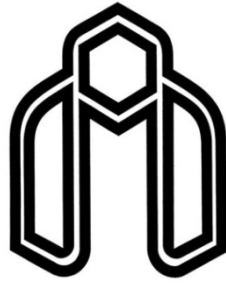


بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده عمران و معماری

کنترل لرزه‌ای سازه‌ها توسط میراگرهای جرمی تنظیم شده نیمه فعال با استفاده از کنترل کننده فازی

دانشجو: سعید پیرقلی زاده

استاد راهنما

دکتر علی کیهانی

استاد مشاور

دکتر محمد مهدی فاتح

پایان نامه جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد مهندسی عمران گرایش سازه

خرداد ۸۹

تقدیم به

پدر و مادر عزیزم

تشکر و قدردانی

در ابتدا لازم می‌دانم مراتب سپاس خود را نسبت به استاد راهنمای گرامی خویش، جناب آقای دکتر علی کیهانی، ابراز نمایم که پیشرفت تحصیلی من و همچنین به ثمر رسیدن این تحقیق، مرهون تلاش‌های دلسوزانه و مسئولانه ایشان می‌باشد. موفقیت و پیشرفت ایشان را در تمامی مراحل زندگی علمی‌شان، آرزو دارم.

جناب آقای دکتر محمدمهدی فاتح به عنوان استاد مشاور با راهنمایی‌های ارزنده خویش در پیشبرد این مطالعه کمال همکاری را با اینجانب داشته‌اند. از ایشان صمیمانه سپاس‌گزاری می‌نمایم.

چکیده

حفاظت از سازه، ساکنین و وسائل موجود در آن، در مقابل بارهای محیطی مانند زلزله، یکی از چالش‌های مهم در مهندسی عمران می‌باشد. در گذشته روش‌های طراحی بر اساس تغییر شکل غیرارتجاعی مرسوم بوده، و امروزه کنترل سازه‌ای مورد توجه خاصی قرار گرفته است. الگوریتم‌های کنترل کلاسیک به یک مدل ریاضی دقیق از سازه برای کاهش ارتعاش، نیاز دارند. امروزه سازه‌هایی که ساخته می‌شوند، باریک‌تر، انعطاف‌پذیرتر و دارای خصوصیات پیچیده‌تری هستند. بنابراین، کاهش پیچیدگی مدل سازه نادرست است و مکانیزم کنترل بر اساس این مدل بهینه نخواهد بود. کنترل فازی به مدل ریاضی دقیق از سازه نیاز ندارد و به مدل کاهش یافته نیز وابسته نیست.

در این مطالعه کنترل‌کننده فازی برای یک سازه با چند درجه آزادی همراه با میراگر جرمی تنظیم شده غیرفعال و نیمه‌فعال برای کاهش ارتعاشات حاصل از زمین‌لرزه، طراحی شده است. میراگر جرمی تنظیم شده نیمه‌فعال، توان خارجی پایینی برای تعدیل میرائی مصرف می‌کند. کنترل‌کننده فازی بخاطر خصوصیت مقاوم بودن و کارائی بالا، به طور مؤثر و آسانی در کنترل استفاده می‌شود. در این مطالعه، میراگر نیمه‌فعال مگنتورئولوژیکال (MR) استفاده شده و یک مدل با ده درجه آزادی همراه با میراگر جرمی نیمه‌فعال که در طبقه دهم قرار داده شده، مورد بررسی قرار گرفته است. اثر کنترل‌کننده در محدود کردن جابجایی‌ها و شتاب‌ها و همچنین جابجایی میراگر جرمی نیمه‌فعال، مطالعه گردیده است. کارائی کنترل‌کننده فازی برای زمین‌لرزه‌های El Centro، Hachinohe، Northridge و طَبَس، توسط مدل شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار Matlab، محاسبه و بررسی شده است. پاسخ‌های به دست آمده با پاسخ‌های سازه کنترل‌شده توسط میراگر جرمی غیرفعال مقایسه شده است.

کلید واژه‌ها: کنترل لرزه‌ای، میراگر جرمی تنظیم شده، کنترل نیمه‌فعال، کنترل فازی

فهرست مطالب

فصل اول؛ مقدمه	۱
۱-۱ - کنترل لرزه‌ای سازه	۲
۲-۱ - اهداف این مطالعه	۳
۳-۱ - ساختار پایان نامه	۴
فصل دوم؛ کنترل لرزه‌ای	۶
۱-۲ - مقدمه	۷
۲-۲ - طبقه‌بندی کلی سیستم‌های کنترل سازه‌ای	۸
۳-۲ - اصول اساسی	۹
۴-۲ - سیستم‌های جداسازی پی	۱۴
۵-۲ - سیستم‌های کنترل غیرفعال	۱۵
۱-۵-۲ - میراگرهای فلزی تسلیم شونده	۱۶
۲-۵-۲ - میراگرهای اصطکاکی	۱۷
۳-۵-۲ - میراگرهای ویسکوالاستیک	۱۸
۴-۵-۲ - میراگرهای سیال ویسکوز	۱۹
۵-۵-۲ - میراگرهای جرمی تنظیم شده	۲۰
۶-۵-۲ - میراگرهای مایع تنظیم شده	۲۴
۶-۲ - سیستم‌های فعال و نیمه‌فعال	۲۵
۱-۶-۲ - سیستم‌های کنترل فعال	۲۶
۲-۶-۲ - سیستم‌های میراگر جرمی هیبرید	۲۷
۳-۶-۲ - سیستم‌های نیمه‌فعال	۲۸
فصل سوم؛ میراگرهای جرمی تنظیم شده	۳۴
۱-۳ - مقدمه	۳۵

۳-۲ - تئوری اولیه	۳۵
۳-۳ - الگوریتم طراحی میراگر جرمی تنظیم شده غیرفعال	۳۹
۳-۴ - میراگرهای جرمی تنظیم شده پیشرفته	۴۰
فصل چهارم؛ میراگر نیمه فعال سیال مگنتورئولوژیکال	۴۴
۴-۱ - مقدمه	۴۵
۴-۲ - خواص سیال مگنتورئولوژیکال	۴۵
۴-۳ - ساختار فیزیکی	۴۶
۴-۳-۱ - مدل مکانیکی میراگر	۴۶
۴-۳-۲ - شبیه سازی میراگر	۴۸
فصل پنجم؛ کنترل فازی	۵۰
۵-۱ - مقدمه	۵۱
۵-۲ - مجموعه های فازی و منطق فازی	۵۳
۵-۲-۱ - مجموعه ها و اصطلاحات فازی	۵۳
۵-۲-۲ - عملیات نظری مجموعه	۵۴
۵-۲-۳ - متغیرهای زبانی و مجموعه های فازی	۵۵
۵-۳ - مفهوم اصلی کنترل منطق فازی	۵۵
۵-۳-۱ - عبارات شرطی فازی و قوانین کنترل فازی	۵۷
۵-۳-۲ - استدلال فازی (استدلال تقریبی)	۵۹
فصل ششم؛ مدل سازی سیستم و طراحی کنترل کننده	۶۷
۶-۱ - مقدمه	۶۸
۶-۲ - مدل سازه ای	۶۸
۶-۳ - مدل میراگر نیمه فعال	۷۰
۶-۴ - کنترل میراگرهای جرمی تنظیم شده نیمه فعال	۷۱

۷۴	۵-۶ - طرح کنترل کننده فازى مىراگر نيمه فعال
۷۷	۶-۶ - معيارهاى کارائى
۷۸	۷-۶ - مدل شبیه سازی
۸۰	فصل هفتم؛ نتایج شبیه سازی و تحلیل سیستم های کنترل
۸۱	۱-۷ - مقدمه
۸۱	۲-۷ - سیستم سازه ای
۸۴	۳-۷ - پاسخ سازه کنترل نشده
۸۵	۴-۷ - تأثیر پارامترهاى مىراگر جرمى تنظیم شده بر پاسخ سازه
۸۶	۱-۴-۷ - مىراگر جرمى تنظیم شده غیر فعال
۹۷	۲-۴-۷ - مىراگر جرمى تنظیم شده نیمه فعال
۱۰۸	۳-۴-۷ - مقایسه روش های کنترلى
۱۴۷	فصل هشتم؛ نتیجه گیری و پیشنهادات
۱۵۰	پیوست ۱
۱۵۲	مراجع

فهرست جداول

- جدول ۱-۲ سیستم‌های کنترل سازه‌ای ۸
- جدول ۲-۲ مقایسه خواص میان سیال MR و ER ۳۲
- جدول ۱-۴ پارامترهای مدل میراگر MR ۱۰۰۰ کیلونیوتنی ۴۷
- جدول ۱-۶ قوانین استنتاج کنترل‌کننده فازی ۷۶
- جدول ۱-۷ معیارهای عملکرد میراگرهای جرمی تنظیم شده غیرفعال و نیمه‌فعال با نسبت‌های جرمی ۲٪ و ۵٪ در زمین‌لرزه‌های El Centro و Hachinohe ۱۱۱
- جدول ۲-۷ معیارهای عملکرد میراگرهای جرمی تنظیم شده غیرفعال و نیمه‌فعال با نسبت‌های جرمی ۲٪ و ۵٪ در زمین‌لرزه‌های Northridge و طبس ۱۱۲
- جدول ۳-۷ معیارهای عملکرد میراگرهای جرمی تنظیم شده غیرفعال و نیمه‌فعال با نسبت‌های جرمی ۱۰٪ و ۱۵٪ در زمین‌لرزه‌های El Centro و Hachinohe ۱۲۸
- جدول ۴-۷ معیارهای عملکرد میراگرهای جرمی تنظیم شده غیرفعال و نیمه‌فعال با نسبت‌های جرمی ۱۰٪ و ۱۵٪ در زمین‌لرزه‌های Northridge و طبس ۱۲۹

فهرست اشکال

- شکل ۱-۲ سازه همراه با طرحهای کنترل مختلف ۱۲
- شکل ۲-۲ سیستمهای جداساز لرزه‌ای ساختمان ۱۵
- شکل ۳-۲ دستگاه ADAS ۱۶
- شکل ۴-۲ مهاربند نچسبیده ۱۷
- شکل ۵-۲ میراگر اصطکاکی مهاربندی X شکل ۱۸
- شکل ۶-۲ ترکیب نوعی میراگر ویسکوالاستیک ۱۹
- شکل ۷-۲ سیستم میراگرهای سیال ویسکوز ۲۰
- شکل ۸-۲ انواع میراگرهای تنظیم شده ۲۱
- شکل ۹-۲ نمایی از برج چپا و میراگر جرمی بکار رفته در این برج ۲۳
- شکل ۱۰-۲ برج کریستال و یکی از تانکهای استفاده شده به عنوان جرم پاندول در این ساختمان ۲۴
- شکل ۱۱-۲ انواع میراگرهای مایع تنظیم شده ۲۵
- شکل ۱۲-۲ سیستم کنترل لرزه‌ای در ساختمان آندو نیشیکیچو ۲۸
- شکل ۱۳-۲ دستگاه کنترل سختی ۲۹
- شکل ۱۴-۲ رفتار ماده بینگهام ۳۱
- شکل ۱۵-۲ طرح شماتیک میراگر MR ۳۲
- شکل ۱۶-۲ میراگر جرمی تنظیم شده نیمه‌فعال ۳۳
- شکل ۱۷-۲ دستگاه SAIVS اجرا شده به عنوان میراگر جرمی تنظیم شده نیمه‌فعال ۳۳
- شکل ۱-۳ سیستم با یک درجه آزادی همراه با میراگر جرمی تنظیم شده ۳۶
- شکل ۲-۳ ماکزیمم ضریب افزایش دینامیکی برای سیستم با یک درجه آزادی ۳۸
- شکل ۳-۳ ماکزیمم ضریب افزایش دینامیکی میراگر جرمی تنظیم شده ۳۸
- شکل ۴-۳ فرکانس تنظیم بهینه میراگر جرمی تنظیم شده ۳۹
- شکل ۵-۳ نسبت میرائی بهینه برای میراگر جرمی تنظیم شده ۳۹
- شکل ۶-۳ میرائی کنترل شده میراگر جرمی تنظیم شده نیمه‌فعال ۴۱
- شکل ۷-۳ میراگر جرمی تنظیم شده فعال ۴۲
- شکل ۱-۴ مدل مکانیکی میراگر MR ۴۶
- شکل ۲-۴ بلوک شبیه‌سازی میراگر MR ۱۰۰۰ کیلونیوتنی ۴۸
- شکل ۳-۴ پاسخ میراگر MR ۱۰۰۰ کیلونیوتنی به تغییر مکان اعمالی در چهار سطح ولتاژ مختلف ۴۹
- شکل ۱-۵ ترکیب اصلی کنترل‌کننده منطق فازی ۵۷
- شکل ۲-۵ دو بیان مفهوم فازی: (الف) A همراه شده با B، (ب) A شامل B است. ۵۹
- شکل ۳-۵ استنتاج $y=b$ از $x=a$ و $y=f(x)$ ۶۰
- شکل ۴-۵ قانون ترکیبی استنتاج ۶۱
- شکل ۵-۵ بیان قیاس عمومی با تفسیر ممدانی و عملگر $\wedge$ ۶۳
- شکل ۶-۵ استدلال فازی با یک قانون دارای چند شرط ۶۴
- شکل ۷-۵ استدلال فازی با چند قانون و چند شرط برای هر قانون ۶۴
- شکل ۸-۵ سیستم استنباط فازی ممدانی با دو قانون برای ورودیهای قطعی و تابع $\min$ برای عملگر AND ۶۶

شکل ۶-۱	بلوک دیاگرام کنترل فازى نیمه فعال سیستم سازه‌ای	۶۸
شکل ۶-۲	سازه ساختمانی همراه با SATMD	۷۰
شکل ۶-۳	منحنی نیرو-سرعت میراگر نیمه فعال MR	۷۱
شکل ۶-۴	اصل میرائی اتصال زمین ایده آل	۷۲
شکل ۶-۵	اصل میرائی اتصال زمین عملی	۷۳
شکل ۶-۶	توابع عضویت متغیرهای کنترل کننده فازى	۷۶
شکل ۶-۷	بلوک دیاگرام شبیه سازی سیستم کنترل شده تحت تحریک زمین لرزه	۷۹
شکل ۶-۸	بلوک دیاگرام شبیه سازی سیستم سازه‌ای همراه با میراگر جرمی	۷۹
شکل ۷-۱	سه مُد اول قاب ده طبقه	۸۲
شکل ۷-۲	شتابنگاشت‌های مورد استفاده در این مطالعه	۸۳
شکل ۷-۳	مقدار جابجایی اوج و RMS طبقات در سازه کنترل نشده	۸۴
شکل ۷-۴	مقدار شتاب مطلق اوج و RMS طبقات در سازه کنترل نشده	۸۵
شکل ۷-۵	درصد کاهش پاسخ اوج جابجایی طبقه بام در سازه کنترل شده توسط TMD در زمین لرزه El Centro	۸۹
شکل ۷-۶	درصد کاهش پاسخ RMS جابجایی طبقه بام در سازه کنترل شده توسط TMD در زمین لرزه El Centro	۹۰
شکل ۷-۷	درصد کاهش پاسخ اوج جابجایی طبقه بام در سازه کنترل شده توسط TMD در زمین لرزه Hachinohe	۹۱
شکل ۷-۸	درصد کاهش پاسخ RMS جابجایی طبقه بام در سازه کنترل شده توسط TMD در زمین لرزه Hachinohe	۹۲
شکل ۷-۹	درصد کاهش پاسخ اوج جابجایی طبقه بام در سازه کنترل شده توسط TMD در زمین لرزه Northridge	۹۳
شکل ۷-۱۰	درصد کاهش پاسخ RMS جابجایی طبقه بام در سازه کنترل شده توسط TMD در زمین لرزه Northridge	۹۴
شکل ۷-۱۱	درصد کاهش پاسخ اوج جابجایی طبقه بام در سازه کنترل شده توسط TMD در زمین لرزه طیس	۹۵
شکل ۷-۱۲	درصد کاهش پاسخ RMS جابجایی طبقه بام در سازه کنترل شده توسط TMD در زمین لرزه طیس	۹۶
شکل ۷-۱۳	درصد کاهش پاسخ اوج جابجایی طبقه بام در سازه کنترل شده توسط SATMD در زمین لرزه El Centro	۱۰۰
شکل ۷-۱۴	درصد کاهش پاسخ RMS جابجایی طبقه بام در سازه کنترل شده توسط SATMD در زمین لرزه El Centro	۱۰۱
شکل ۷-۱۵	درصد کاهش پاسخ اوج جابجایی طبقه بام در سازه کنترل شده توسط SATMD در زمین لرزه Hachinohe	۱۰۲
شکل ۷-۱۶	درصد کاهش پاسخ RMS جابجایی طبقه بام در سازه کنترل شده توسط SATMD در زمین لرزه Hachinohe	۱۰۳
شکل ۷-۱۷	درصد کاهش پاسخ اوج جابجایی طبقه بام در سازه کنترل شده توسط SATMD در زمین لرزه	

