمه‌فعال و با استفاده از میراگر MR مورد مطالعه قرار گرفت. برای محاسبه نیروی کنترل از الگوریتم PID استفاده شده است. نتایج ارائه شده در این مقاله صرفاً مربوط به بخش شبیه‌سازی دینامیکی سازه‌ی مزبور در محیط سیمولینک است. مدل سازه، کنترل‌کننده و حسگرها در محیط سیمولینک ساخته شده و نتایج برای حالات کنترل نشده، کنترل شده با سیستم کنترل فعال ایده‌آل، کنترل شده با سیستم کنترل نیمه‌فعال ایده‌آل و کنترل شده با سیستم کنترل نیمه‌فعال واقعی به دست آمده و مورد مقایسه قرار گرفته است. این نتایج نشان می‌دهد که با استفاده از روش کنترل نیمه‌فعال می‌توان ارتعاشات سازه را به میزان چشمگیری کاهش داد به گونه‌ای که نتایج بسیار نزدیک به حالت کنترل فعال باشد.

**واژه‌های کلیدی:** کنترل ارتعاشات، کنترل نیمه‌فعال، الگوریتم کنترل PID، میراگر MR

## مقدمه

کوچکی ساخت و آن را روی بلبرینگ‌هایی قرار داد تا نشان دهد که یک سازه را می‌توان در برابر لرزش‌های ناشی از زلزله ایزوله کرد [۳].

در سال ۱۹۶۸، زوک<sup>۲</sup> [۱۰] سازه‌های متحرک را مورد بررسی قرار داد. بررسی‌های او شامل سازه‌های برگشت‌پذیر و کنترل استاتیکی بود. او خاطر نشان کرد که تنش تسلیم مصالح جدید دائماً در حال افزایش است ولی مدول الاستیسیته آن‌ها به نسبت مشابه با تنش تسلیم افزایش پیدا نمی‌کند. او نتیجه گرفت که سازه‌ها اگرچه مقاومت کافی دارند، دائماً انعطاف‌پذیرتر می‌شوند و در معرض تغییر شکل‌های بزرگ و ارتعاشات قرار می‌گیرند.

مثالی که زوک ارائه کرد، ایده استفاده از تاندون‌های کنترلی در یک سازه بود که ابتدا توسط فریسینه<sup>۳</sup> در حدود سال ۱۹۶۰ و پنج سال پس از آن توسط زتلین<sup>۴</sup> ارائه شده بود. این روش برای بزرگترین آنتن رادیویی دنیا - که

در رویکرد سنتی، سازه‌ها به گونه‌ای طراحی می‌شوند که در برابر باد و زلزله‌های خفیف تنها با عملکرد ارتجاعی خود مقاومت نمایند در صورتیکه به هنگام زلزله‌های متوسط و شدید اجازه داده می‌شود که اعضای سازه وارد مرحله‌ی غیرخطی شوند، اما باید ایستایی ساختمان کماکان حفظ شود. این فلسفه مبنای تدوین آیین‌نامه‌های ساختمانی مختلفی بوده که استفاده از آنها نتایجی موفقیت آمیز در پی داشته است. از آنجا که در عصر حاضر منابع طبیعی موجود با محدودیت مواجه است، فناوری کنترل سازه‌ها با هدف افزایش ایمنی و سرویس‌دهی ساختمان‌ها در برابر بار زلزله، باد و سایر بارهای دینامیکی مطرح شده، راه‌های جدیدی را برای حفاظت سازه‌ها در برابر بلایای طبیعی و غیرطبیعی ارائه می‌نماید [۹-۱].

ایده‌ی کنترل سازه‌ها به بیش از یکصد سال قبل باز می‌گردد. در آن زمان جان میلنه<sup>۱</sup> در ژاپن خانه چوبی

برای نیروی دریایی ایالات متحده در استرالیا ساخته شده بود و شامل شبکه‌ای از کابل‌ها در محدوده دو مایل بود - به کار رفت. کرنش سنج‌هایی به عنوان حسگر برای کنترل کشش مناسب و موقعیت این کابل‌ها به کار رفتند.

در سال ۱۹۷۲، یائو<sup>۵</sup> [۱۱] ایده کنترل سازه را مورد مطالعه قرار داد و سعی کرد که انگیزه استفاده از تئوری کنترل در طراحی سازه‌ها را در بین مهندسان سازه ایجاد کند. در حقیقت می‌توان گفت که تحقیقات او اولین تحقیقات اصولی در زمینه کنترل فعال بود.

در حدود سی سال قبل، در نیمه دوم دهه ۱۹۸۰، اولین مرحله تحقیقات در زمینه امکان پذیر بودن کنترل پاسخ لرزه‌ای سازه‌های مهندسی عمران پی‌گیری شد. در سال ۱۹۸۹ اولین کاربرد کنترل فعال در مقیاس واقعی در ساختمان کیوباشی سیوا<sup>۶</sup> ژاپن توسط شرکت کاجیما<sup>۷</sup> انجام گرفت و این آغاز دومین مرحله از تحقیقات در زمینه کنترل سازه‌ها، یعنی کاربرد کنترل در مقیاس واقعی و در سازه‌های واقعی بود که عمده‌تاً توسط سیستم‌های جرم کمکی کنترل شده به صورت فعال یا هیبرید انجام می‌شد. ساختمان کیوباشی سیوا، یک ساختمان ۱۱ طبقه در شهر توکیو و به ارتفاع ۳۳/۱ متر است که مساحت هر طبقه‌ی آن ۴۲۳ متر مربع است. سیستم کنترل این سازه از دو میراگر جرمی فعال تشکیل شده‌است.

در قرن بیست و یکم، تحقیقات در مورد کنترل پاسخ سازه‌های مهندسی عمران در حال حرکت به سمت سومین مرحله به منظور دستیابی به فناوری کنترل نیمه‌فعال در سازه‌ها است.

سیستم‌های کنترل نیمه‌فعال در اوایل دهه ۱۹۲۰ با ثبت اختراعاتی در زمینه‌ی کمک فنرهایی با درجه‌های متغیر ارائه شدند. در حیطه‌ی مهندسی سازه، اولین کاربرد کنترل سازه‌ای نیمه‌فعال برای سیستم‌ها در اثر بارهای محیطی توسط هروات و همکاران [۱۲] در سال ۱۹۸۳ مطرح شد. پیشرفت و انجام آزمایشات تجربی در زمینه سیستم‌های کنترل نیمه‌فعال به منظور کنترل پاسخ لرزه‌ای سازه‌ها، توسط محققین زیادی پی‌گیری شده‌است. یک سیستم کنترل نیمه‌فعال دارای خصوصیتی است که می‌توان آن‌ها را تنظیم کرد. در حقیقت یک سیستم کنترل نیمه‌فعال از یک

سیستم کنترل غیرفعال که خصوصیات مکانیکی آن را می‌توان تعدیل کرد نشأت می‌گیرد. این سیستم‌ها برای تغییر خصوصیات مکانیکی خود تنها به مقادیر مشخصی از انرژی نیاز دارند. خواص مکانیکی این سیستم‌ها ممکن است بر اساس بازخورد تحریک و (یا) پاسخ اندازه‌گیری شده سیستم تعدیل شود. به علاوه، آن‌ها نمی‌توانند به سیستم کنترل‌شده انرژی تزریق نمایند و بنابراین بر خلاف سیستم‌های کنترل فعال، نه تنها پتانسیل ناپایدار ساختن سیستم تحت کنترل را ندارند، بلکه چون نیروهای کنترل اعمالی در این سیستم‌ها مخالف با حرکت سازه است پایداری عمومی سازه را نیز افزایش می‌دهند [۵]. در حقیقت وسایل کنترل نیمه‌فعال، وفق‌پذیری سیستم‌های کنترل فعال را بدون نیاز به منبع انرژی بزرگ دارا هستند. بسیاری از این سیستم‌ها فقط با انرژی یک باتری کار می‌کنند که این امر به هنگام از کار افتادن منبع انرژی مربوطه (به خصوص به هنگام زلزله) مزیت بزرگی است.