[illegible]

شکل ۳۶-۷ پاسخهای جابجایی و شتاب مطلق طبقات سازه کنترل نشده و کنترل شده توسط میراگرهای جرمی
 تنظیم شده با نسبتهای جرمی ۱۰٪ و ۱۵٪ و نسبت میرائی ۰٫۵٪، در زمین لرزه Hachinohe ۱۳۳
 شکل ۳۷-۷ پاسخهای جابجایی و شتاب مطلق طبقات سازه کنترل نشده و کنترل شده توسط میراگرهای جرمی
 تنظیم شده با نسبتهای جرمی ۱۰٪ و ۱۵٪ و نسبت میرائی ۰٫۵٪، در زمین لرزه Hachinohe ۱۳۴
 شکل ۳۸-۷ پاسخهای جابجایی و شتاب مطلق طبقات سازه کنترل نشده و کنترل شده توسط میراگرهای جرمی
 تنظیم شده با نسبتهای جرمی ۱۰٪ و ۱۵٪ و نسبت میرائی ۰٫۱۰٪، در زمین لرزه Hachinohe ۱۳۵
 شکل ۳۹-۷ پاسخهای جابجایی و شتاب مطلق طبقات سازه کنترل نشده و کنترل شده توسط میراگرهای جرمی
 تنظیم شده با نسبتهای جرمی ۱۰٪ و ۱۵٪ و نسبت میرائی ۰٫۵٪، در زمین لرزه Northridge ۱۳۶
 شکل ۴۰-۷ پاسخهای جابجایی و شتاب مطلق طبقات سازه کنترل نشده و کنترل شده توسط میراگرهای جرمی
 تنظیم شده با نسبتهای جرمی ۱۰٪ و ۱۵٪ و نسبت میرائی ۰٫۵٪، در زمین لرزه Northridge ۱۳۷
 شکل ۴۱-۷ پاسخهای جابجایی و شتاب مطلق طبقات سازه کنترل نشده و کنترل شده توسط میراگرهای جرمی
 تنظیم شده با نسبتهای جرمی ۱۰٪ و ۱۵٪ و نسبت میرائی ۰٫۱۰٪، در زمین لرزه Northridge ۱۳۸
 شکل ۴۲-۷ پاسخهای جابجایی و شتاب مطلق طبقات سازه کنترل نشده و کنترل شده توسط میراگرهای جرمی
 تنظیم شده با نسبتهای جرمی ۱۰٪ و ۱۵٪ و نسبت میرائی ۰٫۵٪، در زمین لرزه طیس ۱۳۹
 شکل ۴۳-۷ پاسخهای جابجایی و شتاب مطلق طبقات سازه کنترل نشده و کنترل شده توسط میراگرهای جرمی
 تنظیم شده با نسبتهای جرمی ۱۰٪ و ۱۵٪ و نسبت میرائی ۰٫۵٪، در زمین لرزه طیس ۱۴۰
 شکل ۴۴-۷ پاسخهای جابجایی و شتاب مطلق طبقات سازه کنترل نشده و کنترل شده توسط میراگرهای جرمی
 تنظیم شده با نسبتهای جرمی ۱۰٪ و ۱۵٪ و نسبت میرائی ۰٫۱۰٪، در زمین لرزه طیس ۱۴۱
 شکل ۴۵-۷ خروجی کنترل کننده فازی (ولتاژ اعمالی به میراگر نیمه فعال) ۱۴۴
 شکل ۴۶-۷ نیروی خروجی میراگر MR ۱۴۴
 شکل ۴۷-۷ درصد کاهش پاسخ میراگر در نسبت جرمی ۱۰٪ و نسبت فرکانسی ۱/۰ در زمین لرزه های:
 الف) El Centro، ب) Hachinohe، ج) Northridge و د) طیس ۱۴۶

فصل اول

مقدمه

۱-۱- کنترل لرزه‌ای سازه

زلزله و تندبادهای خسارت‌آور اخیر، نشان‌دهنده آسیب‌پذیری ما در مقابل نیروهای طبیعی می‌باشد. حتی در یک کشور پیشرفته صنعتی نیز محیط ساخت و ساز در برابر حوادث طبیعی حساس و آسیب‌پذیر می‌باشد. بنابراین، یکی از چالش‌های اصلی در مهندسی سازه پیشرفت و نوآوری در زمینه طراحی برای حفاظت بهتر سازه‌ها، همراه با ساکنین و اشیاء داخل آن، در مقابل تأثیرات مخرب نیروهای محیطی شامل باد، امواج و زلزله‌های ویرانگر می‌باشد.

امروزه سیستم‌های کنترل‌کننده سازه‌ای مختلفی شامل کنترل‌کننده‌های غیرفعال، فعال و نیمه‌فعال، برای حفاظت از سازه‌ها در مقابل بارهای مختلف دینامیکی ابداع گردیده‌اند. سیستم‌های کنترل‌کننده غیرفعال مانند جداسازهای لرزه‌ای، بخشی از انرژی ورودی را قبل از اینکه به سازه منتقل شود، جذب و مستهلک می‌کند. کنترل سازه‌ای فعال و نیمه‌فعال حوزه‌ای از حفاظت لرزه‌ای سازه‌ها است، که در آن حرکت سازه توسط عمل یک سیستم کنترل‌کننده با یک منبع انرژی خارجی، کنترل یا تعدیل می‌یابد. سیستم‌های کنترلی نیمه‌فعال، تنها به یک مقدار جزئی از انرژی، جهت تنظیم خواص مکانیکی خود نیاز دارند و برخلاف سیستم‌های فعال، نمی‌توانند به سازه انرژی اضافه کنند. سیستم‌های کنترل‌کننده فعال برای کار کردن، نیازمند توان خارجی قابل توجه‌ای می‌باشند. بنابراین، استفاده از این سیستم‌ها همراه با سیستم‌های کنترلی غیرفعال می‌تواند نیاز آنها را به توان خارجی کاهش دهد. در این صورت به آنها سیستم‌های کنترل‌کننده هیبرید گفته می‌شود. در سال‌های اخیر، توجه زیادی به تحقیق در زمینه کنترل فعال و نیمه‌فعال سازه‌ای، به خصوص کاهش پاسخ سازه‌ها در مقابل بارهای لرزه‌ای، شده است [۱].

یک سیستم غیرفعال نصب شده، قابلیت اصلاح را ندارد و در نتیجه برای هر طرح کنترل غیرفعال، یک ارزیابی قابل اطمینان از بارگذاری طراحی و یک مدل عددی دقیق از سیستم فیزیکی باید به دست آید، تا سیستم مؤثر باشد. با توجه به ناتوانی در تنظیم یک سیستم کنترل غیرفعال به

صورت دینامیکی، برای جبران بارگذاری‌های غیرمنتظره به طراحی بسیار محافظه‌کارانه نیاز دارد. همچنین مطالعات شبیه‌سازی بر روی سازه‌های ساختمانی نشان می‌دهد، کنترل غیرفعال در کاهش پاسخ‌های سازه تأثیر بالایی ندارند. یک سیستم کنترل فعال، سیستمی است که قابلیت تعیین حالت کنونی سازه، تصمیم‌گیری بر روی گروهی از اعمال جهت پاسخ‌های سازه، و انجام این اعمال را در یک رفتار کنترل‌شده و در زمانی کوتاه دارد. این سیستم‌های کنترلی می‌توانند اثر تغییرات محیطی غیرقابل پیش‌بینی را به صورت تئوریکی کاهش دهند، و نیازهای عملکرد دقیق را تأمین کنند و تسلیم تعداد محدودی از اجزاء سازه‌ای را جبران کنند. همچنین، توانایی ارائه راه‌حل‌های مؤثرتر برای یک بازه وسیع‌تری از کاربردها، از دو نقطه نظر تکنیکی و اقتصادی را دارند [۲].

۱-۲- اهداف این مطالعه

بررسی سیستم‌های کنترل‌کننده و مدل‌سازی صحیح این سیستم‌ها، مطالعه تأثیر آنها بر روی سیستم‌های سازه‌ای جهت کاهش پاسخ‌ها تحت اغتشاشات خارجی مخرب را ممکن می‌سازد. در این پایان‌نامه، سیستم سازه‌ای به کار گرفته شده و سیستم میراگرهای جرمی غیرفعال و نیمه‌فعال، بررسی و مدل ریاضی آنها به دست آمده و در محیط SIMULINK در نرم‌افزار MATLAB، شبیه‌سازی شده است. شتاب‌نگاشت زمین‌لرزه به عنوان اغتشاش ورودی سیستم اعمال می‌شود، و ولتاژ ورودی میراگر نیمه‌فعال MR به کار گرفته شده در میراگر جرمی، توسط کنترل‌کننده فازی محاسبه می‌شود. ورودی کنترل‌کننده فازی پاسخ‌های اندازه‌گیری شده سیستم سازه‌ای می‌باشد. تأثیر پارامترهای مختلف میراگرهای جرمی غیرفعال و نیمه‌فعال بر عملکرد آنها در کاهش پاسخ‌های سازه مطالعه شده و نتایج به دست آمده توسط این میراگرها با یکدیگر مقایسه شده است. همچنین تأثیر تغییر در بازه ولتاژ ورودی (خروجی کنترل‌کننده فازی) میراگر نیمه‌فعال MR، بر روی عملکرد میراگر جرمی تنظیم شده بررسی شده است.

۱-۳- ساختار پایان نامه

فصل دوم مقدمه‌ای بر سیستم کنترل‌کننده‌های مختلف سازه‌ای همراه با مثال‌های اجرایی این سیستم‌ها می‌باشد. در این مقدمه یک بررسی اجمالی بر سیستم‌های کنترل‌کننده غیرفعال، فعال، هیبرید و نیمه‌فعال انجام شده و انواع مختلفی از این سیستم‌ها شرح داده می‌شوند.

در فصل سوم تئوری اولیه میراگرهای جرمی بررسی می‌شود. معادلات دینامیکی معرفی شده و با توجه به بزرگی پاسخ فرکانسی بی‌بعد مقادیر بهینه برای تنظیم فرکانس سیستم میراگر جرمی بدست می‌آید. در انتهای فصل مروری اجمالی بر میراگرهای جرمی فعال و نیمه‌فعال و مطالعات انجام گرفته در زمینه میراگرهای جرمی نیمه‌فعال آورده شده است.

در فصل چهارم روش‌های مدل‌سازی مکانیکی برای کاربردهای عملی این میراگر بررسی شده است. بر اساس مدل مکانیکی منتخب میراگر MR، شبیه‌سازی میراگر در نرم افزار MATLAB و در محیط SIMULINK انجام شده است. در نهایت نتایج شبیه‌سازی انجام شده ارائه می‌گردد.

در فصل پنجم کنترل فازی و اصول اولیه آن شرح داده شده است. ابتدا مقدمه‌ای بر تئوری و کنترل فازی و تاریخچه‌ای مختصری از آن آورده شده، سپس مجموعه‌های فازی، عملیات نظری این مجموعه‌ها و متغیرهای زبانی معرفی می‌شوند. در ادامه مفهوم اصلی کنترل فازی و قوانین اگر-آنگاه فازی و اصول استدلال فازی شرح داده می‌شوند.

در فصل ششم سیستم سازه‌ای همراه با کنترل‌کننده، بررسی و فضای حالت آن برای مدل‌سازی ریاضی و سپس شبیه‌سازی آن به دست می‌آید. تئوری کنترل میراگرهای جرمی تنظیم شده نیمه‌فعال شرح داده شده و بر اساس آن کنترل‌کننده فازی برای تنظیم ولتاژ ورودی میراگر نیمه‌فعال، طرح و معیارهای کارایی جهت بررسی و ارزیابی عملکرد کنترل‌کننده آورده می‌شوند.

در فصل هفتم رفتار سازه ساختمانی (قاب ده طبقه) همراه با میراگر جرمی تنظیم شده غیرفعال و نیمه‌فعال با استفاده از کنترل‌کننده فازی تحت تحریک چهار زمین‌لرزه El Centro، Hachinohe،

Northridge و طبس بررسی شده است. ابتدا پاسخ‌های سازه کنترل‌نشده تحت این چهار زمین‌لرزه محاسبه و آورده شده است. در ادامه، رفتار سازه کنترل‌شده توسط میراگرهای جرمی تنظیم شده غیرفعال و نیمه‌فعال با تغییر در پارامترهای آنها (نسبت‌های میرائی، جرمی و فرکانسی) بررسی و درصد کاهش پاسخ سازه نشان داده می‌شود. معیارهای ارزیابی این میراگرها محاسبه و با یکدیگر مقایسه شده و همچنین پاسخ‌های جابجایی و شتاب مطلق طبقات سازه کنترل‌شده توسط میراگرهای جرمی نشان داده شده‌اند. در انتها، تغییر در کران بالای ولتاژ ورودی میراگر نیمه‌فعال MR، که خروجی کنترل‌کننده فازی می‌باشد، بر عملکرد میراگر جرمی نیمه‌فعال بررسی می‌شود.

در فصل هشتم به بیان نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهادات پرداخته شده است.

فصل دوم

کنترل سازه‌ای

۲-۱- مقدمه

در سال‌های اخیر، در زمینه تحقیق و پیشرفت دستگاه‌های کنترل سازه‌ای به ویژه در کاستن پاسخ زمین‌لرزه‌ای یا نیروی باد در ساختمان‌ها و پل‌ها توجه زیادی شده است. در هر دو حوزه تلاش‌های جدی برای توسعه دادن راهکار کنترل سازه‌ای به تکنولوژی عملی در دو دهه گذشته صورت گرفته است [۳]. به طور کل، این تکنولوژی‌ها در سه بخش زیر، همانطور که در جدول ۱-۲ آورده شده، قرار می‌گیرند:

- جداسازی پی
- استهلاک غیرفعال انرژی (PED^1)
- کنترل فعال و نیمه‌فعال [۴]

سیستم‌های کنترلی فعال، نیمه‌فعال و هیبرید (پیوندی) سیر تکاملی تکنولوژی‌های کنترل غیرفعال مانند جداسازی لرزه‌ای و استهلاک غیرفعال انرژی می‌باشند. به کار بردن سیستم‌های کنترل فعال و ترکیب‌هایی از سیستم‌های غیرفعال و فعال، که سیستم‌های هیبرید نامیده می‌شوند، به عنوان وسیله کنترل سازه‌ای در مقابل بارهای لرزه‌ای در سال‌های اخیر، مورد توجه زیادی قرار گرفته است. سیستم‌های فعال/هیبرید، دستگاه‌های انتقال نیرو همراه با برآوردکننده‌ها/کنترل‌کننده‌های پردازش زمان حقیقی^۲ و سنسورهای تعبیه شده بر روی سازه می‌باشند. عمده چالش در پژوهش کنترل فعال در مهندسی عمران این واقعیت می‌باشد که رشته‌های متنوعی که در حوزه مهندسی کلاسیک عمران قرار نمی‌گیرند، در این پژوهش شامل می‌شوند. این رشته‌ها شامل علوم کامپیوتر، پردازش داده، تئوری کنترل، علم مواد، تکنولوژی مشاهده^۳، همچنین فرایند اتفاقی^۴، دینامیک سازه‌ای، و مهندسی زلزله و باد می‌شود. محقق‌ها در این زمینه‌های متنوع امروزه توانسته‌اند با تلاش‌های مشترک با شتاب

¹ Passive Energy Dissipation

² real time processing

³ sensing

⁴ stochastic process

بیشتری به پروسه تحقیق-به-کاربرد دست پیدا کنند [۳].

جدول ۱-۲ سیستم‌های کنترل سازه‌ای [۴]

جدا سازی پی	استهلاک غیرفعال انرژی	کنترل فعال و نیمه فعال
تکیه گاه الاستومری	میراگرهای فلزی	میراگرهای جرمی فعال
تکیه گاه لاستیکی با هسته سربی	میراگرهای اصطکاکی	میراگرهای جرمی هیبرید
تکیه گاه آونگ اصطکاکی	میراگرهای ویسکوالاستیک	سیستم‌های با میرائی یا سختی متغیر
	میراگرهای سیال ویسکوز	مواد هوشمند
	میراگرهای جرمی تنظیم شده	
	میراگرهای مایع تنظیم شده	

۲-۲- طبقه بندی کلی سیستم‌های کنترل سازه‌ای

سیستم‌های کنترل سازه را می‌توان بر اساس تئوری و نظریه‌ای که به پاسخی مطلوب می‌انجامد به چند بخش تقسیم نمود. تقسیم‌بندی اصلی مورد استفاده در کنترل سازه در ذیل معرفی می‌گردد:

سیستم‌های جدا سازی^۱؛ این جداگرها در فنداسیون سازه نصب می‌شود، دارای انعطاف‌پذیری زیاد و در نتیجه ظرفیت جذب انرژی بالایی هستند. انعطاف‌پذیری زیاد، پیوند اصلی را به نحوی تغییر می‌دهد که انرژی ورودی ناشی از حرکت زمین کاهش می‌یابد. در نتیجه ظرفیت استهلاک انرژی سیستم‌های جدا سازی، پاسخ‌های جابجایی سازه کاهش می‌یابد [۵]. جدا سازه‌ای لرزه‌ای نسبت به سایر تکنولوژی‌های کنترل کننده سازه‌ای دارای رشد علمی بیشتر بوده و در عمل نیز دارای کاربرد بالایی می‌باشند [۴].

سیستم‌های کنترل غیرفعال^۲؛ این سیستم‌ها نیازی به نیروهای خارجی ندارند. نیروهای وارد به سیستم سازه‌ای تابعی از پاسخ به تحریک می‌باشد. این سیستم‌ها متمرکز بر استهلاک انرژی از طریق دستگاه‌های خاصی است که بدین منظور طراحی می‌شود.

¹ Isolation systems

² Passive control

سیستم‌های کنترل فعال^۱؛ شامل محرک‌های خارجی هستند که مطابق یک الگوی تعریف شده نیروها را اعمال می‌نمایند. آنها انرژی به سیستم، هم اضافه و هم مستهلک می‌کنند. کنترل حلقه بسته^۲ تنها از اطلاعات مربوط به پاسخ سازه، که توسط حسگرهای فیزیکی اندازه‌گیری می‌شود، استفاده می‌نماید. کنترل حلقه باز^۳ زمانی حاصل می‌شود که نیروهای کنترل تنها از طریق تحریک‌های اندازه‌گیری شده، تعیین می‌شود. کنترل حلقه باز-بسته هم از اطلاعات مربوط به پاسخ سازه و هم از اطلاعات مربوط به تحریک خارجی استفاده می‌نماید.

سیستم کنترل نیمه‌فعال^۴؛ سیستم کنترلی است که آن را می‌توان به صورت دستگاهی غیرفعال که دارای مشخصاتی است که می‌توانند به صورت فعال کنترل شوند، در نظر گرفت. برای مثال یک میراگر ویسکوز سیال که میرائی آن را می‌توان کنترل نمود. این سیستم‌ها نیازمند توان خارجی هستند که در مقایسه با سیستم‌های کاملاً فعال، به توان کمتری نیاز دارند.

سیستم کنترل هیبرید^۵؛ ترکیبی از سیستم‌های کنترلی غیرفعال و فعال می‌باشد. به‌طور کلی یک دستگاه غیرفعال برای کنترل بخش بیشتری از پاسخ به کار گرفته می‌شود، در حالیکه دستگاه فعال برای بهینه‌سازی پاسخ به تحریک مورد نظر و حفظ سیستم در محدوده پارامترهای مطلوب استفاده می‌شود. برای مثال، سیستم جداساز پایه می‌تواند تحت تغییر مکان‌های بالایی قرار گیرد که از حد مطلوب آن بیشتر می‌باشد، با استفاده از یک دستگاه کنترل فعال می‌توان برای کاهش تغییر مکان آن استفاده نمود [۵].

۲-۳- اصول اساسی

در اینجا اصول پایه مربوط به کنترل غیرفعال و فعال با استفاده از یک مدل با یک درجه آزادی تشریح می‌شود. حرکت جانبی مدل یک درجه آزاد شامل یک جرم m ، که روی فنرهایی با سختی

¹ Active control

² Closed loop control

³ Open loop control

⁴ Semi-active control

⁵ Hybrid control

ارتجاعی خطی کل k تکیه کرده و یک میراگر با میرائی c را در نظر بگیرید. این سیستم یک درجه آزاد در معرض بار زلزله قرار می‌گیرد که $\ddot{x}_g$ همان شتاب زمین می‌باشد. پاسخ جابجایی جانبی مدل تحریک شده با $x(t)$ نسبت به زمین است (این مدل به صورت شماتیک در شکل ۱-۲-الف نشان داده شده است):

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = -m\ddot{x}_g \quad (۱-۲)$$

اینک فرض کنید، المانی غیرفعال مستهلک‌کننده انرژی (PED) به این مدل یک درجه آزاد اضافه گردد. معادله حرکت برای این مدل گسترش یافته به این نحو بیان می‌شود (شکل ۱-۲-ب):

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx + \Gamma x = -(m + \bar{m})\ddot{x}_g \quad (۲-۲)$$

$\bar{m}$ جرم المان PED است و نیروی متناظر با این دستگاه به صورت Γx نشان داده شده که Γ معرف یک اپراتور عام می‌باشد.

لازم است فرم ویژه Γx قبل از آنکه معادله (۲-۲) بتواند تحلیل شود، مشخص گردد که الزاماً وابستگی زیادی به نوع وسیله دارد. از معادله (۲-۲) برمی‌آید که افزودن عبارت Γx به این معادله مشخصات سازه‌ای را اصلاح نموده، لذا این سیستم سازه‌ای می‌تواند به ارتعاش طرح شده یا پیش‌بینی شده زمین پاسخ مطلوبی بدهد. لازم به ذکر است که یک سازه غیرفعال همراه با PED کمکی، همچنان یک سازه غیرفعال خواهد ماند.

از طرفی دیگر سیستم کنترل فعال سازه ساختار پایه‌ای همچون شکل ۱-۲-ج، دارد. این سیستم کنترل شامل اجزای ذیل می‌باشد:

۱. حسگرهایی جهت اندازه‌گیری تحریک‌های خارجی و یا متغیرهای پاسخ سازه‌ای
۲. دستگاه‌هایی جهت پردازش اطلاعات اندازه‌گیری شده و محاسبه نیروی کنترل لازم بر اساس الگوریتم کنترل‌کننده معرفی شده؛ و
۳. محرک‌های مورد نیاز که معمولاً توسط منابع خارجی تغذیه می‌شود.

وقتی تنها پارامترهای مربوط به پاسخ سازه اندازه‌گیری می‌شود، ساختار کنترل، پس‌خورد یا فیدبک^۱ نامیده می‌شود، زیرا پاسخ سازه بطور مداوم اندازه‌گیری شده و این اطلاعات برای اصلاحات مستمر نیروهای کنترل اعمال شده، استفاده می‌شود. کنترل بازخورد^۲ وقتی حاصل می‌گردد که نیروهای کنترل به واسطه تحریک اندازه‌گیری شده، تنظیم می‌گردد. وقتی تحریک ورودی زمین‌لرزه باشد می‌توان شتاب‌ها را در پی سازه اندازه‌گیری نمود. وقتی، هم از اطلاعات مربوط به پاسخ و هم تحریک در طرح کنترل استفاده شود، از عبارت پس‌خورد-بازخورد استفاده می‌شود.

برای آنکه اثر اعمال این گونه نیروهای کنترل بر سازه خطی فرض شده قبلی مشاهده شود، معادله (۲-۲) در این حالت به این شکل درمی‌آید:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = -m\ddot{x}_g - mu(t) \quad (۳-۲)$$

در اینجا $u(t)$ همان نیروی کنترل اعمال شده می‌باشد.

با فرض اینکه از ساختار فیدبک در طرح کنترل استفاده گردد، نیروی کنترل طرح شده به این صورت تعریف می‌شود:

$$u(t) = \frac{\Gamma x}{m} \quad (۴-۲)$$

بعد از جایگذاری رابطه (۴-۲) در رابطه (۳-۲) داریم:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = -m\ddot{x}_g - \Gamma x \quad (۵-۲)$$

مشهود است که اثر کنترل فیدبک مجدداً مشخصات سازه‌ای را اصلاح می‌کند. با این وجود، یک تفاوت مهم در مقایسه با کنترل غیرفعال آن است که اینک فرم Γx به وسیله قانون کنترل انتخابی برای کاربرد مورد نظر مدیریت می‌شود، که می‌تواند به عنوان تابعی از تحریک تغییر نماید. برخی دیگر از مزایای مربوط به سیستم‌های کنترل فعال عبارتند از:

۱. کارایی بیشتر در کنترل پاسخ؛ معمولاً درجه این کارایی تنها به واسطه ظرفیت سیستم‌های

^۱ Feedback

^۲ Feedforward

کنترل محدود می‌شود.

۲. عدم حساسیت نسبی به شرایط محل و لرزش زمین؛

۳. قابلیت کاربرد در موقعیت‌های مواجه با خطرات گوناگون؛ برای نمونه یک سیستم کنترل فعال

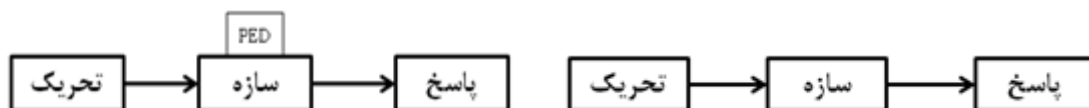
را می‌توان برای کنترل پاسخ همزمان در مقابل زلزله و بادهای شدید به کار گرفت. و

۴. قابلیت گزینش اهداف کنترل؛ روی یکی از اهداف می‌توان تأکید بیشتری داشت، برای نمونه

به آسایش ساکنین نسبت به دیگر جنبه‌های لرزش سازه طی دوره‌های غیربحرانی اهمیت

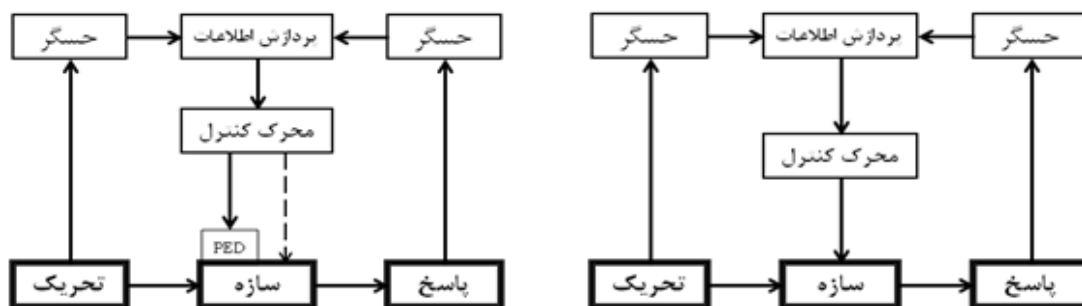
بیشتری داد، در حالیکه افزایش ایمنی سازه طی بارگذاری دینامیکی شدید می‌تواند به عنوان

هدف اصلی منظور گردد.



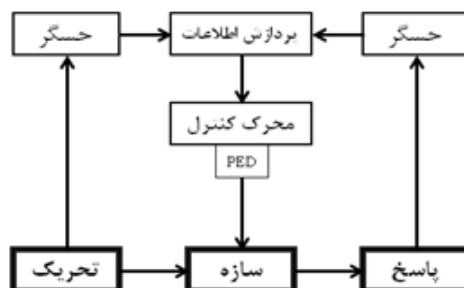
(ب) سازه همراه با استهلاک انرژی غیرفعال

(الف) سازه کنترل نشده



(د) سازه همراه با کنترل هیبرید

(ج) سازه همراه با کنترل فعال



(ه) سازه همراه با کنترل نیمه‌فعال

شکل ۱-۲ سازه همراه با طرح‌های کنترل مختلف

در حالیکه، این توصیف از کنترل فعال از نظر مفهوم در حیطه نظریه کنترل بهینه مورد استفاده در مهندسی برق، مهندسی مکانیک و مهندسی هوافضا می‌باشد، لیکن کنترل سازه برای کاربردهای مهندسی عمران دارای مشخصات و ویژگی‌های خاصی است - که عمدتاً ناشی از مباحث اجرا و پیاده‌سازی می‌باشد. - که آن را از زمینه کلی کنترل فیدبک جدا می‌سازد. مخصوصاً وقتی به سازه‌های مهندسی عمران می‌پردازیم، نامعینی قابل توجه و مشخصات فیزیکی و بارگذاری‌های پیچیده همچون باد و زلزله - با مقادیر بزرگ نیرو - وجود دارد، تنها از تعداد محدودی از حسگرها و محرک استفاده می‌شود، دینامیک محرک‌ها پیچیده است، اکثر محرک‌ها بسیار بزرگ می‌باشند و این سیستم‌ها باید در برابر خرابی مقاوم باشند.