مطالعات مبسوط نشان می‌دهد که سیستم‌های کنترل نیمه‌فعال اگر به طور مناسب مورد استفاده واقع شوند، بهتر از سیستم‌های غیرفعال عمل می‌کنند و پتانسیل دستیابی به اکثر کارایی‌های سیستم‌های کاملاً فعال را دارند [۴].

یکی از انواع مختلف وسایل کنترل نیمه‌فعال، میراگرهای با سیال مغناطیسی قابل کنترل یا به اختصار میراگرهای MR<sup>۸</sup> هستند که بسیاری از تلاش‌های فعلی در زمینه کنترل نیمه‌فعال سازه‌ها روی آنها متمرکز شده‌است. نتایج تحقیقات اولیه حاکی از امیدبخش بودن استفاده از این میراگرها در مهندسی عمران بوده‌است. مزیت میراگرهای با سیال قابل کنترل در مقایسه با سایر گونه‌های وسایل کنترل نیمه‌فعال در آن است که آن‌ها به جز یک پیستون، هیچ قسمت متحرک دیگری ندارند و به این دلیل خیلی ساده و قابل اطمینان هستند.

سیال MR که در ساخت این میراگرها به کار می‌رود در اواخر دهه‌ی ۱۹۴۰ کشف شد [۱۴]. اکتشاف این نوع سیال در همان دوره مورد توجه مقطعی قرار گرفت و تا اواخر قرن گذشته اطلاعات کمی در مورد این سیال به چاپ رسیده‌بود. سیالات MR از ذرات قطبی با سایز میکرونی پراکنده در یک سیال حامل مثل روغن سیلیکون یا معدنی تشکیل شده‌اند.

ایده‌آل، کنترل‌شده با سیستم کنترل نیمه‌فعال ایده‌آل و کنترل‌شده با سیستم کنترل نیمه‌فعال واقعی به دست آمده و مورد مقایسه قرار گرفته‌است.

## معادله‌ی حاکم بر حرکت سازه‌ی SDOF در حالات کنترل‌نشده و کنترل‌شده

قاب یک طبقه‌ای را تحت بار زلزله در نظر می‌گیریم. این قاب را می‌توان به صورت یک سازه‌ی SDOF مدل نمود که معادله‌ی حرکت آن، صرف نظر از میرایی سازه، به صورت زیر است [۲۰]:

$$m\ddot{x}(t) + kx(t) = f(t) \quad (1)$$

که در آن  $m$  جرم تعمیم‌یافته،  $k$  سختی تعمیم‌یافته،  $x(t)$  تغییر مکان سازه،  $f(t)$  بار مؤثر تعمیم‌یافته‌ی سازه،  $t$  زمان و  $d/dt = \dot{\quad}$  است. بر اساس محاسبات مبتنی بر تئوری دقیق، ۳۷/۵٪ از جرم ستون‌ها باید به جرم کف افزوده شود تا جرم تعمیم‌یافته‌ی مدل به دست آید، به علاوه، برای محاسبه‌ی نیروی مؤثر زلزله، ۵۰٪ از جرم ستون‌ها باید به جرم کف افزوده شود تا با حاصل ضرب نتیجه در شتاب پایه، نیروی مؤثر زلزله محاسبه گردد [۲۱]. در حالت کنترل‌شده، معادله‌ی حرکت سیستم به صورت زیر در می‌آید:

$$m\ddot{x}(t) + kx(t) = f(t) + f_c(t) \quad (2)$$

که در آن  $f_c(t)$  نیروی کنترل است.

## الگوریتم کنترل

در مطالعه‌ی حاضر، از کنترل‌کننده‌ی PID برای محاسبه‌ی نیروی کنترل استفاده شده‌است. در حالات مختلف مورد مطالعه که شامل کنترل فعال ایده‌آل، کنترل نیمه‌فعال ایده‌آل و کنترل نیمه‌فعال واقعی است، چنانچه نیروی کنترل محاسبه شده به روش PID توسط بکارانداز (در حالت کنترل‌فعال) و یا میراگر (در حالات کنترل

با اعمال میدان مغناطیسی، این ذرات به دنبال هم ردیف شده، زنجیره‌هایی به موازات میدان مغناطیسی تشکیل می‌دهند که باعث می‌شود سیال از حالت روان ویسکوالاستیک خطی به صورت یک سیال نیمه‌جامد درآید و رفتار پلاستیک از خود نشان دهد؛ در نتیجه، سیال دارای مقاومت تسلیم خواهد شد. با حذف میدان مغناطیسی، سیال به حالت اول خود باز می‌گردد. این پدیده در چند میلی‌ثانیه روی می‌دهد [۳، ۶-۷، ۱۳، ۱۵، ۱۶].

اولین اجرای میراگرهای MR در مقیاس واقعی در سال ۲۰۰۱ در ساختمان موزه‌ی ملی پیدایش علم و نوآوری توکیو انجام گرفت. در این ساختمان دو میراگر MR سی‌تی بین طبقات سوم و پنجم نصب شد [۷]. امروزه این نوع میراگر کاربردهای بسیاری در صنعت دارد که در زمینه مهندسی عمران، علاوه بر آنچه ذکر شد، به عنوان مثال می‌توان به کاربرد آن در کاهش ارتعاش کابل‌ها [۱۷]، کاهش ارتعاش سازه‌های مجاور از طریق اتصال آن‌ها به یکدیگر [۱۸] و کنترل ارتعاشات پل‌ها [۱۹] اشاره کرد.

یکی از پروژه‌های تحقیقاتی که در گروه مهندسی سازه آزمایشگاه‌های فدرال علم مواد و فناوری سوئیس در حال انجام است مطالعه بر روی یک سری پل می‌باشد. این پل‌ها ممکن است در طی عمر مفید خود علاوه بر بارهای دینامیکی ناشی از ترافیک، تحت اثر زلزله یا بادهای شدید قرار گیرند. بدین منظور و به عنوان اولین مورد از یک سری تحقیقات مرتبط با پروژه‌ی فوق‌الذکر، کاهش ارتعاشات یک سازه‌ی یک درجه آزادی (SDOF)، که می‌تواند مدل بسیار ساده‌ای از عرشه‌ی پل تحت بار زلزله باشد، به روش کنترل نیمه‌فعال توسط میراگرهای MR به صورت تحلیلی - عددی و آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفته‌است. در این مقاله تنها بخش اول مطالعات انجام گرفته بر روی این مدل SDOF - که شامل ساخت مدل ریاضی در محیط Simulink و انجام شبیه‌سازی‌های دینامیکی آن تحت تحریک زلزله در حالات کنترل‌نشده و کنترل‌شده‌است - ارائه گردیده‌است. کنترل‌کننده‌ای که در این مطالعه مورد استفاده واقع شده‌است، کنترل‌کننده‌ی تناسبی + انتگرالی + مشتقی<sup>۹</sup> یا به اختصار، کنترل‌کننده‌ی PID می‌باشد. نتایج برای حالات کنترل‌نشده، کنترل‌شده با سیستم کنترل فعال

## پاسخ گذرا و خصوصیات آن

پاسخ سیستم‌هایی که در آنها انرژی ذخیره می‌شود تحت اثر تحریک آنی نبوده، رفتاری گذرا از خود نشان می‌دهند. به عبارت دیگر پاسخ گذرا واسط بین حالت اولیه و نهایی پاسخ سیستم است. برای تعیین پارامترهای کنترل‌کننده PID شناخت خصوصیات پاسخ گذرای سیستم از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است.

غالباً خصوصیات عملکردی یک سیستم کنترل برحسب پاسخ گذرا به یک ورودی پله‌ای واحد بیان می‌گردد (اگر پاسخ به بار پله‌ای معلوم باشد، از لحاظ ریاضی پاسخ به هر ورودی را می‌توان یافت) [۲۳].

پاسخ گذرای یک سیستم کنترل عملی نوسانات میراشونده‌ای را پیش از رسیدن به حالت ماندگار از خود نشان می‌دهد.

## تنظیم کردن کنترل‌کننده PID

کنترل‌کننده‌ی تناسبی زمان خیز<sup>۱۳</sup> (طبق تعریف زمان رسیدن پاسخ از ۵٪ به ۹۵٪ یا از صفر به ۱۰۰٪ مقدار نهایی برای سیستم‌های مرتبه دوم با میرایی زیر بحرانی [۲۳]) و خطای حالت ماندگار (یعنی تفاضل پاسخ در زمان بی‌نهایت و پاسخ مطلوب) را کاهش می‌دهد. کنترل‌کننده‌ی انتگرالی خطای حالت ماندگار را حذف می‌کند ولی ممکن است که پاسخ گذرای سیستم را بدتر کند. کنترل‌کننده‌ی مشتقی خطای آینده را پیش‌بینی می‌کند، پایداری سیستم را افزایش می‌دهد، پاسخ گذرای سیستم را بهبود می‌بخشد و فراجهدش (یا همان مقدار حداکثر پاسخ) را کاهش می‌دهد. کنترل‌کننده‌ی مشتقی میرایی سیستم را افزایش می‌دهد و بنابراین می‌توان برای تسریع پاسخ گذرا، بهره‌ی تناسبی بزرگتری را به کار برد. پارامترهای کنترل PID به یکدیگر وابسته‌اند و تغییر هر کدام از این پارامترها می‌تواند اثر سایر پارامترها را تغییر دهد [۲۴].

در مطالعه‌ی حاضر برای طراحی کنترل‌کننده‌ی PID، یک تابع پله‌ای به عنوان مقدار مطلوب پاسخ در نظر گرفته شده‌است. با یک روند سعی و خطا به شرح زیر مقادیر مناسب بهره‌های مختلف انتخاب می‌شوند:

نیمه‌فعال) قابل اعمال باشد، این نیرو روی سازه اعمال می‌گردد و اگر نیروی کنترل فراتر از ظرفیت وسیله‌ی کنترل باشد، آن بخش از آن نیرو که قابل تحقق توسط وسیله است به سازه اعمال می‌شود. لازم به ذکر است که در حالت کنترل نیمه‌فعال به دلیل آنکه نیروی کنترل اعمالی می‌باید مستهلک‌کننده‌ی انرژی سازه باشد، در بعضی از بازه‌های زمانی امکان اعمال نیروی کنترل وجود نخواهد داشت. جزئیات موارد فوق‌الذکر در بخش «مدل ریاضی» به طور دقیق‌تر مورد بیان قرار خواهد گرفت.

## کنترل‌کننده‌ی PID

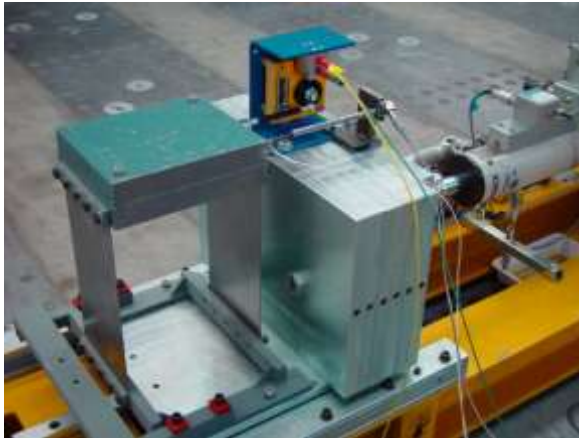
کنترل‌کننده‌ی PID متداول‌ترین الگوریتم کنترل است [۲۲]. در بیش از نیمی از کنترل‌کننده‌های صنعتی امروزی از کنترل PID یا PID اصلاح‌شده استفاده شده‌است. کنترل‌کننده‌های PID آنالوگ اغلب هیدرولیکی، بادی، الکتریکی و الکترونیکی یا ترکیبی از آنها هستند. در حال حاضر، اکثر این کنترل‌کننده‌ها توسط ریزپردازنده‌ها به فرم دیجیتال درآمده‌اند [۲۳].

الگوریتم کنترل PID به فرم زیر است [۲۲ و ۲۳]:

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \int e(t)dt + K_d \cdot \frac{de(t)}{dt} \quad (3)$$

که در آن  $e(t)$  خطای کنترل است، که برابر است با تفاضل پاسخ مطلوب و خروجی واقعی،  $u(t)$  سیگنال خروجی کنترل‌کننده یا متغیر کنترل است که از روی آن نیروی کنترل محاسبه می‌شود و  $K_p$ ،  $K_i$  و  $K_d$  پارامترهای کنترل قابل تنظیم هستند که به ترتیب بهره‌ی تناسبی<sup>۱۱</sup>، بهره‌ی انتگرالی<sup>۱۲</sup> و بهره‌ی مشتقی<sup>۱۳</sup> نامیده می‌شوند. رابطه‌ی (۳) در اصل ترکیبی از سه قسمت است:

- ۱- جمله‌ای که متناسب با خطاست،
  - ۲- جمله‌ای که متناسب با انتگرال خطاست،
  - ۳- جمله‌ای که متناسب با مشتق خطاست.
- برای تعیین مقدار پارامترهای کنترل، باید خصوصیات پاسخ گذرای سیستم را شناخت.



شکل ۱: مدل و میز لرزه



شکل ۲: میراگر MR

چون اتصال ستون‌ها به پایه و طبقه گیردار است، سختی هر ستون برابر است با  $12EI/h^3$  که  $E$  مدول ارتجاعی مصالح ستون،  $I$  ممان اینرسی مقطع ستون نسبت به محوری که حول آن دوران می‌کند و  $h$  ارتفاع ستون است [۲۵]. با فرض اینکه سازه در محدوده‌ی تغییرشکل‌های کوچک باقی بماند، سختی معادل دو ستون مدل برابر است با:

$$k = \frac{24EI}{h^3} \quad (۴)$$

### میراگر MR

میراگر مورد استفاده به عنوان وسیله‌ی کنترل، نمونه‌ی اولیه‌ای<sup>۱۴</sup> است که توسط شرکت ماورر سونه<sup>۱۵</sup> آلمان ساخته شده و برای انجام تحقیقات در اختیار EMPA قرار داده

- ۱- کنترل تناسبی به سیستم افزوده می‌شود تا زمان خیز کمتر شود.
- ۲- کنترل کننده‌ی مشتقی به سیستم افزوده می‌شود تا فراجهدش کاهش یابد.
- ۳- کنترل کننده‌ی انگرالی به سیستم افزوده می‌شود تا خطای حالت پایدار حذف شود.
- ۴- مقادیر  $K_p$ ،  $K_i$  و  $K_d$  تنظیم می‌شوند تا پاسخ مطلوب حاصل گردد.

### توصیف سازه و وسیله‌ی کنترل

در این بخش مشخصات سازه‌ی SDOF ساخته شده و تجهیزات استفاده شده ارائه شده‌است.

### سازه

سازه‌ی به کار رفته در این مطالعه که مدل آزمایشگاهی آن نیز در EMPA ساخته شده‌است یک قاب یک طبقه است که مرکب از یک صفحه‌ی فولادی به ابعاد  $80 \times 235 \times 280$  mm به عنوان جرم کف قاب و دو ورق فولادی به ارتفاع 350 mm و مقطع  $2 \times 200$  mm به عنوان ستون می‌باشد (شکل (۱)). جرم کل این مدل 44.24 kg است (جرم کف و وسایل اتصال آن 42.6 kg و جرم هر یک از ستون‌ها 0.82 kg است). ستون‌ها به صورت گیردار به میز لرزه و کف اتصال یافته‌اند. این مدل به مثابه‌ی یک سیستم SDOF است که بر اساس محاسبات، همانطور که قبلاً نیز بیان شد،  $37/5\%$  از جرم ستون‌ها باید به جرم ورق طبقه افزوده شود تا جرم تعمیم یافته‌ی دقیق مدل به دست آید. بنابراین، جرم تعمیم یافته‌ی سیستم 43.22 kg است. به علاوه، برای محاسبه‌ی نیروی مؤثر زلزله،  $50\%$  از جرم ستون‌ها باید به جرم طبقه افزوده شود تا با حاصل ضرب نتیجه در شتاب پایه، نیروی زلزله محاسبه شود (البته به دلیل آنکه جرم ستون‌ها در مقایسه با جرم کف قابل اغماض است، صرف نظر نمودن از انجام چنین اصلاحاتی تقریباً روی نتایج بی تأثیر است).