شناخت انواع مختلف سیستم‌های کنترل فعالی که امروزه استفاده می‌شود می‌تواند سودمند باشد. اصطلاح کنترل هیبرید عموماً به سیستم ترکیب شده کنترل فعال و غیرفعال که در شکل ۱-۲- (د) نشان داده شده است، اطلاق می‌گردد. از آنجا که بخشی از هدف کنترل به واسطه سیستم کنترل غیرفعال انجام می‌شود، تلاش کنترل فعال کمتری را طلب نموده و در نتیجه منبع توان کمتری را نیاز خواهد داشت. راه دیگر صرفه‌جویی در منبع کنترل استفاده از سیستم کنترل نیمه‌فعال است که در شکل ۱-۲- (ه) نشان داده شده است، در اینجا محرک‌های کنترل، انرژی مکانیکی اضافه را مستقیماً به سازه اعمال نمی‌کنند، از این رو پایداری ورودی-کراندار خروجی-کراندار^۱ تضمین می‌گردد. اغلب به دستگاه‌های کنترل نیمه‌فعال به عنوان دستگاه‌های کنترل غیرفعال قابل کنترل نگریسته می‌شود.

مزیت دیگر روش‌های کنترل هیبرید و نیمه‌فعال آن است که در صورت قطع یا کاهش توان، مؤلفه‌های غیرفعال کنترل، برخلاف سیستم‌های کنترل کاملاً فعال، هنوز هم تا اندازه‌ای به حفاظت سازه کمک می‌نمایند [۶].

¹ Bounded-Input Bounded-Output Stability

۲-۴- سیستم‌های جداسازی پی

جداسازی پی^۱ یکی از پرکاربردترین شیوه‌های کنترل غیرفعال می‌باشد. یک ساختمان که بر روی ماده‌ای با سختی جانبی کم مانند لاستیک قرار گیرد، یک پی انعطاف‌پذیر بدست می‌دهد. در هنگام زلزله، پی انعطاف‌پذیر قادر است فرکانس‌های بالا از حرکت زمین را فیلتر نماید و از آسیب دیدن ساختمان جلوگیری کند. سیستم جداساز لرزه‌ای ابزاری مؤثر در حفاظت لرزه‌ای سازه‌های ساختمانی کوتاه و متوسط، بخاطر اینکه این نوع سازه‌ها دارای فرکانس‌های بالا هستند، می‌باشد.

اجرای جداسازی لرزه‌ای در مهندسی سازه در سال ۱۹۶۰ شروع گردید. از زمانی که اولین ساختمان جداسازی لرزه‌ای شده، ساختمان دادگستری فوت‌هیل واقع در رانچوکوکامونگا، کالیفرنیا [۷]، تکنولوژی جداسازی پی برای جداساختن انواع مختلف سیستم‌های نیروی مقاوم جانبی ساختمانی، همچون قاب‌های فلزی با بادبند، دیوار برشی‌های بتنی، دیوارهای بنایی مسلح و غیرمسلح، و حتی قاب‌های چوبی بکارگرفته شد [۸].

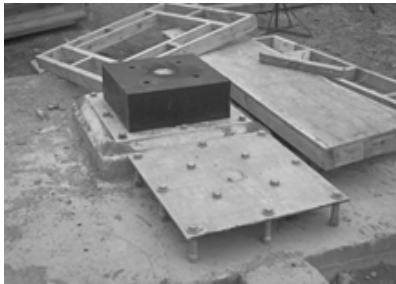
نمونه‌های سیستم‌های جداسازی مدرن شامل تکیه‌گاه‌های الاستومری با میرائی بالا^۲، تکیه‌گاه‌های لاستیکی با هسته سربی^۳، و تکیه‌گاه‌های لغزشی اصطکاکی^۴ می‌باشد. نمونه این سیستم‌ها در شکل ۲-۲ نشان داده شده است. در سیستم جداسازی هیستریزیس، مقادیر بالای استهلاک انرژی می‌تواند سبب خارج شدن از فاز شده و شتاب‌های زیادی در سازه ایجاد نماید. این شتاب‌ها هنوز هم از شتاب‌های مشاهده شده در سازه کنترل نشده کمتر می‌باشد. علیرغم اینکه شتاب بالا در حفظ محتویات ساختمانی نامطلوب می‌باشد، لیکن مقادیر بالای میرائی هیستریزیس در حفظ سیستم سازه‌ای مفید و سودمند می‌باشد [۶].

¹ Base isolation (BI)

² Elastomeric bearing

³ Lead rubber bearing

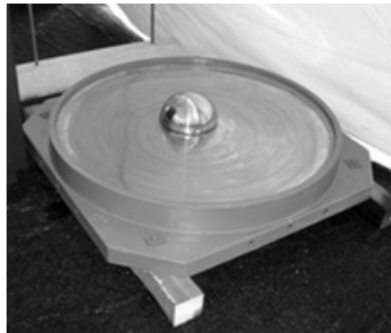
⁴ Friction sliding bearing



ب) تکیه‌گاه لاستیکی با هسته سربی



الف) تکیه‌گاه الاستومری



ب) تکیه‌گاه لغزشی اصطکاکی

شکل ۲-۲ سیستم‌های جداساز لرزه‌ای ساختمان

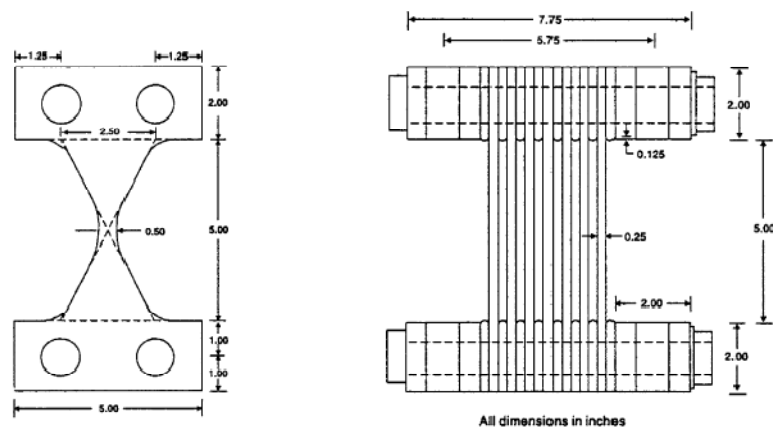
۲-۵- سیستم‌های کنترل غیرفعال

سیستم کنترل غیرفعال برای افزایش ظرفیت استهلاک انرژی سازه با بکارگیری دستگاه‌های استهلاک انرژی ناپیوسته که بر روی سازه نصب می‌گردند، استفاده می‌شود. این دستگاه‌ها سیستم‌های استهلاک انرژی تکمیلی نامیده می‌شوند و توسط سونگ و کنستانتینو [۹]، ATC [۱۰، ۱۱]، EERI [۱۲] و کنستانتینو و همکاران [۱۳، ۱۴] مورد بازبینی قرار گرفته‌اند. هدف از کاربرد این سیستم‌ها، جذب مقدار انرژی کافی از انرژی ورودی لرزه‌ای و در نتیجه کاهش پاسخ سازه می‌باشد. با توجه به نوع ساخت آنها، این سیستم‌ها ممکن است باعث افزایش سختی و مقاومت سازه نیز شوند [۱۰]. سیستم کنترل غیرفعال برای کارکردن نیاز به منبع توان خارجی ندارد. بلکه حرکت سازه باعث ایجاد حرکت نسبی در دستگاه کنترل غیرفعال که انرژی را مستهلک می‌نماید، می‌شود. دستگاه‌های کنترل غیرفعال تکمیلی دارای انواع گوناگونی می‌باشند که با استفاده از مکانیزم‌های

مختلفی انرژی را مستهلک می کنند [۱۵]. در ادامه انواعی از این سیستم ها توضیح داده می شود.

۲-۵-۱- میراگرهای فلزی تسلیم شونده^۱

یکی از مکانیزم های مؤثر در دسترس برای استهلاک انرژی ورودی لرزه ای به ساختمان بر اساس تغییر شکل غیرالاستیک فلزات می باشد. اکثر این وسایل از صفحات فولاد نرم با شکل های مثلثی یا X استفاده می کنند، تا تقریباً تمام ماده به صورت یکنواخت تسلیم شود. یک میراگر صفحه ای X شکل یا دستگاه ADAS^۲ در شکل ۲-۳ نشان داده شده است. دیگر مواد، مانند آلیاژهای حافظه شکل و هادی نیز ارزیابی شده اند [۱۶]. رفتار هیستریزیس پایدار، مشخصات خستگی ناشی از لرزش های با فرکانس پایین، قابلیت اطمینان بلند مدت، و حساسیت نسبتاً پایین به دمای محیط چند ویژگی مطلوب این دستگاه ها می باشد.



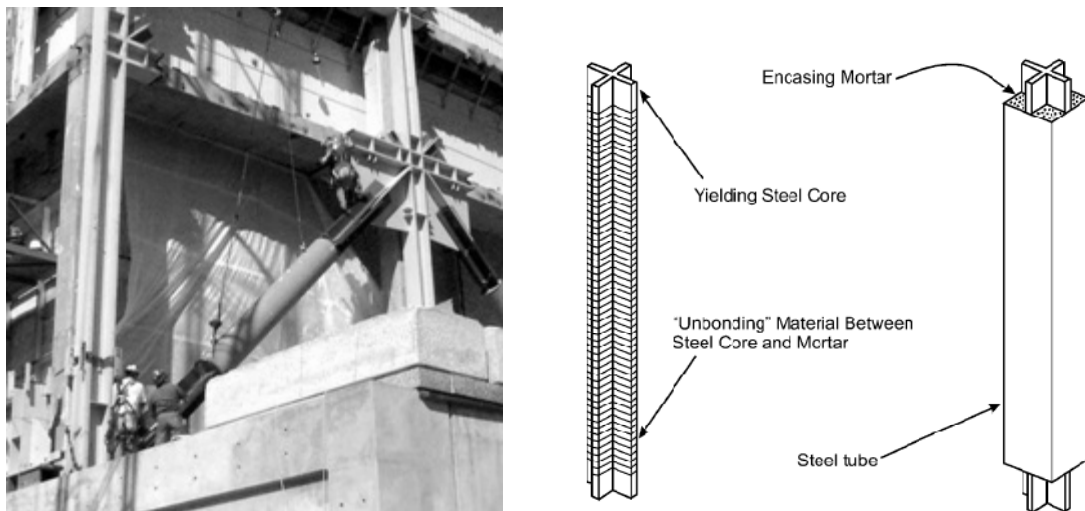
شکل ۲-۳ دستگاه ADAS

پس از بدست آوردن اطمینان از کارایی این دستگاه ها برپایه شواهد آزمایشگاهی، بکارگیری این دستگاه ها در مقیاس عملی در ساختمان ها شروع گردید. اولین اجرای میراگرهای فلزی در سیستم های سازه ای در نیوزیلند و ژاپن انجام گرفت [۱۶].

^۱ Metallic yielding dampers

^۲ Added Damping And Stiffness

دستگاهی که بر اساس اصل تسلیم شدن کشش-فشار فلزی کار می‌کند، مهاربند نچسبیده^۱ نامیده می‌شود که اجراهای عملی در آمریکا و ژاپن داشته است. مطابق شکل ۴-۲ مهاربند نچسبیده شامل یک هسته صفحه فلزی که با لوله فلزی پر شده از بتن، احاطه شده است.



شکل ۴-۲ مهاربند نچسبیده

یک اندود مخصوص در بین بتن و صفحه هسته برای کاهش اصطکاک در نظر می‌گیرند. صفحه فلزی هسته با تسلیم شدن در برابر نیروی محوری عکس باعث استهلاک انرژی می‌شود، در حالیکه، لوله فلزی پر شده با بتن در مقابل کماتش فشاری مقاومت می‌کند [۶].

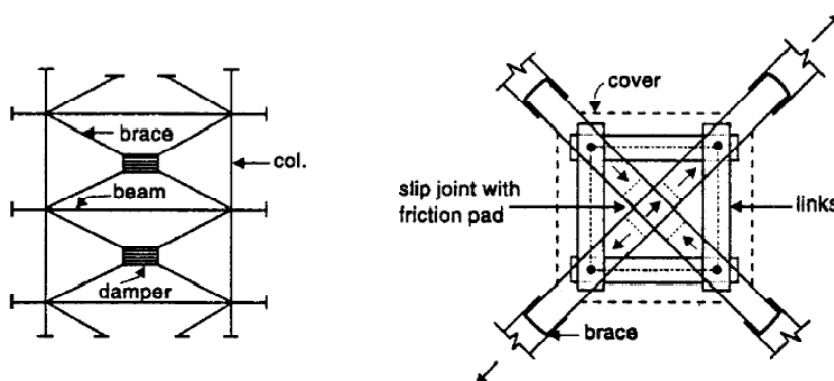
۲-۵-۲- میراگرهای اصطکاکی^۲

میراگرهای اصطکاکی بر اساس مکانیزم اصطکاک ثابت که میان دو جسم جامد در حال لغزش نسبت به یکدیگر می‌باشد و موجب استهلاک انرژی می‌شود، کار می‌کنند. انواع مختلفی از میراگرهای اصطکاکی برای بهبود پاسخ لرزه‌ای سازه‌ها ساخته شده است. مثالی از همین نوع دستگاه در شکل ۵-۲ نشان داده شده است. در بارگذاری تناوبی، این مکانیزم در هر دو راستای کششی و فشاری لغزش ایجاد می‌کند. عموماً، دستگاه‌های اصطکاکی حلقه‌های هیسترتیک مستطیلی، همانند اصطکاک

¹ Unbonded brace

² Friction dampers

کلمب^۱ تولید می کنند. بعد از اینکه مدل نیروی بازگرداننده هیسترتیک برای یک دستگاه خاص معتبر دانسته شد، می تواند براحتی در آنالیز کلی سازه ای شرکت داده شود.



شکل ۵-۲ میراگر اصطکاکی مهاربندی X شکل

در سال های اخیر، اجراهای سازه ای متعددی از میراگرهای اصطکاکی برای حفاظت لرزه ای پیشرفته سازه های نو و یا ترمیم شده انجام گرفته است [۶]. این اجراها اصولاً با استفاده از دستگاه های اصطکاک حائل^۲ در کانادا و آمریکا می باشد [۱۷].

۳-۵-۲- میراگرهای ویسکوالاستیک^۳

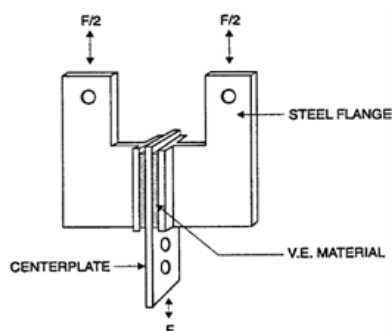
مواد ویسکوالاستیک که در اجراهای سازه ای استفاده می شوند معمولاً همبسپارها^۴ یا مواد شیشه ای هستند که انرژی را از طریق تغییر شکل برشی مستهلک می کنند. نوعی از میراگر ویسکوالاستیک که در شکل ۶-۲ نشان داده شده، شامل لایه های ویسکوالاستیک چسبیده به صفحات فولادی می باشد. با قرار دادن این دستگاه در سازه، وقتی ارتعاش سازه ای باعث حرکت نسبی میان بال های فولادی بیرونی و صفحات مرکزی می شود، تغییر شکل برشی و در نتیجه استهلاک انرژی صورت می گیرد [۶].