## مدل ریاضی

مدل ریاضی سازه‌ی SDOF در محیط نرم‌افزار Matlab و Simulink ساخته شده و پاسخ سیستم SDOF در حالات کنترل نشده و کنترل شده تحت شتاب پایه رکورد زلزله‌ی ال سنترو به دست آمده است. جزئیات مربوط به هر حالت در ذیل ارائه گردیده است.

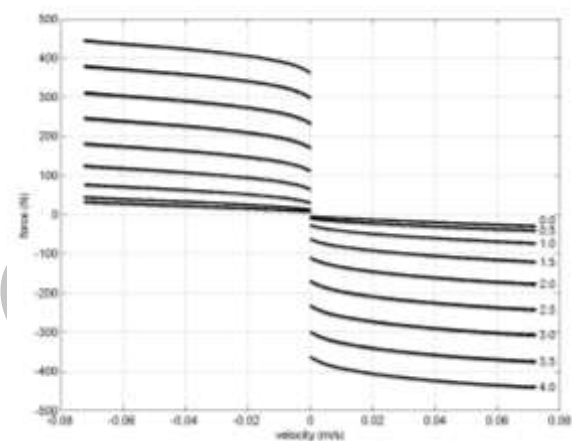
### سازه‌ی کنترل نشده (مدار باز)

برای شبیه‌سازی رفتار دینامیکی سازه در این حالت یک مدل سیمولینک همانند شکل (۴) ساخته شده است. در این مدل تحریک خارجی مستقیماً به سازه اعمال می‌شود و با فرض اینکه سازه دارای شرایط اولیه‌ی تغییر مکان و سرعت صفر باشد، پاسخ سازه به دست می‌آید.

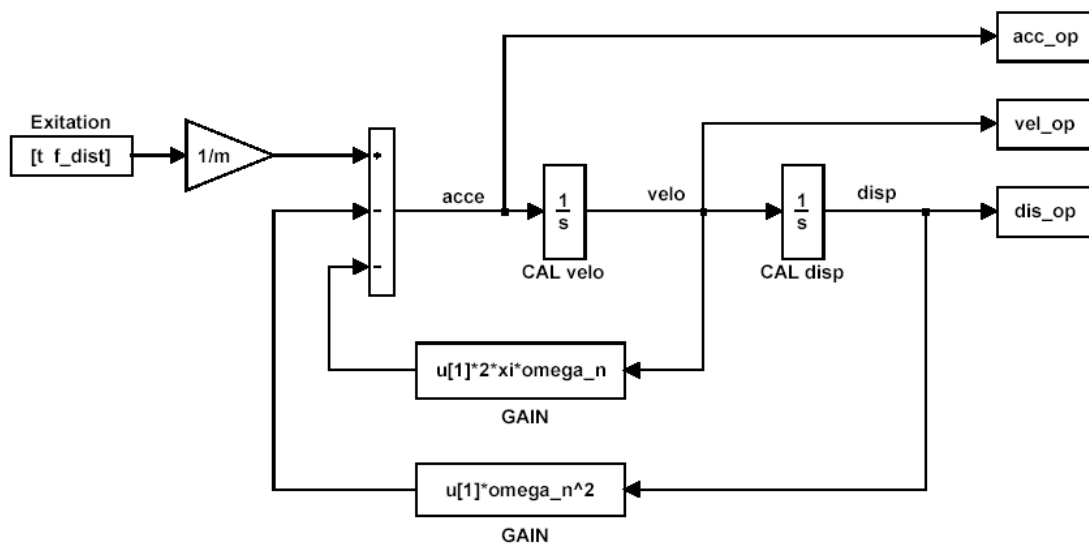
### سازه‌ی کنترل شده (مدار بسته)

برای سازه‌ی کنترل شده، سه حالت مختلف در نظر گرفته شده است.

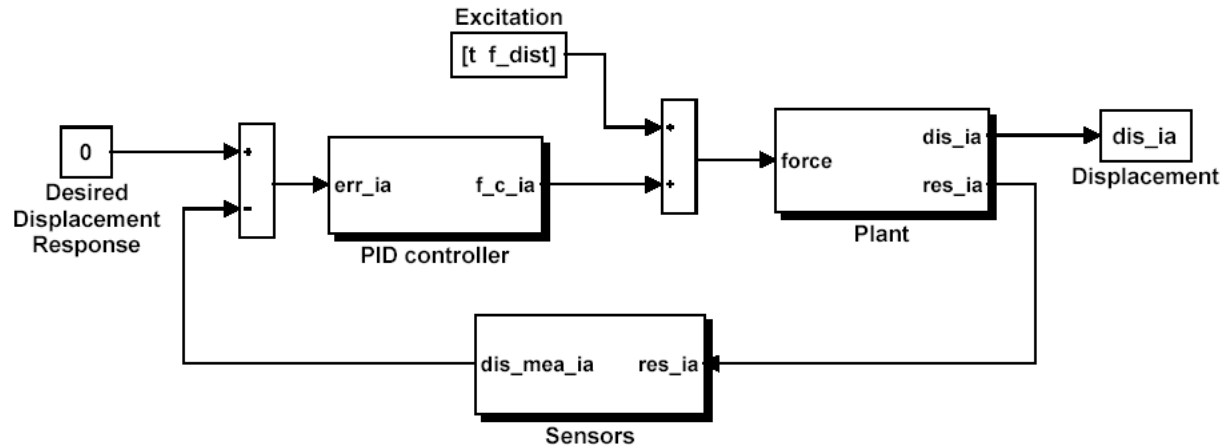
شده است (شکل (۲)). این میراگر دارای یک صفحه‌ی دایره‌ای گردنده است که بین دو سطح ثابت قرار دارد. فضای آزاد بین صفحه‌ی دایره‌ای و سطوح ثابت با سیال MR پر شده و با دقت مهر و موم گشته است تا سیال به خارج نفوذ نکند. با اعمال جریان الکتریسیته در محدوده‌ی 0-4 amp، ویسکوزیته‌ی سیال تغییر می‌کند. نمودار سرعت - نیروی این میراگر برای مقادیر مختلف شدت جریان الکتریسیته اعمالی در شکل (۳) ارائه شده است. این نمودارها از آزمایش به دست آمده است. در حالت سازه‌ی کنترل شده این میراگر بین کف سازه و میز لرزه نصب می‌شود.



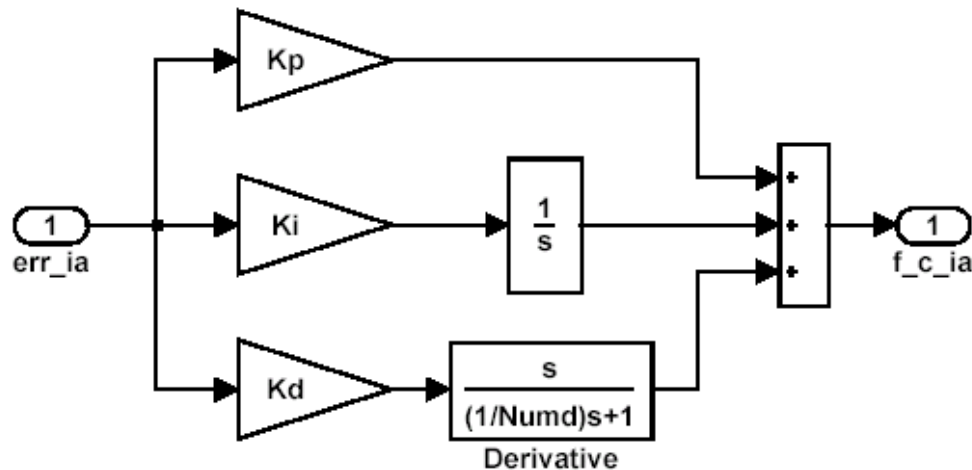
شکل ۳: رابطه‌ی سرعت - نیروی میراگر MR (اعداد روی نمودارها شدت جریان الکتریکی بر حسب آمپر است)