^۱ Coulomb friction

^۲ Pall friction

^۳ Viscoelastic damper

^۴ Copolymer

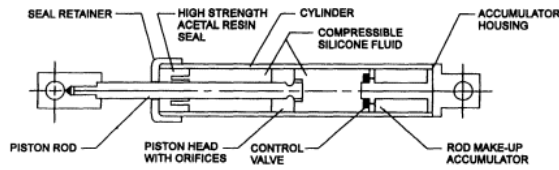


شکل ۶-۲ ترکیب نوعی میراگر ویسکوالاستیک

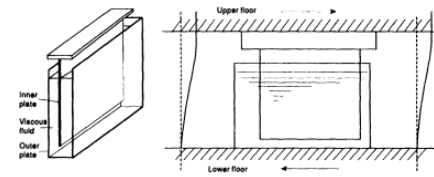
۴-۵-۲- میراگرهای سیال ویسکوز^۱

دستگاه‌های سیال ویسکوز که اخیراً ساخته شده‌اند شامل دیوارهای ویسکوز و میراگرهای سیال ویسکوز می‌باشند. دیوار ویسکوز شامل صفحه‌ای است که در یک قاب فولادی نازک پر شده با مایع ویسکوز با ویسکوزیته بالا، حرکت می‌کند. میراگر سیال ویسکوز به صورت گسترده در صنایع دفاعی و هوافضا استفاده شده‌اند و اخیراً در اجزای سازه‌ای نیز به کار گرفته می‌شوند. یک میراگر سیال ویسکوز عموماً شامل یک پیستون که در یک بدنه میراگر پر شده با ترکیبی از سیلیکون یا نوعی از روغن مشابه، می‌باشد که پیستون ممکن است دارای تعدادی از روزنه‌های کوچک که سیال از میان آنها از یک ضلع پیستون به ضلع دیگر آن حرکت می‌کند، باشد [۱۸]. بنابراین میراگر سیال ویسکوز از طریق حرکت یک پیستون در یک سیال با ویسکوزیته بالا برپایه عبور سیال از روزنه، می‌تواند انرژی را مستهلک نماید. میراگرهای سیال ویسکوز در سال‌های اخیر در تعداد زیادی از سازه‌های مهندسی عمران مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در اجزای مختلفی این میراگرها در ترکیب با سیستم‌های جداسازی لرزه‌ای استفاده شده‌اند [۶]. در شکل ۷-۲ سیستم‌های میراگر سیال ویسکوز نشان داده شده است [۱].

¹ Viscous fluid damper



(ب) میراگر سیال ویسکوز



(الف) دیوار ویسکوز

شکل ۷-۲ سیستم میراگرهای سیال ویسکوز

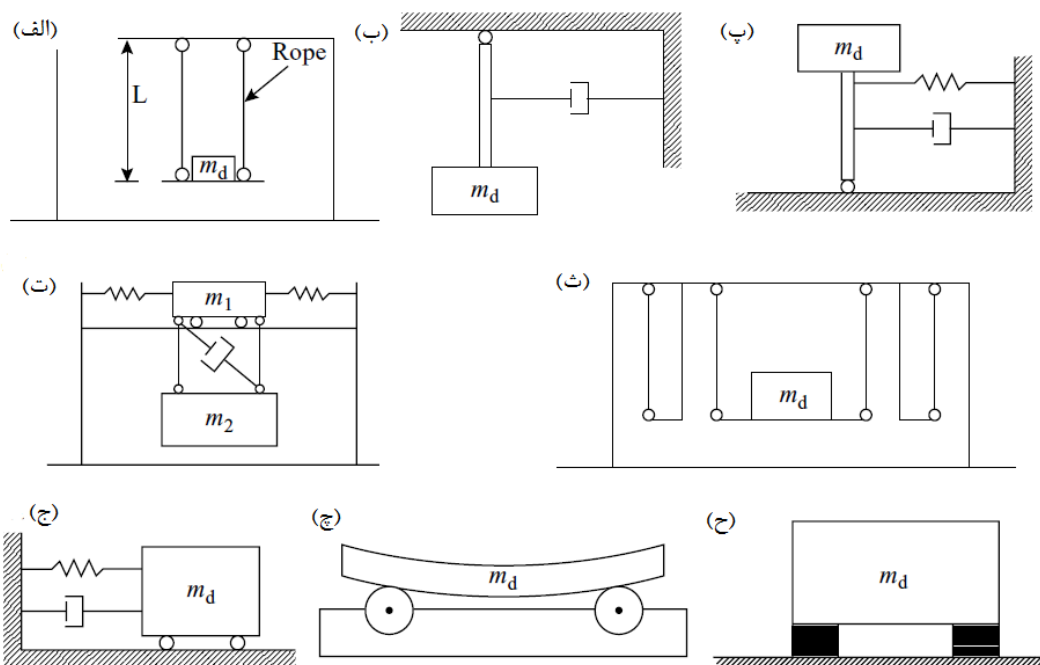
۲-۵-۵- میراگرهای جرمی تنظیم شده^۱

اجراهای اولیه میراگرهای جرمی تنظیم شده برای کاهش لرزش‌های ناشی از باد بوده‌اند. اخیراً، مطالعات آزمایشگاهی و تئوریکی برای بررسی تأثیر میراگرهای جرمی تنظیم شده در کاهش پاسخ‌های لرزه‌ای سازه‌ها انجام گرفته است. ملاحظه شده است که میراگرهای جرمی غیرفعال تنها می‌توانند نسبت به یکی از فرکانس‌های سازه‌ای تنظیم شوند. در حالیکه پاسخ مُد اول یک سازه با چند درجه آزادی در واقع می‌تواند با میراگر جرمی تنظیم شده کاهش یابد، پاسخ مُدهای بالاتر ممکن است با افزایش تعداد طبقات افزایش یابد. برای تحریک‌های ناشی از زمین لرزه، کاهش پاسخ برای حرکت‌های تشدید، زیاد می‌باشد و این کاهش، با دور شدن فرکانس حاکم حرکت از فرکانس طبیعی سازه که میراگر جرمی نسبت به آن تنظیم شده است، کم می‌شود [۶].

شکل ۲-۸ نمونه‌هایی از میراگرهای جرمی موجود برای اجراهای عملی را نمایش می‌دهد. نیروی بازگرداننده می‌تواند با نیروی جاذبه میراگر جرمی (تیپ‌های الف، ب، ت، و ث)، با یک فنر (تیپ‌های پ، ت، و ج)، یا با یک تکیه‌گاه (تیپ‌های چ، و ح) تولید شود. نیروی میرائی می‌تواند توسط یک میراگر (تیپ‌های ب، پ، ت، و ج)، یا مواد با میرائی بالا مانند لاستیک (تیپ ح) بدست آید. برای تیپ پاندولی تک جرمی (تیپ‌های الف، و ب)، زمان تناوب آن تنها به طول بازوی پاندول بستگی دارد ($T = 2\pi\sqrt{L/g}$). برای تنظیم فرکانس میراگر نسبت به مُد اصلی سازه‌ای، بازوی پاندول معمولاً به

¹ Tuned mass damper (TMD)

فضای بزرگی نیاز خواهد داشت. برای حفظ فضای مورد نیاز، این پاندول ساده طوری اصلاح می‌شود که زمان تناوب پاندول علاوه بر طول بازوی پاندول به دیگر ویژگی‌ها بستگی داشته باشد. برای مثال، بازوی پاندول می‌تواند به یک فنر متصل شود (تیپ پ)؛ یک میراگر دو جرمی (تیپ ت) می‌تواند استفاده شود، که یک جرم که بر روی کف ساختمان می‌لغزد و دیگری به عنوان پاندول عمل می‌کند؛ یا پاندول چند طبقه‌ای (تیپ ث) که آویزهای تابیده شده می‌توانند فضای عمودی مورد نیاز را کاهش دهند و همان فضای افقی اشغال شده را حفظ کنند [۱۹].



شکل ۲-۸ انواع میراگرهای تنظیم شده: (الف) پاندول ساده، (ب) پاندول با میراگر، (پ) پاندول وارون با میراگر و فنر، (ت) میراگر دو جرمی، (ث) میراگر چند طبقه، (ج) جرم لغزنده با فنر و میراگر، (چ) جرم آونگی بر روی تکیه‌گاه‌های چرخشی، و (ح) جرم بر روی تکیه‌گاه‌های لاستیکی

در سازه‌های مختلفی از میراگرهای جرمی تنظیم شده غیرفعال استفاده شده که سه نمونه از

میراگرهای جرمی تنظیم شده به کار رفته در سازه‌های موجود را در اینجا معرفی می‌کنیم.

برج جان هنگک^۱

دو میراگر برای کاهش پاسخ سازه در مقابل بار باد شدید در برج شصت طبقه‌ای جان هنگک در شهر بوستون نصب شده است. میراگرها در دو انتهای طبقه پنجاه و هشتم و به فاصله ۶۷ متر قرار دارند که در جهت کاهش نوسان و پیچش شکل ساختمان حرکت می‌کنند. هر میراگر ۲۷۰۰ کیلو نیوتن وزن دارد و شامل جعبه فلزی که توسط سرب پر شده است با ارتفاع حدود یک متر و سطح مقطع ۵/۲ مترمربع که بر روی صفحه فلزی به طول ۹ متر سوار شده است. وزنه سربی توسط فنرهای سخت به ستون‌های داخلی ساختمان مهار شده است و توسط سیلندرهای هیدرولیکی خودکار کنترل می‌شود و بر روی تکیه‌گاه‌های هیدروستاتیکی که شامل یک لایه نازک از روغن تحت فشار می‌باشد، در حفره‌هایی درون صفحه فلزی می‌تواند بلغزد. هر وقت شتاب افقی از $g/0.03$ برای دو چرخه متوالی بالاتر رود، سیستم به صورت خودکار فعال می‌شود. این سیستم به هزینه سه میلیون دلار برای کاهش نوسان ۴۰ تا ۵۰ درصدی در این ساختمان طراحی شده است [۲].

برج چیبا^۲

این برج اولین برجی بوده است که به میراگر جرمی تنظیم شده در ژاپن مجهز شده است. برج چیبا یک سازه فولادی ۱۲۵ متری با وزن ۱۹۵۰ تن و به شکل لوزی در پلان به طول ضلع ۱۵ متر می‌باشد. پریود مدهای اول و دوم به ترتیب ۲/۲۵ و ۰/۵۱ ثانیه در جهت x و ۲/۷ و ۰/۵۷ ثانیه در جهت y می‌باشد. میرائی برای مُد اولیه در حدود ۵٪ تخمین زده شده است. مقادیر میرائی نسبت به فرکانس ها برای مدهای بالاتر در آنالیزها، فرض گردیده است. هدف از میراگر جرمی تنظیم شده، افزایش میرائی سازه در هر دو جهت x و y می‌باشد. شکل ۲-۹ نمایی از این برج و سیستم میراگر جرمی نصب شده در آن را نشان می‌دهد. میراگر نسبت‌های جرمی با توجه به جرم مُدی مُد اول، در جهت x نسبت $1/12$ و در جهت y نسبت $1/8$ را داراست و پریود ارتعاش آن ۲/۲۴ و ۲/۲۷ ثانیه به ترتیب در

¹ John Hancock tower

² Chiba Port Tower

جهات x و y می‌باشد. نسبت میرائی میراگر ۱۵٪ می‌باشد. ماکزیمم جابجایی نسبی میراگر با توجه به برج حدود ± 1 متر در هر جهت است. کاهش ۳۰ تا ۴۰ درصدی تغییرمکان بالاترین طبقه و ۳۰ درصدی ممان‌های خمشی حداکثر، مورد انتظار است [۲].



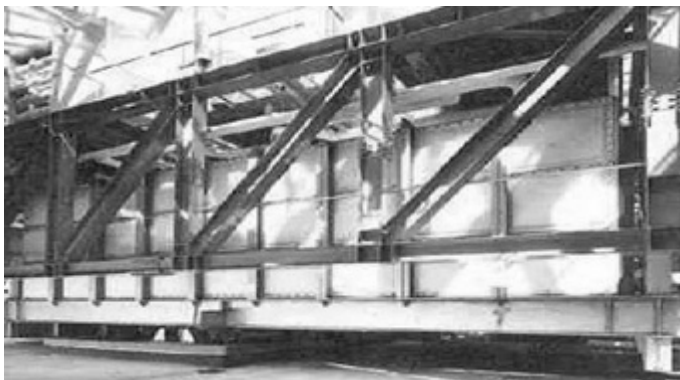
شکل ۲-۹ نمایی از برج چپا و میراگر جرمی بکار رفته در این برج

برج کریستال^۱

این برج در اوساکای ژاپن قرار دارد، با ارتفاع ۱۵۷ متر، ابعاد ۲۸ و ۶۷ متر در پلان، وزن ساختمان ۴۴۰۰۰ تن و دارای زمان تناوب اولیه‌ای حدود ۴ ثانیه در جهت شمال-جنوب و ۳ ثانیه در جهت شرق-غرب می‌باشد. یک میراگر جرمی پاندولی برای کاهش ۵۰ درصدی حرکت‌های ناشی از نیروی باد که در فاز نزدیک طراحی شده است، در این برج بکار رفته است. شش تانک انبار دمایی یخ جهت سرد و گرم کردن از نه تانک (هر کدام حدود ۹۰ تن) از تیرهای سقف آویزان گشته‌اند که بعنوان وزنه آونگ استفاده می‌شوند. چهار تانک ارتفاع آونگی ۴ متر دارند که در جهت شمال-جنوب حرکت می‌کنند. دو تانک دیگر طول پاندولی ۳ متر دارند که در جهت شرق-غرب حرکت می‌کنند. میراگرهای روغنی متصل به مخازن انرژی پاندول را مستهلک می‌کنند. شکل ۲-۱۰ نمایی از برج و یکی از این تانک‌ها را نشان می‌دهد. قیمت این میراگر جرمی تنظیم شده حدود ۳۵۰۰۰۰ دلار است

^۱ Crystal Tower

که کمتر از ۰/۲٪ قیمت ساختمان می‌باشد [۲].



شکل ۱۰-۲ برج کریستال و یکی از تانک‌های استفاده شده به عنوان جرم پاندول در این ساختمان

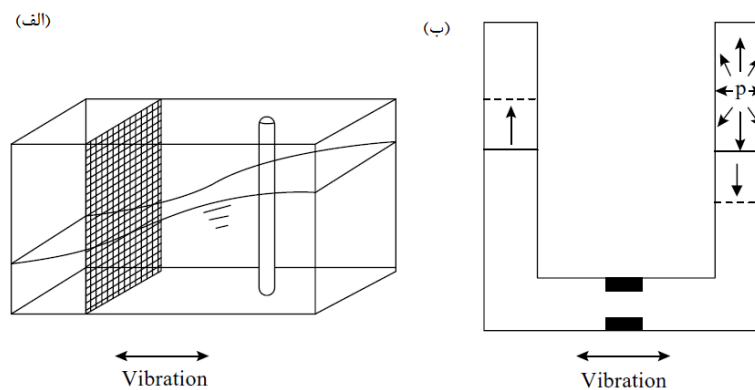
۲-۵-۶- میراگرهای مایع تنظیم شده^۱

اصول اساسی در بکارگیری یک میراگر مایع تنظیم شده برای کاهش پاسخ دینامیکی سازه‌ها کاملاً شبیه به مطالب گفته شده در قسمت قبلی برای میراگرهای جرمی تنظیم شده، می‌باشد. در عمل، یک جرم ثانویه در فرم یک جسم از مایع که به سیستم سازه‌ای اضافه می‌گردد، طوری تنظیم می‌شود که به عنوان یک جاذب ارتعاش دینامیکی عمل کند. به‌رحال در مورد میراگرهای مایع تنظیم شده، پاسخ میراگر غیرخطی بوده و دلیل آن لزجت مایع یا وجود روزنه‌ها می‌باشد. میراگرهای مایع تنظیم شده برای خنثی کردن ارتعاشات ناشی از باد در ساختمان‌های بلند استفاده شده‌اند. در مقایسه با میراگرهای جرمی تنظیم شده، مزیت‌های میراگرهای مایع تنظیم شده قیمت اولیه پایین‌تر، تقریباً بدون نیاز به نگهداری و تعمیر و سادگی تنظیم شدن فرکانس می‌باشند [۶].

درحالی‌که میراگرهای مایع تنظیم شده ابتدا در کشتی‌ها استفاده شد، اجرای آنها برای کنترل لرزه‌ای سازه‌ها در مهندسی عمران در سال ۱۹۸۰ آغاز گردید [۲۰]. شکل ۲-۱۱ دو نوع از این میراگرها نشان می‌دهد. میراگر لزجی با قرار دادن شبکه‌ها یا میله‌هایی در مایع ظرفیت میرائی تأمین

^۱ Tuned liquid damper (TLD)

می‌شود، و فرکانس طبیعی آن با اندازه محفظه یا عمق مایع تنظیم می‌شود. میراگر ستونی آشفستگی شدید جریان را از طریق روزنه، برای تأمین ظرفیت میرائی، تولید می‌کند، و فرکانس طبیعی دستگاه با شکل ستون و فشار هوا تنظیم می‌شود. میراگر ستونی می‌تواند با محفظه‌های لوله چلیپایی^۱ برای کاهش ارتعاش سازه‌ای در هر جهتی ساخته شود [۱۹].



شکل ۱۱-۲ انواع میراگرهای مایع تنظیم شده: (الف) میراگر لزجی با شبکه‌ها و میله‌ها، (ب) میراگر ستونی با روزنه

۲-۶- سیستم‌های فعال و نیمه‌فعال

توسعه سیستم‌های فعال، هیبرید و نیمه‌فعال به مرحله اجرا در سازه‌های فعلی، دست یافته است. اکثر این سیستم‌های با مقیاس کامل تحت تأثیر واقعی نیروهای باد و حرکت‌های زمین قرار گرفته‌اند و کارائی مشاهده شده آنها اطلاعات گرانبهائی در رابطه با موارد زیر بدست داده‌اند:

۱. معتبرساختن روش‌های تحلیلی و شبیه‌سازی‌های استفاده شده برای پیش‌بینی سیستم

واقعی؛

۲. بررسی سیستم‌های هیدرولیک فرمان‌یار-دیجیتال-الکترونیکی^۲ تحت شرایط بارگذاری

واقعی؛

۳. بررسی قابلیت این سیستم‌ها در کارکردن یا خاموش شدن در شرایط تعیین شده

^۱ Crossed tube

^۲ Electronic-digital-servo-hydraulic

۲-۶-۱- سیستم‌های کنترل فعال

سازه‌های هوشمند که از سیستم کنترل فعال استفاده می‌کنند، توان خارجی برای تولید نیروی کنترل که برای کاهش پاسخ سازه مستقیماً به آن وارد می‌شود، به کار می‌گیرند. چون سازه‌های ساختمانی معمولاً بزرگ می‌باشند، دستگاه‌های مولد نیروی قوی و منابع توان خارجی بالایی برای کنترل فعال پاسخ لرزه‌ای نیاز دارند.

سیستم‌های کنترل فعال به طور گسترده‌ای برای کاهش نویزها و ارتعاشات سازه‌ای در صنایع مکانیکی و هوافضا استفاده شده است. کاربرد آنها در سازه‌های مهندسی عمران یک حوزه نو می‌باشد که در حال تحقیق و پیشرفت می‌باشد. کنترل پاسخ لرزه‌ای فعال در سال‌های اخیر مورد توجه بسیاری از محققان بخاطر مزیت‌های آن که در ادامه آمده، قرار گرفته است:

- تأثیر بالای کنترل؛ در تئوری، سیستم‌های فعال همانقدر که خواسته شود می‌توانند مؤثر باشند. در عمل، مقدار تأثیر کنترل تنها با ظرفیت محرک محدود می‌باشد.
- قابلیت انطباق با حرکت زمین؛ یک سیستم کنترل فعال می‌تواند حرکت زمین را دریافت کرده و تلاش کنترلی‌اش را تعدیل کند.
- انتخاب بهینه از اهداف کنترل؛ سیستم کنترل می‌تواند برای اهداف مختلفی همانند ایمنی سازه‌ای یا آسایش انسان، طراحی گردد.
- قابلیت کاربرد در مکانیزم‌های تحریک مختلف؛ کنترل فعال محدوده فرکانس گسترده‌ای دارد، به عبارت دیگر تمام مدهای عمده سازه را پوشش می‌دهد. یک سیستم کنترل فعال می‌تواند پاسخ‌های سازه را در تحریکات باد و یا زلزله به صورت مؤثری کاهش دهد.

کنترل لرزه‌ای فعال به مرحله کاربردهای عملی رسیده است. محققان دستگاه‌های کنترل فعال

متعددی را مانند تاندون فعال، میراگر جرمی فعال، مهاربند فعال، و سیستم‌های تولید ضربه، توسعه داده‌اند [۱۹].

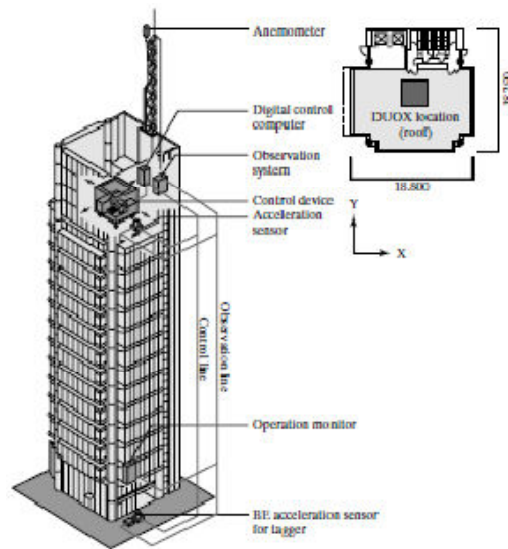
۲-۶-۲- سیستم‌های میراگر جرمی هیبرید

میراگر جرمی هیبرید معمول‌ترین دستگاه در کاربردهای عملی مهندسی عمران می‌باشد. سیستم میراگر جرمی هیبرید ترکیبی از یک میراگر جرمی تنظیم شده غیرفعال و یک محرک کنترل فعال می‌باشد. توانایی این دستگاه در کاهش پاسخ‌های سازه‌ای بیشتر بر اساس حرکت طبیعی میراگر جرمی تنظیم شده می‌باشد. نیروی تولید شده توسط محرک فعال برای افزایش کارایی میراگر جرمی هیبرید و افزایش مقاومت^۱ آن در برابر تغییرات خصوصیات دینامیکی سازه به کار برده می‌شود. انرژی و نیروهای مورد نیاز برای به کار انداختن یک میراگر جرمی هیبرید بسیار کمتر از آنی است که برای یک سیستم میراگر جرمی فعال قابل قیاس مورد نیاز می‌باشد [۶].

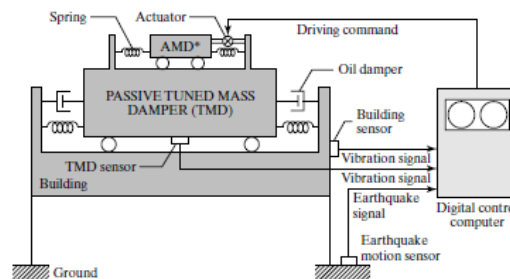
ترکیبی از میراگر جرمی فعال و میراگر جرمی تنظیم شده غیرفعال، سیستم DOUX در ساختمان آندو نیشیکیچو^۲ نصب شده است (شکل ۲-۱۲). این سازه شامل چهار ستون فولادی اصلی قرارگرفته در گوشه‌ها می‌باشد، ۱۴ طبقه بالای تراز زمین و دو زیرزمین می‌باشد. ساختمان در منطقه‌ای از شهر توکیو واقع شده که معمولاً ساختمان‌های کوچک و کم ارتفاع دارد و در نتیجه در معرض بادهای شدید قرار دارد. این سیستم تقریباً در مرکز بالاترین طبقه (در مرکز ثقل ساختمان) برای کنترل لرزه‌ای در دو جهت افقی، نصب شده است [۲].

¹ robustness

² Ando Nishikicho



(الف) طرح سیستم کنترل



(ب) دیاگرام مفهومی سیستم DOUX

شکل ۲-۱۲ سیستم کنترل لرزهای در ساختمان آندو نیشیکیچو

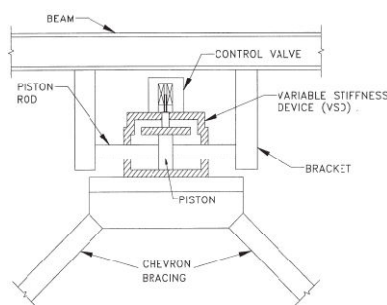
۲-۶-۳- سیستم‌های نیمه‌فعال

سیستم‌های کنترل نیمه‌فعال اخیراً برای کاربردهای کنترل سازه‌ای مورد توجه قرار گرفته است. یک سیستم کنترل نیمه‌فعال عموماً از یک سیستم کنترل غیرفعال ناشی می‌شود، و این سیستم طوری اصلاح می‌شود که بتوان خصوصیات مکانیکی آن را تنظیم نمود. برای مثال، دستگاه‌های استهلاک انرژی تکمیلی که انرژی را از طریق برش در سیال ویسکوز، عبور از روزنه سیال، و لغزش اصطکاکی طوری اصلاح می‌شوند که رفتار نیمه‌فعال داشته باشند. خصوصیات مکانیکی این سیستم‌ها بر اساس فیدبک اندازه‌گیری شده از تحریک و یا پاسخ، می‌تواند تنظیم شود. همانند سیستم‌های فعال،

کنترل کننده اندازه گیری های فیدبک را بازبینی کرده و سیگنال فرمان مناسب را برای دستگاه های نیمه فعال تولید می کند. همانند یک سیستم کنترل غیرفعال، نیروهای کنترل در نتیجه حرکت سازه ایجاد می شود. نیروهای کنترل از طریق تنظیم مناسب (بر اساس الگوریتم کنترل تعیین شده) خصوصیات مکانیکی سیستم کنترل نیمه فعال اصلاح می شوند. بعلاوه، نیروهای کنترل در سیستم های کنترل نیمه فعال برخلاف جهت حرکت سیستم سازه ای عمل می کنند و مقاومت کلی سازه بیشتر می شود.

۲-۶-۳-۱- دستگاه های کنترل سختی

دستگاه های کنترل سختی نیمه فعال برای تغییر سختی و در نتیجه خصوصیات ارتعاش طبیعی سازه ای که به آن وصل شده، به کار برده می شوند. یک سیستم سختی نیمه فعال برای کنترل پاسخ لرزه ای توسط کُبری و همکاران [۲۱]. سیستم اصولاً سختی سازه را کنترل می کند تا وضعیت تشدید صورت نگیرد. دستگاه های سختی نیمه فعال درگیر و آزاد می شوند، یا به عبارت دیگر به ترتیب در سیستم سازه شامل می شوند یا نمی شوند. شماتیکی از این دستگاه در یک مهاربند V شکل در شکل ۱۳-۲ نشان داده شده است [۱۵]. برای کم کردن مشکلاتی که تغییر ناپیوسته سختی (مانند شتاب و تحریک بیشتر در مدهای بالاتر)، ناگاراچایا [۲۲] یک دستگاه کنترل سختی و میرائی ایجاد نموده که قادر به تعدیل سختی و میرائی در روشی پیوسته است. این دستگاه شامل فنرهای غیرخطی و میراگرهای ویسکوز می باشد.



شکل ۱۳-۲ دستگاه کنترل سختی

۲-۳-۶-۲- میراگرهای الکترورنئولوجیکال^۱

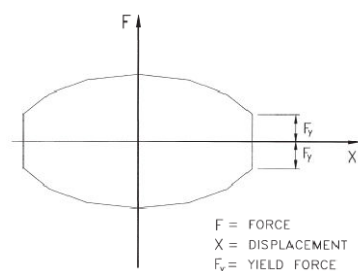
میراگرهای الکترورنئولوجیکال (ER) معمولاً شامل یک سیلندر هیدرولیک که حاوی ذرات دی‌الکتریک در سائز میکرون معلق در یک مایع (معمولاً روغن) می‌باشد. در یک میدان الکتریکی قوی ذرات دوقطبی گشته و در یک ردیف مرتب می‌شوند، در نتیجه مقاومت مایع را افزایش می‌دهند. با تغییر در میدان الکتریکی، رفتار دینامیکی مایع ER می‌تواند تعدیل گردد. با افزایش میدان وارده، رفتار مایع ER از یک مایع ویسکوز به یک جامد تسلیم شده در چند میلی‌ثانیه تغییر می‌کند. مقاومت برشی مایع ER می‌تواند با در نظر گرفتن یک عنصر صلب از یک عنصر نیوتنی تبعیت کند. یک مدل پدیدار شناختی که همچنین خاصیتی را توصیف می‌کند، شامل یک المان اصطکاک کلمب موازی با یک میرائی ویسکوز خطی می‌باشد که به عنوان مدل بینگهام^۲ ویسکوپلاستیسیته شناخته می‌شود [23]. در سطح تنش-کرنش، مدل به صورت زیر تعیین می‌گردد:

$$\tau = \tau_y \operatorname{sgn}(\dot{\gamma}) + \eta \dot{\gamma} \quad (۲-۶)$$

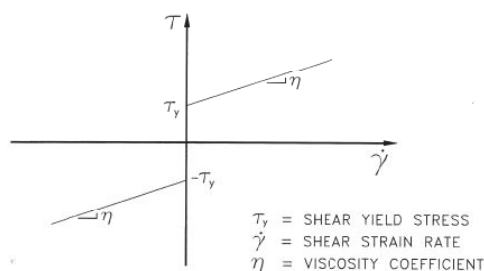
τ تنش برشی، τ_y تنش تسلیم، $\dot{\gamma}$ ضریب ویسکوزیته می‌باشند. نمودار شکل ۲-۱۴ الف رفتار ماده طبق رابطه (۲-۶) را به صورت گرافیکی نشان می‌دهد. تحت بارگذاری هارمونیک، پاسخ هیستریزس یک ماده بینگهام در سطح تغییرمکان-نیرو به صورت نشان داده شده در شکل ۲-۱۴ ب خواهد بود. همانطور که می‌بینید در مواد ER، مقدار تنش تسلیم تحت میدان الکتریکی وارد شده افزایش می‌یابد، در حالیکه ضریب ویسکوزیته به میدان وابسته نمی‌باشد. بنابراین، تحت حرکت هارمونیک اعمال شده، وقتی میدان الکتریکی افزایش پیدا کند، حلقه هیستریزس نشان داده شده در شکل ۲-۱۴ ب، در جهت عمودی به دلیل افزایش نیروی تسلیم، F_y ، منبسط می‌شود. در حال حاضر، سیال‌های ER که در دسترس هستند ماکزیمم تنش تسلیمی در حدود ۱۰-۵ کیلوپاسکال دارند [۱۵].