شکل ۴: مدل سیمولینک سازه‌ی SDOF کنترل نشده تحت تحریک زلزله



شکل ۵: مدل سیمولینک سازه با کنترل فعال ایده‌آل

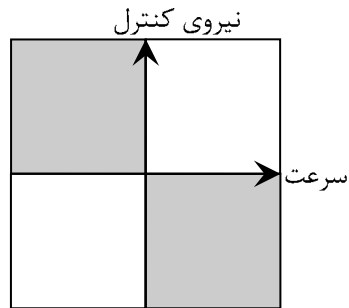


شکل ۶: کنترل‌کننده‌ی PID

همانطور که در بالا نیز به آن اشاره شد با توجه به خصوصیات پاسخ گذرای سیستم به بار پله‌ای واحد به دست آمده‌است. بدین منظور، زمان خیز، زمان رسیدن پاسخ از ۰٪ به ۱۰۰٪ مقدار نهایی و برابر با ۰.۰۰۵ s در نظر گرفته شده و حداکثر فراجهش نیز برابر با ۵٪ منظور گردیده‌است. برای تحقق زمان خیز و حداکثر فراجهش در نظر گرفته شده، پارامترهای کنترل‌کننده‌ی PID به ترتیب برابر با  $K_p = 3 \times 10^5$ ،  $K_i = 6 \times 10^5$  و  $K_d = 1 \times 10^5$  انتخاب شده‌اند. خروجی بلوک کنترل‌کننده (که همان سیگنال

### سازه‌ی کنترل‌شده با سیستم کنترل فعال ایده‌آل (بکارانداز ایده‌آل)

مدل سیمولینک ساخته‌شده برای این حالت در شکل (۵) ارائه شده‌است. در این مدل پاسخ سیستم در هر گام توسط حسگرها اندازه‌گیری شده، تفاضل آن با پاسخ مطلوب سیستم، که تغییرمکان صفر است، به بلوک مربوط به کنترل‌کننده‌ی PID وارد می‌شود. جزئیات داخل بلوک کنترل‌کننده‌ی PID در شکل (۶) نشان داده شده‌است. لازم به ذکر است که تنظیم پارامترهای کنترل‌کننده‌ی PID



شکل ۸: محدوده‌ی نیروهای کنترل قابل تحقق توسط سیستم کنترل نیمه‌فعال ایده‌آل

### سازه‌ی کنترل شده با سیستم کنترل نیمه‌فعال ایده‌آل

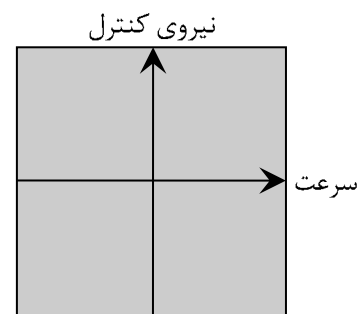
در این حالت، بر خلاف حالت قبل که مربوط به کنترل فعال ایده‌آل بود، تنها نیروهای واقع در محدوده‌ی هاشور زده شده در شکل (۸) قابل اعمال هستند. در حقیقت سیستم کنترل نیمه‌فعال فقط قادر است نیروهای مستهلک‌کننده به سیستم اعمال نماید، بدین معنی که حاصل ضرب سرعت بکارانداز و نیروی کنترل باید کوچکتر یا مساوی صفر باشد.

جزئیات مدل سیمولینک ساخته شده برای این حالت در شکل (۱۰) نشان داده شده‌است. در این حالت، در مقایسه با حالت کنترل فعال ایده‌آل، یک بلوک جدید که مربوط به میراگر است، به مدل افزوده شده‌است. در این مدل ابتدا در بلوک کنترل‌کننده‌ی PID نیروی کنترل محاسبه می‌شود، اگر حاصل ضرب سرعت میراگر MR و نیروی کنترل بزرگتر از صفر باشد، نیروی کنترل مستهلک‌کننده نبوده، اعمال آن توسط میراگر MR میسر نیست و خروجی بلوک کنترل‌کننده‌ی PID برابر با صفر خواهد بود. در غیر این صورت، یعنی وقتی که حاصل ضرب فوق منفی باشد، نیروی کنترل قابل اعمال است. به خاطر آنکه سرعت واقعی و سرعت اندازه‌گیری شده کمی با هم تفاوت دارند، ممکن است حالتی پیش آید که سرعت واقعی دارای علامتی مخالف با سرعت واقعی باشد. در این حالت نیروی کنترل خروجی بلوک کنترل‌کننده

کنترل است و در اینجا برابر با نیروی کنترل می‌باشد) نیرویی است که با نیروی تحریک جمع می‌شود و حاصل به سیستم اعمال می‌گردد. در این حالت فرض شده‌است که هر مقدار نیرو با هر علامتی توسط بکارانداز فعال قابل اعمال است (شکل (۷)). بلوک حسگرها شامل سه تابع تبدیل مرتبه اول است که تأثیر حسگر بر روی سیگنال‌های اندازه‌گیری شده را شبیه‌سازی می‌کند. هر وسیله‌ی اندازه‌گیری مکانیکی، الکتریکی و الکترونیکی به دلیل آنکه یک سیستم دینامیکی است، ویژگی‌های خاص خود را داشته، روی داده‌های اندازه‌گیری شده تأثیری هر چند اندک می‌گذارد. به عبارت دیگر مقادیر اندازه‌گیری شده توسط حسگرها دقیقاً با مقادیر واقعی برابر نیستند. برای در نظر گرفتن این مسأله، فرض شده‌است که حسگرها دارای تابع تبدیل زیر باشند:

$$G(\omega) = \frac{K}{j\omega + a} \quad (۴)$$

که  $a$  فرکانس گوشه<sup>۱۶</sup> است و  $K = a$  می‌باشد. ورودی بلوک حسگرها برداری متشکل از سه مؤلفه است: تغییرمکان، سرعت و شتاب سیستم. تغییرمکان اندازه‌گیری شده توسط حسگر با تغییرمکان مطلوب (در اینجا تغییرمکان صفر) مقایسه شده، تفاضل آن‌ها به بلوک کنترل‌کننده وارد می‌شود. در این مطالعه فرکانس گوشه  $a$  برابر با 5000 در نظر گرفته شده‌است. به عبارتی فرض شده‌است که حسگرها توانایی اندازه‌گیری محدوده‌ای وسیع از فرکانس‌ها را دارا می‌باشند.



شکل ۹: محدوده‌ی نیروهای کنترل قابل تحقق توسط سیستم کنترل فعال ایده‌آل



حالت قبل، که مربوط به میراگر MR نیمه‌فعال ایده‌آل بود، به حالت میراگر نیمه‌فعال واقعی، باید تمهیدی اندیشیده شود که نیروها در محدوده‌ی نشان داده شده در شکل (۱۰) قرار داشته باشند. البته در عمل باید میراگری با ظرفیت مناسب انتخاب شود که حتی‌الامکان بتوان توسط آن درصد زیادی از نیروهای مورد نظر را اعمال نمود. در مطالعه‌ی حاضر ظرفیت میراگر به گونه‌ای است که از حداکثر نیروی مورد نیاز بیشتر است و مشکل اشباع برای آن پیش نمی‌آید. اگر چنین نمی‌شد، به دلیل پدیده‌ی اشباع می‌بایست در بلوک کنترل‌کننده بخش "anti reset windup" افزوده می‌شد که از ذکر جزئیات آن در اینجا خودداری می‌گردد. مدل سیمولینک ساخته‌شده در این حالت در شکل (۱۱) ارائه شده‌است. این مدل شبیه مدل سیمولینک مربوط به حالت کنترل نیمه‌فعال ایده‌آل است با این تفاوت که در بلوک میراگر رابطه‌ی رفتاری مربوط به میراگر MR واقعی (که در شکل (۳) ارائه شده‌است) اضافه گردیده‌است. با توجه به نیروی کنترل مورد نیاز و نیز سرعت نسبی دو سر میراگر، از روی شکل (۳) شدت جریان الکتریسیته مناسب انتخاب شده، به میراگر MR ارسال می‌شود.