¹ Electrorheological dampers

² Bingham model



(ب)



(الف)

شکل ۲-۱۴ رفتار ماده بینگهام توصیف شده در (الف) صفحه تغییرات تنش-کرنش (ب) صفحه تغییر مکان-نیرو

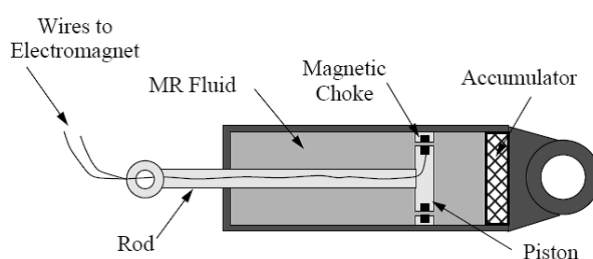
۲-۶-۳-۳- میراگرهای مگنتورئولوژیکال^۱

میراگرهای مگنتورئولوژیکال (MR) در اصل حالت مغناطیسی میراگرهای ER می‌باشند. از لحاظ کیفیت، رفتار هر دو نوع میراگر بسیار شبیه به یکدیگر می‌باشد، بجز اینکه اثر کنترل از اعمال میدان الکتریکی در یکی، و میدان مغناطیسی در دیگری، تبعیت می‌کند. در جدول ۲-۲ خواص این دو سیال را می‌توان مشاهده و مقایسه نمود. میراگرهای MR شامل یک سیلندر هیدرولیک که حاوی ذرات با قابلیت قطبی شدن بوسیله میدان مغناطیسی، در سائز میکرون، معلق در یک مایع (معمولاً روغن) می‌باشند (شکل ۲-۱۵). در غیاب میدان مغناطیسی، مایع MR آزادانه جریان دارد، در حالیکه در میدان مغناطیسی رفتار نیمه‌جامد از خود نشان می‌دهد. ماکزیمم تنش تسلیم که مایع‌های MR می‌توانند مقاومت کنند در حدود ۵۰-۱۰۰ کیلوپاسکال می‌باشد [۲۴].

^۱ Magnetorheological dampers

جدول ۲-۲ مقایسه خواص میان سیال MR و ER [۲۴]

سیال ER	سیال MR	خاصیت
۲-۵ kPa	۵۰-۱۰۰ kPa	ماکزیمم تنش تسلیم
۰/۲-۱/۰ Pa-s	۰/۲-۱/۰ Pa-s	ویسکوزیته پلاستیک
۱۰ تا ۹۰ °C	۱۵۰ °C تا -۵۰	محدوده دمایی عملی
ناتوان در برابر ناخالصی	تأثیر ناپذیر از اکثر ناخالصی‌ها	پایداری
۲۰۰۰-۵۰۰۰ V	۲-۲۵ V	منبع توان
۱-۱۰ mA	۱-۲ A	
(۲-۵۰ watts)	(۲-۵۰ watts)	



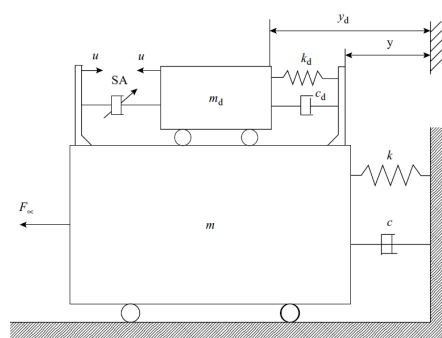
شکل ۲-۱۵ طرح شماتیک میراگر MR

در ۱۹۸۳ هروات و همکاران [۲۵]، یک میراگر جرمی تنظیم شده نیمه‌فعال^۱ (SATMD) برای کنترل ارتعاشات ناشی از باد در ساختمان‌های بلند (شکل ۲-۱۶) پیشنهاد دادند. این سیستم شامل یک میراگر جرمی تنظیم شده و یک محرک نصب شده در بالای سازه اصلی می‌باشد. محرک که با SA مشخص شده است، نیروی کنترل u را تولید می‌کند. نیروی کنترل u میرائی میراگر جرمی تنظیم شده را طوری تنظیم می‌کند که همواره تحریک تصادفی بهینه باشد. چون جرم میراگر به مراتب کوچکتر از جرم سازه‌ای است، و یک نیروی کنترل فعال برای تغییر نیروی میرائی میراگر جرمی تنظیم شده استفاده می‌شود (که بسیار کمتر از نیروی اینرسی جرم میراگر می‌باشد)، توان خارجی کوچکی برای تنظیم کردن لازم دارد [۱۹].

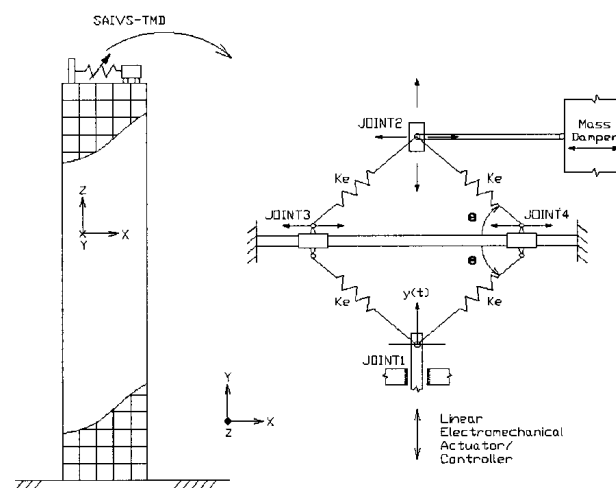
به عنوان یک راه حل جالب توجه، یک میراگر جرمی تنظیم شده نیمه‌فعال، با سختی متغیر، که دارای مزیت مشخص پیوستگی در تنظیم فرکانس با توجه به کنترل زمان حقیقی می‌باشد، و در

^۱ Semi-active tuned mass damper

نتیجه آن را نسبت به تغییرات در سختی و میرایی ساختمان مقاوم می‌سازد، توسط ناگارجایا و واراداراجان [۲۶] با استفاده از دستگاه سختی متغیر به صورت پیوسته و مستقل نیمه‌فعال^۱ (SAIVS) نشان داده شده در شکل ۲-۱۷، ایجاد شده است. آنها تأثیر این دستگاه را به صورت تحلیلی و آزمایشی بر روی یک مدل سازه‌ای سه طبقه مقیاس کوچک نشان دادند. نوع دیگری از میراگرهای جرمی تنظیم شده نیمه‌فعال توسط آبه و ایگوسا [۲۷] به صورت تحلیلی بررسی شده‌اند.



شکل ۲-۱۶ میراگر جرمی تنظیم شده نیمه‌فعال



شکل ۲-۱۷ دستگاه SAIVS اجرا شده به عنوان میراگر جرمی تنظیم شده نیمه‌فعال

¹ Semi-active continuously and independently variable stiffness

فصل سوم

میراگرهای جرمی تنظیم شده

۳-۱- مقدمه

در این فصل تئوری اولیه میراگرهای جرمی بررسی می‌شود. معادلات دینامیکی معرفی و با توجه به بزرگی پاسخ فرکانسی بی‌بعد مقادیر بهینه برای تنظیم فرکانس سیستم میراگر جرمی بدست می‌آید. اصولاً، یک میراگر جرمی تنظیم شده یک زیرسیستم ارتعاشی است که به سازه میزبان بزرگ مقیاس وصل می‌گردد تا پاسخ دینامیکی سازه را کاهش دهد. فرکانس میراگر با فرکانس خاص سازه‌ای تنظیم می‌شود، بنابراین، وقتی این فرکانس تحریک می‌شود، میراگر نسبت به حرکت سازه‌ای در فاز مخالف شروع به تشدید می‌کند. انرژی به وسیله نیروی اینرسی میراگر که روی سازه اعمال می‌شود، مستهلک می‌شود. تئوری اولیه میراگر جرمی تنظیم شده اولین بار توسط فرام [۲۸] ۱۹۰۹ برای کم کردن حرکت دورانی و لرزش بدنه کشتی بکار گرفته شد. سپس، یک تئوری برای میراگر جرمی تنظیم شده، توسط ارمندیرد و دین‌هارتوگ [۲۹] ارائه شد، که جزئیات بیشتری در مورد تنظیم پارامترهای فرکانس و میرایی در کتاب ارتعاشات دینامیکی دین‌هارتوگ [۳۰] آمده است.

تئوری اولیه بر روی یک سیستم نامیرا با یک درجه آزادی که نیروی محرک سینوسی بر آن اعمال می‌شود، می‌باشد. گسترش تئوری میراگر جرمی تنظیم شده بر روی سیستم‌های با میرایی یک درجه آزادی توسط محققین مختلفی مورد بررسی قرار گرفته است. رندل و همکاران [۳۱]، واربرتن [۳۲]، واربرتن و آیریند [۳۳]، و تسای و لین [۳۴]، سهم قابل توجهی در این زمینه داشته‌اند.

۳-۲- تئوری اولیه

سیستم اصلی در شکل ۱-۳ شامل جرم m ، سختی فنری k ، میرایی ویسکوز c و نسبت میرایی ζ و سیستم میراگر جرمی تنظیم شده دارای جرم m_d ، سختی k_d ، و میرایی ویسکوز c_d و نسبت میرایی ζ_d است. سیستم هم تحت نیروی خارجی و هم تحریک زمین می‌باشد. معادلات حرکت به صورت زیر هستند:

$$m_d \ddot{u}_d + c_d \dot{u}_d + k_d u_d + m_d \ddot{u} = -m_d a_g \quad (۱-۳)$$

$$m \ddot{u} + c \dot{u} + k u - c_d \dot{u}_d - k_d u_d = -m a_g + p \quad (۲-۳)$$

پاسخ سیستم به تحریک تناوبی (هم p و هم u_g) در فرم قطبی به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\bar{u} = \frac{\hat{p}}{k} H_5 e^{i\delta_5} - \frac{\hat{a}_g m}{k} H_6 e^{i\delta_6} \quad (۳-۳)$$

$$\bar{u}_d = \frac{\hat{p}}{k} H_7 e^{-i\delta_7} - \frac{\hat{a}_g m}{k} H_8 e^{i\delta_8} \quad (۴-۳)$$

عبارات مختلف H و δ به صورت زیر می‌باشند:

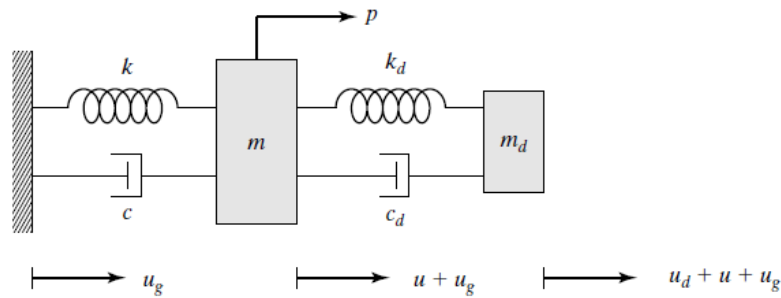
$$H_5 = \frac{\sqrt{[f^2 - \rho^2]^2 + [2\xi_d \rho f]^2}}{|D_3|} \quad (۵-۳)$$

$$H_6 = \frac{\sqrt{[(1+\bar{m})f^2 - \rho^2]^2 + [2\xi_d \rho f (1+\bar{m})]^2}}{|D_3|} \quad (۶-۳)$$

$$H_7 = \frac{\rho^2}{|D_3|} \quad (۷-۳)$$

$$H_8 = \frac{\sqrt{1 + [2\xi \rho]^2}}{|D_3|} \quad (۸-۳)$$

$$|D_3| = \sqrt{[-f^2 \rho^2 \bar{m} + (1 - \rho^2)(f^2 - \rho^2) - 4\xi \xi_d f \rho^2]^2 + 4[\xi \rho (f^2 - \rho^2) + \xi_d f \rho (1 - \rho^2 (1 + \bar{m}))]^2} \quad (۹-۳)$$



شکل ۱-۳ سیستم با یک درجه آزادی همراه با میراگر جرمی تنظیم شده

$$\delta_5 = \alpha_1 - \delta_7 \quad (۱۰-۳)$$

$$\delta_6 = \alpha_2 - \delta_7 \quad (۱۱-۳)$$

$$\delta_8 = \alpha_3 - \delta_7 \quad (۱۲-۳)$$

$$\tan \delta_7 = 2 \frac{\xi \rho (f^2 - \rho^2) + \xi_d f \rho (1 - \rho^2 (1 + \bar{m}))}{-f^2 \rho^2 \bar{m} + (1 - \rho^2)(f^2 - \rho^2) - 4 \xi \xi_d f \rho^2} \quad (۱۳-۳)$$

$$\tan \alpha_1 = \frac{2 \xi_d \rho f}{f^2 - \rho^2} \quad (۱۴-۳)$$

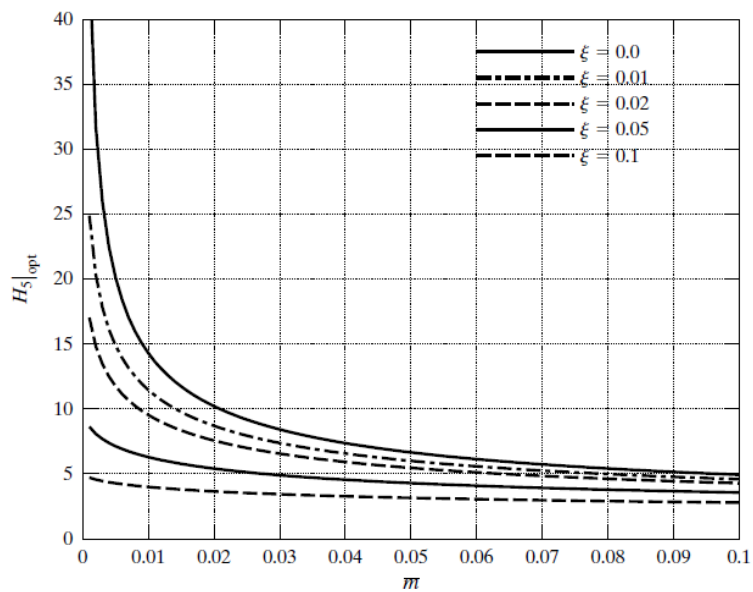
$$\tan \alpha_2 = \frac{2 \xi_d \rho f (1 + \bar{m})}{(1 + \bar{m}) f^2 - \rho^2} \quad (۱۵-۳)$$