### نتایج و تفسیر آن‌ها

نتایج عددی مربوط به تحلیل سازه‌ی کنترل‌نشده و کنترل‌شده در سه حالت کنترل فعال ایده‌آل، کنترل نیمه‌فعال ایده‌آل و کنترل نیمه‌فعال واقعی تحت اثر شتاب پایه‌ی ناشی از زلزله‌ی ال‌سنترو به دست آمده‌است. شکل (۱۲) تاریخچه‌ی زمانی پاسخ تغییرمکان سیستم در حالت کنترل‌نشده و کنترل‌شده با بکارانداز فعال ایده‌آل را نشان می‌دهد. این شکل بیانگر آن است که کنترل فعال تأثیر بسیار قابل ملاحظه‌ای در کاهش ارتعاشات سازه دارد.

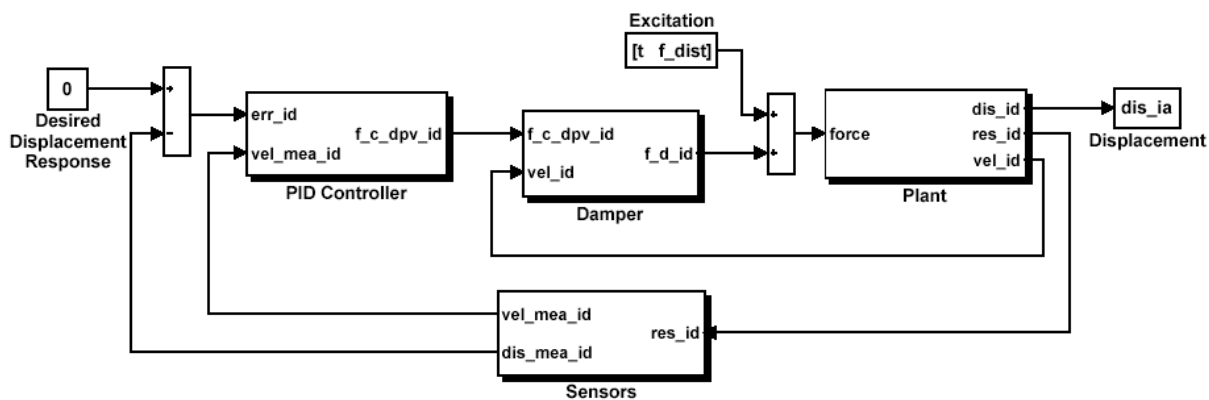
که باید مستهلک‌کننده باشد، واقعاً مستهلک‌کننده نیست، چرا که مستهلک‌کننده بودن نیروی کنترل بر اساس سرعت اندازه‌گیری شده چک می‌شود، نه سرعت واقعی. برای حل این مشکل ظریف، بلوک مربوط به میراگر به مدل سیمولینک افزوده شده‌است. همانطور که در شکل دیده می‌شود، ورودی‌های این بلوک عبارتند از:

۱- نیروی مستهلک‌کننده که خروجی بلوک کنترل‌کننده‌ی PID است (که همانطور که شرح داده شد، ممکن است در بعضی مواقع واقعاً مستهلک‌کننده نباشد).

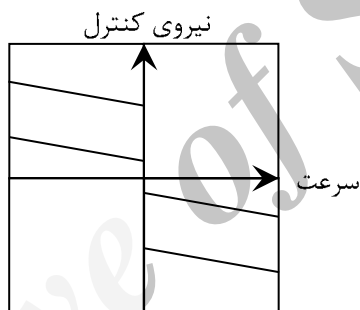
۲- سرعت واقعی سیستم.  
در بلوک میراگر، بررسی می‌شود که خروجی بلوک کنترل‌کننده، واقعاً مستهلک‌کننده باشد. در حقیقت در این بلوک علامت نیروی کنترل با علامت سرعت واقعی مقایسه می‌شود، اگر هر دو هم‌علامت باشند، علامت نیروی کنترل تغییر داده می‌شود. بنابراین، خروجی بلوک میراگر نیرویی مستهلک‌کننده واقع در محدوده‌ی هاشور خورده از شکل (۸) خواهد بود. سایر بلوکها همانند حالت کنترل فعال است.

### سازه‌ی کنترل‌شده با سیستم کنترل نیمه‌فعال واقعی

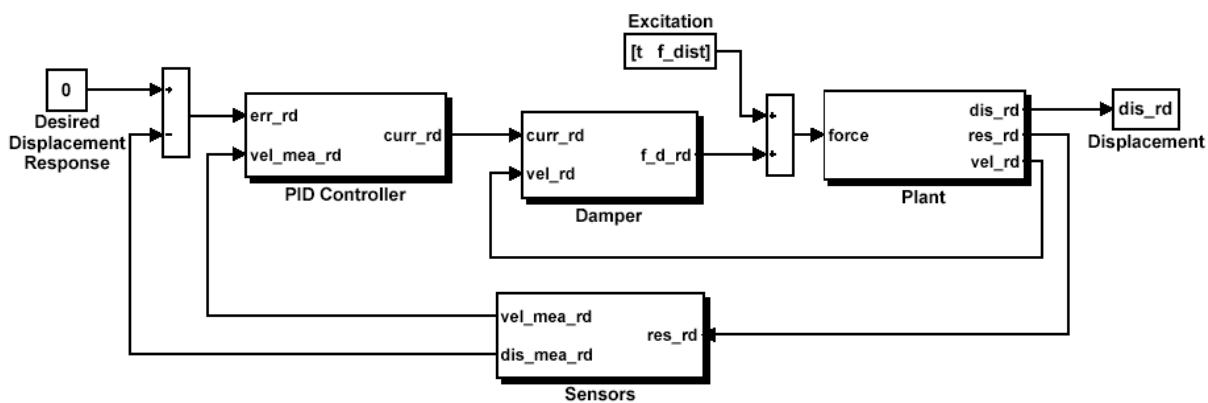
همانطور که ذکر شد، در حالتی که میراگر نیمه‌فعال ایده‌آل در نظر گرفته شود، تمامی نیروهای واقع در ربع دوم و چهارم از شکل (۸) با هر مقدار قابل اعمال هستند. در مورد میراگر MR واقعی، وقتی که جریان الکتریسیته‌ی ورودی صفر باشد، برای حرکت دادن میراگر مقدار مشخصی نیرو لازم است. این بدان معنی است که نیروهای مستهلک‌کننده‌ای که به صفر نزدیکند قابل تحقق نیستند. به علاوه، میراگر با توجه به ظرفیتی که دارد، دارای حد اشباعی است که نیروهای فراتر از آن حد را نمی‌تواند اعمال نماید. در نتیجه مقدار نیروهای قابل اعمال توسط یک میراگر MR واقعی در محدوده‌ای شبیه به آنچه که در شکل (۱۰) نشان داده شده‌است قرار می‌گیرد. برای تعمیم



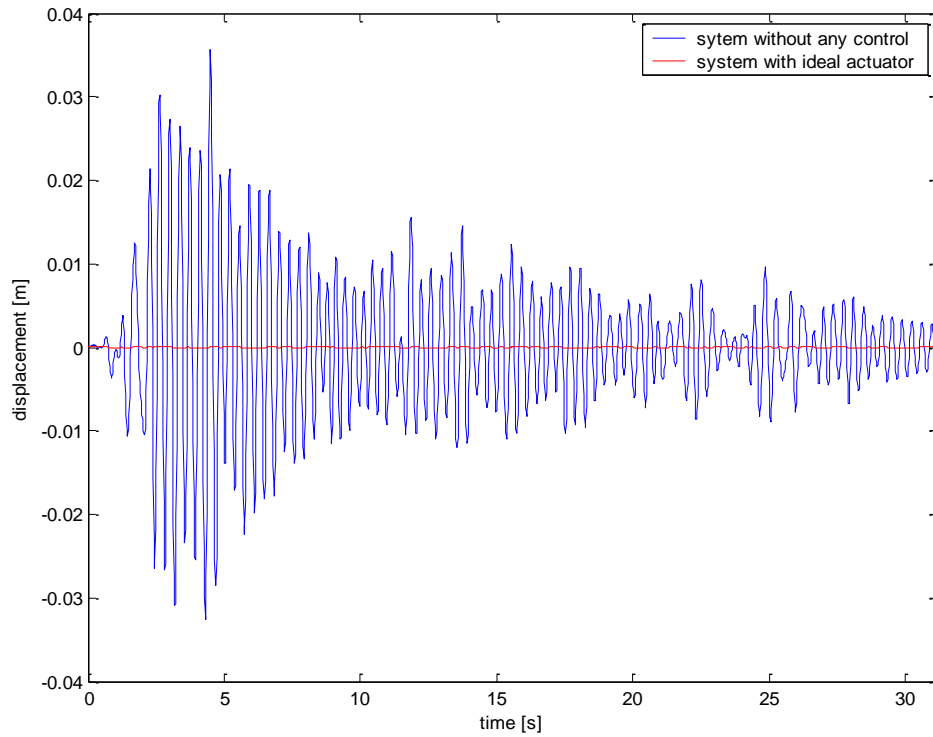
شکل ۹: مدل سیمولینک سازه با کنترل نیمه فعال ایده آل



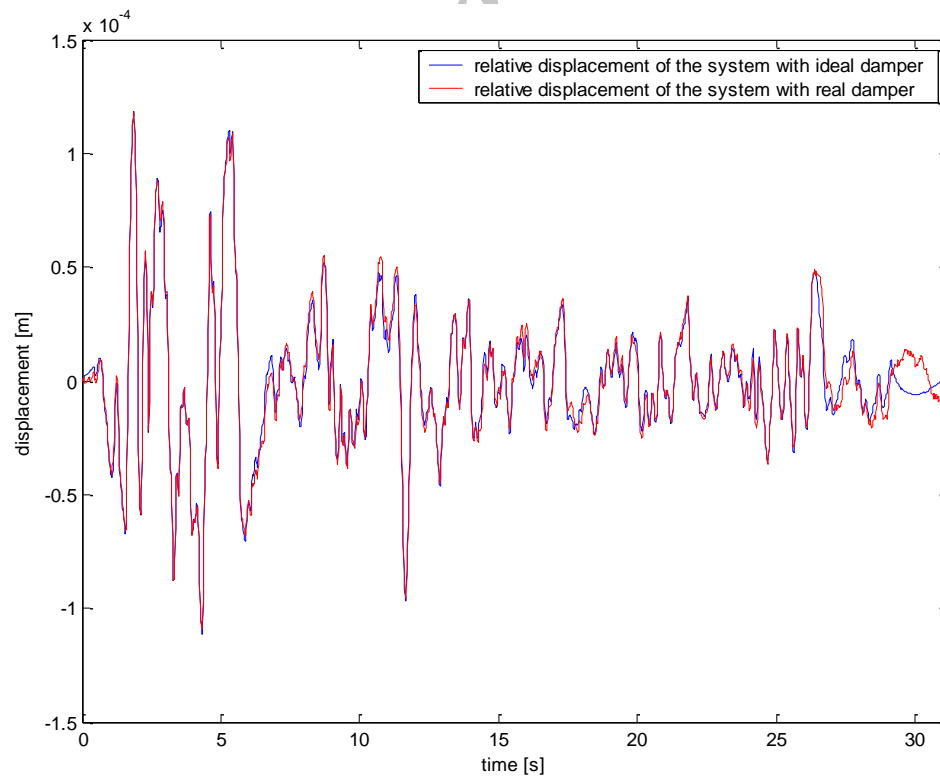
شکل ۱۰: محدوده‌ی نیروهای کنترل قابل تحقق توسط سیستم کنترل نیمه فعال واقعی



شکل ۱۱: مدل سیمولینک سازه با کنترل نیمه فعال واقعی



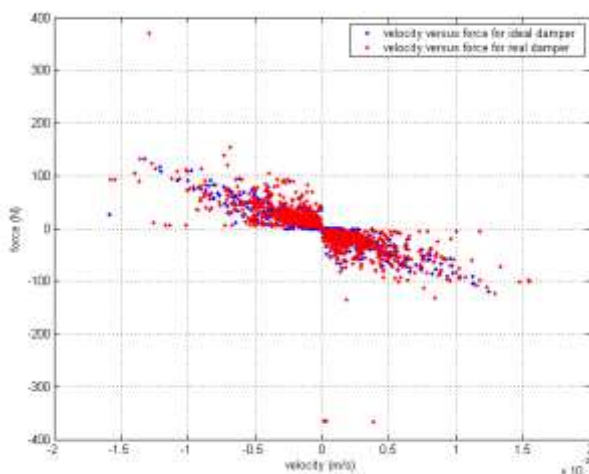
شکل ۱۲: مقایسه‌ی تاریخی‌چه‌ی زمانی تغییر مکان سازه در حالات کنترل نشده و کنترل شده با سیستم کنترل فعال ایده‌آل



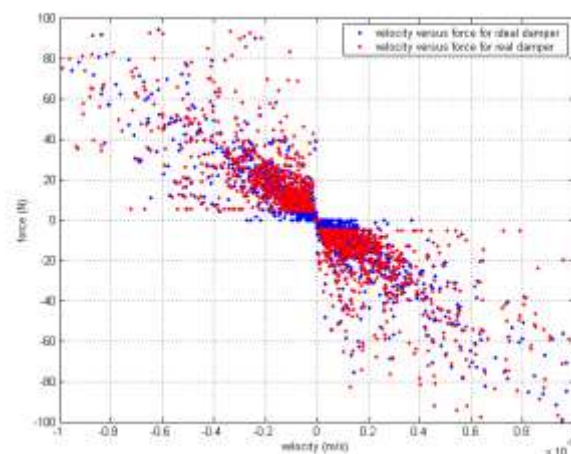
شکل ۱۳: مقایسه‌ی تاریخی‌چه‌ی زمانی تغییر مکان سازه‌ی کنترل شده با سیستم کنترل نیمه‌فعال ایده‌آل و واقعی

ایده‌آل بسیار به حالت کنترل واقعی نزدیکند و این به دلیل آن است که ظرفیت میراگر با توجه به حداکثر نیروی کنترل مورد نیاز انتخاب شده‌است. در شکل (۱۵) مقایسه‌ای بین نیروی تحریک و نیروی کنترل در حالات کنترل فعال ایده‌آل را ارائه می‌نماید. واضح است که این نیروها بسیار به هم نزدیک ولی غیرهم‌علامت هستند. از آنجا که در انتخاب ظرفیت میراگر دقت شده‌است که تا حد امکان حداکثر نیروی کنترل مورد نیاز قابل محقق توسط میراگر باشد، نتایج حالات فعال و نیمه‌فعال بسیار به هم نزدیک است. به عبارت دیگر در این مطالعه حداکثر نیروی کنترل در حالات فعال و نیمه‌فعال تقریباً برابر است.

در شکل (۱۳) مقایسه‌ای بین تاریخچه‌ی پاسخ تغییرمکان در دو حالت میراگر ایده‌آل و میراگر واقعی انجام شده‌است. نتایج نشان‌دهنده‌ی تأثیر قابل توجه این میراگرها در کاهش ارتعاشات سازه است. همانطور که ملاحظه می‌شود این نمودارها از انطباق نسبتاً کاملی برخوردارند. برای توجیه این مسئله، نیروی میراگر ایده‌آل و واقعی بر حسب سرعت میراگر در شکل (۱۴-الف) و قسمت بزرگنمایی شده‌ی آن در شکل (۱۴-ب) ارائه شده‌است. اولین چیزی که در این شکل جلب توجه می‌کند آن است که نیروهای نزدیک به صفر توسط میراگر واقعی قابل اعمال نیستند و در این حالات نیروی اعمالی توسط میراگر برابر با حد پایین ظرفیت آن است. به علاوه، ملاحظه می‌شود که محدوده‌ی نیروهای کنترل

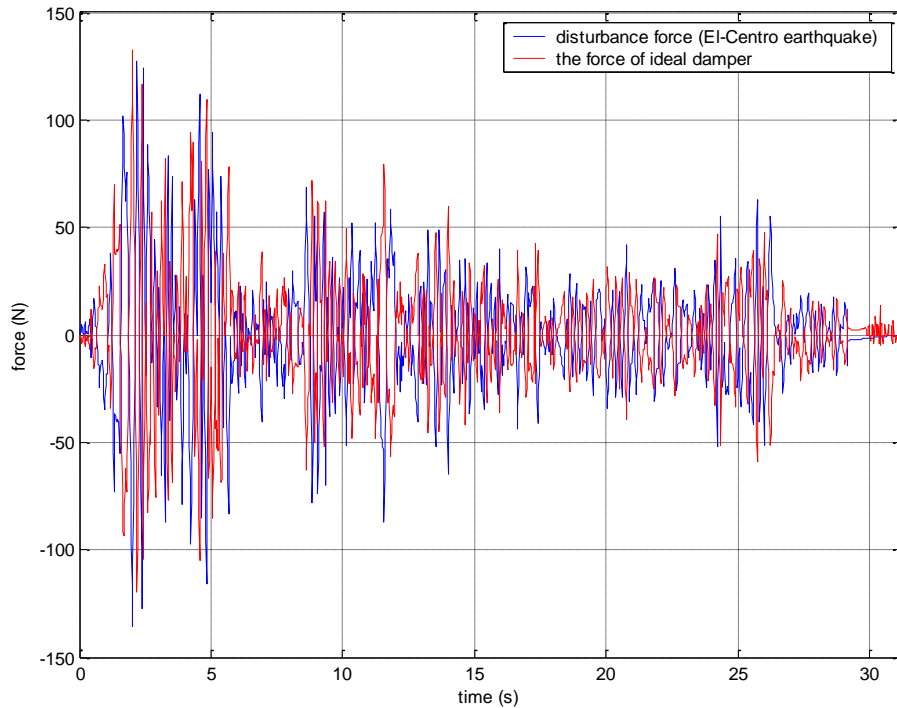


(الف)



(ب)

شکل ۱۴: نمودار سرعت - نیرو برای میراگرهای ایده‌آل و واقعی  
(الف) کل نمودار و (ب) قسمت بزرگنمایی شده از نمودار



شکل ۱۵: مقایسه‌ی نیروی تحریک و نیروی میراگر نیمه‌فعال ایده‌آل

ناپایداری سیستم در مقایسه با روش فعال، در صورت طراحی دقیق تقریباً می‌تواند همانند یک سیستم کنترل فعال پاسخ دینامیکی سازه را کاهش می‌دهد. انتخاب میراگر نیمه‌فعال با ظرفیت مناسب به گونه‌ای که محدوده نیروهای کنترل مورد نیاز توسط آن قابل اعمال باشد در بهبود عملکرد سیستم کنترل در کاهش پاسخ سازه از اهمیت بسیاری برخوردار است.

## نتیجه‌گیری

کنترل فعال و نیز نیمه‌فعال سازه‌ی SDOF با استفاده از میراگر MR مورد بررسی قرار گرفته‌است. مدل سیمولینک مربوط به هر حالت ساخته شده و شبیه‌سازی‌های مربوطه تحت بار زلزله انجام گرفت. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از روش نیمه‌فعال علاوه بر داشتن مزایایی همچون نیاز به انرژی بسیار کمتر و نیز عدم وجود احتمال رویداد خطر

## مراجع

1. Soong, T.T. (1990). *Active Structural Control: Theory and Practice*. John Wiley and Sons, New York.
2. Soong, T.T., and Dargush G.F. (1997). *Passive Energy Dissipation Systems in Structural Engineering*. John Wiley and Sons, London.
3. Housner, G.W., Bergman, L.A., Caughey, T.K., Chassiakos, A.G., Claus, R.O., Masri, S.F., Skelton, R.E., Soong, T.T., Spencer, B.F., Jr., and Yao, J.T.P. (1997). "Structural control: past, present and future." *ASCE, J. Eng. Mech.*, Vol. 123, No. 9, PP. 897-971.
4. Spencer, B.F., Jr., and Sain, M.K. (1997). "Controlling buildings: a new frontier in feedback." *IEEE Contr. Sys. Mag.*, Vol. 17, No. 6, PP. 19-35.

5. Symans, M.D., and Constantinou, M.C. (1999). "Semi-active control systems for seismic protection of structures: a state-of-the-art review." *Eng. Struct.*, Vol. 21, No. 6, PP. 469-487.
6. Soong, T.T., and Spencer, B.F., Jr. (2002). "Supplemental energy dissipation: state-of-the-art and state-of-the-practice." *Eng. Struct.*, Vol. 24, No. 3, PP. 243-259.
7. Spencer, B.F., Jr., and Nagarajaiah, S. (2003). "State of the art of structural control." *ASCE, J. Struct. Mech.*, Vol. 129, No. 7, PP. 845-856.
8. Chu, S.Y., Soong, T.T., and Reinhorn, A.M. (2005). *Active, Hybrid, and Semi-active Structural Control: A Design and Implementation Handbook*. John Wiley and Sons, Chichester.
9. Casciati, F., Magonette, G., and Marazzi, F. (2006). *Technology of Semiactive Devices and Applications in Vibration Mitigation*. John Wiley and Sons, Chichester.
10. Zuk, W. (1968). "Kinetic structures." *Civil Eng.*, Vol. 39, No. 12, PP. 62-64.
11. Yao, J.T.P. (1972). "Concept of structural control." *ASCE, J. Struct. Div.*, Vol. 98, No. ST7, PP. 1567-1574.
12. Hrovat, D., Barak, P., and Rabins, M. (1983). "Semi-active versus passive or active tuned mass dampers for structural control." *ASCE, J. Eng. Mech.*, Vol. 109, No. 3, PP. 691-705.
13. Yang, G. (2001). "Large-scale magnetorheological fluid damper for vibration mitigation: modeling, testing and control." PhD dissertation, University of Notre Dame.
14. Spencer, B.F., Jr., Dyke, S.J., Sain, M.K., and Carlson, J.D. (1997). "Phenomenological model for magnetorheological dampers." *ASCE, J. Eng. Mech.*, Vol. 123, No. 3, PP. 230-238.
15. Dyke, S.J., Spencer, B.F., Jr., Sain, M.K., and Carlson, J.D. (1998). "An experimental study of MR dampers for seismic protection." *Smart Mater. Struct.*, Vol. 7, No. 5, PP. 693-703.
16. Xu, Y.L., Qu, W.L., and Ko, J.M. (2000). "Seismic response control of frame structures using magnetorheological/electrorheological dampers." *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, Vol. 29, No. 5, PP. 557-575.
17. Huang, H., Sun, L. and Jiang, X. (2012). "Vibration mitigation of stay cable using optimally tuned MR damper" *Smart Struct. Syst.*, Vol. 9, No. 1, PP. 35-53.
18. Bharti, S.D., Dumne, S.M. and Shrimali, M.K. (2010). "Seismic response analysis of adjacent buildings connected with MR dampers" *Eng. Struct.*, Vol. 32, No. 8, PP. 2122-2133.
19. Ali, S.F. and Ramaswamy, A. (2009). "Optimal dynamic inversion-based semi-active control of benchmark bridge using MR dampers" *Struct. Control Health Monit.* Vol. 16, No. 5, PP. 564-585.
20. Clough, R.W., and Penzien, J. (2003). *Dynamics of Structures*. 3rd Edition, Computers and Structures Inc., Berkeley, CA.
21. Ghorbani-Tanha, A.K., Weber, F., and Motavalli, M. (2003). Control of horizontal bridge deck displacements due to earthquake excitation, *Report No. 840844*, Swiss Federal Laboratories for Materials Testing and Research (EMPA), Dübendorf, Switzerland.
22. Aström, K.J., and Hägglund, T. (1988). *Automatic Tuning of PID Controllers*. Instrument Society of America.
23. Ogata, K. (2003). *Modern Control Engineering*. Prentice Hall Inc., Englewood Cliffs, NJ.
24. Aström, K.J., and Hägglund, T. (1995) *PID Controllers: Theory, Design, and Tuning*", 2nd edition, Instrument Society of America.
25. Rahimian M., and Ghorbani-Tanha A.K. (2003). *Structural Analysis*, Sanjesh Publications, Tehran. (In Persian)

## واژه‌های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

1. John Milne
2. Zuk
3. Freyssinet
4. Zetlin
5. Yao
6. Kyobashi Seiwa
7. Kajima
8. Magnetorheological
9. Proportional-plus- integrator-plus-derivative
10. Proportional gain
11. Integral gain
12. Derivative gain
13. Rise time
14. Prototype
15. Maurer Söhne
16. Edge frequency

Archive of SID