$$\tan \alpha_3 = 2 \xi \rho \quad (۱۶-۳)$$

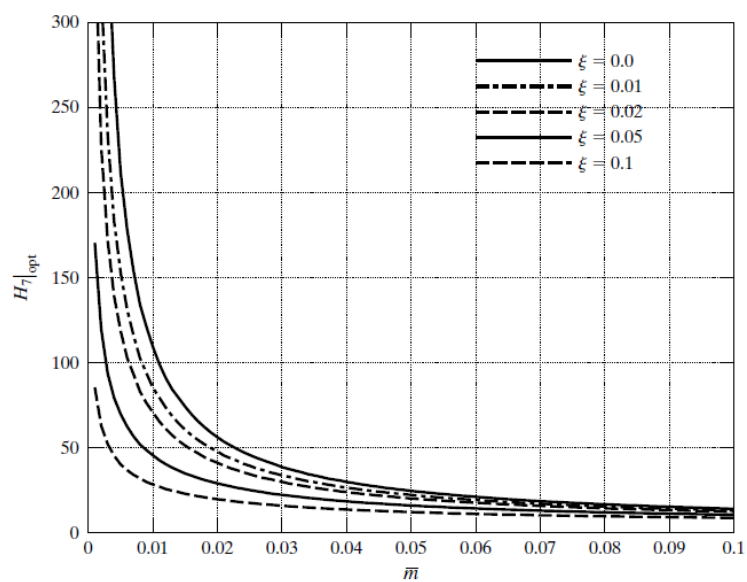
در معادلات فوق $\bar{m}$ و f به ترتیب نسبت جرمی و فرکانسی میراگر جرمی به سیستم اولیه می‌باشد. ρ نسبت فرکانسی تحریک اعمالی به فرکانس اصلی سیستم اولیه می‌باشد. نیروی خارجی وارد شده به جرم اصلی مورد بررسی قرار می‌گیرد. چون $|D_3|$ شامل ξ می‌باشد، نمی‌توان عبارات تحلیلی برای فرکانس تنظیم بهینه و نسبت میرایی بهینه را در عبارات شامل نسبت جرمی به دست آورد. در این مورد، این پارامترها به ξ هم وابسته خواهند بود. شبیه‌سازی‌های عددی می‌توانند برای ارزیابی H_5 و H_7 برای بازه‌ای از ρ و مقادیر معین f ، ξ ، $\bar{m}$ و ξ_d اعمال شود. با شروع از مقادیر خاصی برای $\bar{m}$ و ξ ، نمودار H_5 در مقابل ρ می‌تواند برای بازه‌ای از f و ξ_d حاصل شود. هر نمودار $H_5 - \rho$ یک مقدار پیک برای H_5 دارد. ترکیب خاصی از f و ξ_d که به کوچکترین مقدار پیک H_5 بستگی دارد، به عنوان حالت بهینه در نظر گرفته می‌شود. ادامه این روند برای مقادیر مختلف $\bar{m}$ و ξ ، داده‌های رفتاری را که برای طراحی سیستم میراگر نیاز است، تولید می‌کند.

شکل ۲-۳ تغییرات ماکزیمم مقدار H_5 و شکل ۳-۳ تغییرات ماکزیمم مقدار H_7 را برای

حالت بهینه نشان می‌دهد.



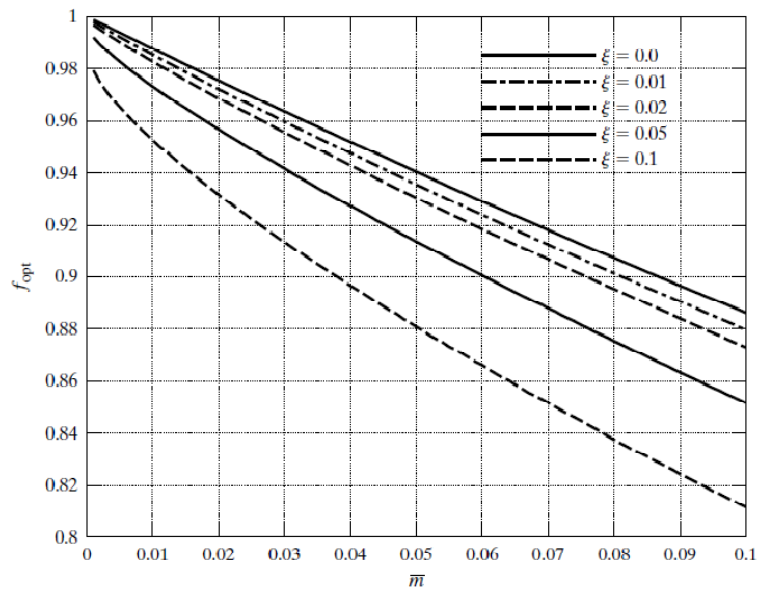
شکل ۲-۳ ماکزیمم ضریب افزایش دینامیکی برای سیستم با یک درجه آزادی



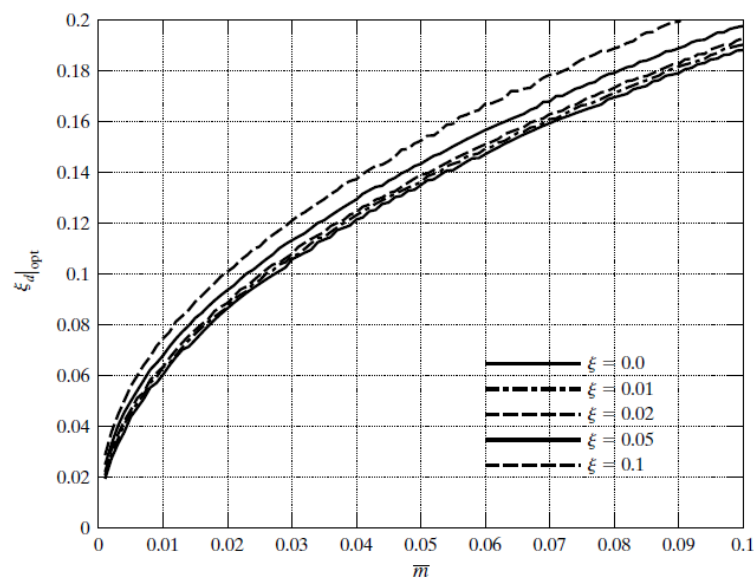
شکل ۳-۳ ماکزیمم ضریب افزایش دینامیکی میراگر جرمی تنظیم شده

نمودار مقادیر بهینه فرکانس و نسبت میرائی که از طریق شبیه‌سازی تولید شده، به ترتیب در شکل

۴-۳ و شکل ۵-۳ رسم شده است [۲].



شکل ۳-۴ فرکانس تنظیم بهینه میراگر جرمی تنظیم شده



شکل ۳-۵ نسبت میرائی بهینه برای میراگر جرمی تنظیم شده

۳-۳- الگوریتم طراحی میراگر جرمی تنظیم شده غیرفعال

با داشتن مشخصات یک سازه می‌توان سیستم میراگر جرمی تنظیم شده را برای کاهش پاسخ

آن طراحی کرد. الگوریتم طراحی یک میراگر جرمی تنظیم شده به صورت زیر می‌باشد [۲]:

(۱) بدست آوردن مقادیر مجاز برای جابجایی جرم اصلی و میراگر جرمی تنظیم شده

(۲) معین کردن نسبت‌های جرمی که این محدودیت‌های حرکت را اقلان می‌کنند، با

استفاده از شکل ۳-۲ و شکل ۳-۳. بزرگترین مقدار $\bar{m}$ انتخاب می‌شود.

(۳) معین کردن f_{opt} از روی شکل ۳-۴.

(۴) محاسبه ω_d :

$$\omega_d = f_{opt} \omega \quad (۱۷-۳)$$

(۵) محاسبه k_d :

$$k_d = m_d \omega_d^2 = \bar{m} k f_{opt}^2 \quad (۱۸-۳)$$

(۶) معین کردن $\xi_d|_{opt}$ از روی شکل ۳-۵.

(۷) محاسبه c_d :

$$c_d = 2 \xi_d|_{opt} \omega_d m_d = \bar{m} f_{opt} \left[2 \xi_d|_{opt} \omega m \right] \quad (۱۹-۳)$$

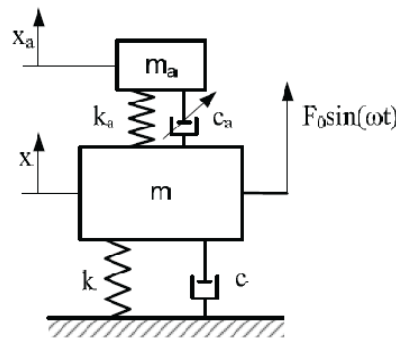
۳-۴- میراگرهای جرمی تنظیم شده پیشرفته

با به کارگیری میراگرهای جرمی تنظیم شده غیرفعال کاهش محسوسی در پاسخ سیستم اصلی تحت بارهای هارمونیک حاصل می‌شود. در حالیکه، میراگرهای جرمی تنظیم شده، تحت تحریکات لرزه‌ای نسبتاً بی‌تأثیر هستند، و در بعضی مواقع تأثیر منفی نیز دارند (اندکی پاسخ را افزایش دهند). این عملکرد ضعیف، به بی‌تأثیر بودن میراگر جرمی تنظیم شده غیرفعال در بارگذاری ضربه‌ای و همچنین ناتوانی آنها برای رسیدن به شرایط تشدید، و بنابراین استهلاک انرژی تحت تحریک تصادفی، نسبت داده می‌شود [۲].

اهداف پیشرفته‌هایی که در این زمینه انجام می‌گیرد، به کم یا اداره کردن خزش پارامترهایی که باعث خارج شدن از حالت تنظیم شده و کاهش در کرائی میراگر می‌شوند، مربوط می‌گردد. همچنین، خصوصیات یک میراگر جرمی تنظیم شده در صورتی که ارتعاش لرزه‌ای وارده در محدوده بزرگی از فرکانس باشد، بهینه نخواهد بود. توانایی در تنظیم فرکانس یک میراگر جرمی تنظیم شده هنگام عملکرد، برای جلوگیری از کاهش کرائی مفید می‌باشد. این نوع از رفتار به دسترسی درون

خطی به پارامترهای میراگر جرمی تنظیم شده نیاز دارد.

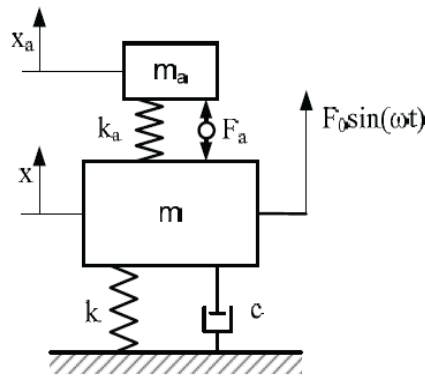
یک رویکرد متداول برای میرائی جرمی تنظیم شده به صورت شماتیکی در شکل ۶-۳ آورده شده است. این سیستم دینامیکی اساساً با سیستم دینامیکی میراگر جرمی تنظیم شده غیرفعال مشابه است. تنها تفاوت این است که میرائی c_a در میراگر جرمی تنظیم شده، تعدیل پذیر است.



شکل ۶-۳ میرائی کنترل شده میراگر جرمی تنظیم شده نیمه فعال

اگر سیستم نشان داده شده در شکل ۶-۳ شامل یک محرک توان-تولید^۱ میان جرم‌های اصلی و تنظیم شده بود، کنترل کاملاً فعال محسوب می‌شد (شکل ۷-۳). اولاً، در یک سیستم کاملاً فعال، محرک به یک منبع انرژی نیاز دارد. این منبع، برای نمونه، می‌تواند یک واحد توان هیدرولیکی یا یک خط تغذیه الکتریکی باشد. ثانیاً، کنترل یک سیستم کاملاً فعال به دلیل اینکه باعث ایجاد خستگی در سیستم می‌شود، می‌تواند عامل کاهش پایداری گردد. همچنین، قیمت تمام شده یک سیستم میراگر جرمی تنظیم شده فعال، به دلیل نیاز به محرک‌های با کیفیت مناسب و سنسورها، حدوداً بالا خواهد بود. مزیت این میراگر، کارائی عالی در کاهش پاسخ سازه می‌باشد.

^۱ Power generating actuator



شکل ۷-۳ میراگر جرمی تنظیم شده فعال

آبه و ایگوسا [۲۷] یک تئوری تحلیلی برای میراگر جرمی تنظیم شده نیمه فعال تحت تحریک گذرا ارائه دادند. تئوری برای سازه‌ای با یک درجه آزادی ارائه و برای سازه‌های پیوسته نیز تعمیم داده شد. این میراگر به طور اساسی از میراگر جرمی غیرفعال معمولی مؤثرتر تشخیص داده شد. آنها تنها بر روی کنترل پاسخ گذرای سیستم تمرکز کردند. همچنین، این تحقیق کاملاً تئوریکی بود و هیچ آزمایش عملی انجام نگرفت.

پینکاو و فوجینو [۳۵] تأثیر کنترل یک میراگر جرمی تنظیم شده نیمه فعال همراه با میراگر متغیر را تحت تحریک هارمونیک، به صورت تحلیلی و عددی بررسی نمودند. آنها یک قانون کنترل برای میرائی متغیر با استفاده از تئوری کنترل بهینه، بدست آوردند. همچنین، کارائی کنترل را با مقایسه پاسخ‌های دائم و گذرای سازه با پاسخ‌های آن همراه با میراگر جرمی تنظیم شده غیرفعال، ارزیابی کردند. نتایج این واقعیت را نشان دادند که، تحت تحریک هارمونیک، هر دو پاسخ دائم و گذرای سازه، همراه با یک میراگر جرمی نیمه فعال در مقایسه با حالت غیرفعال میراگر، به طور مؤثرتری کاهش می‌یابد. این بهبود عملکرد، با افزایش چهار برابری در جرم مؤثر میراگر غیرفعال، معادل می‌باشد.

کو [۳۶] در رساله خود، میراگر جرمی تنظیم شده نیمه فعال را برای کاهش ارتعاشات کف ساختمان بررسی کرده است. سیستم‌های کف، در اثر نیروهای دینامیکی حاصل از فعالیت‌های انسان،

مانند راه رفتن و پریدن، دچار حالت تشدید می‌شوند. روش‌های متداول سنتی برای جلوگیری از ارتعاش کف، هزینه‌بر بوده و در صورتی که مسکون باشد، باعث اختلال نیز می‌گردد. تحقیق کو ارائه یک نوع جدید از میراگرهای جرمی تنظیم شده نیمه‌فعال است که از میراگر مگنتورئولوژیکال (MR) استفاده می‌کند. کو کارائی چهار الگوریتم کنترل ساده را مقایسه کرده و در بررسی خود از هر دو مطالعه تحلیلی و آزمایشی بهره برده است. تحقیق کو به صورت قابل توجهی بر اساس پروسه آزمایشی بوده و بحث تحلیلی بسیار مختصر می‌باشد. نتایج آزمایشگاهی بسیار جالب هستند و نشان می‌دهند که کنترل نیمه‌فعال در عمل نیز مؤثر است. سیستم کنترل در جزئیات شرح داده شد، ولی برای کاربردهای عملی مناسب نمی‌باشند. این ویژگی تقریباً به همه تحقیقات در زمینه سیستم‌های نیمه‌فعال مربوط می‌شود. سیستم‌های کنترل منحصراً برای آزمایشگاه ساخته شده و باعث ایجاد فاصله بین کاربرد عملی و تحقیق می‌گردند [۳۷].

فصل چہارم

میراگر نیمہ فعال سیال مگنتورئولوجیکال

۴-۱- مقدمه

در این مطالعه از میراگر MR به عنوان محرک نیمه فعال استفاده شده است. این میراگر دارای ظرفیت نیرویی برابر با ۱۰۰۰ کیلونیوتن می باشد. در این فصل روش های مدل سازی مکانیکی برای کاربردهای عملی این میراگر بررسی شده است. بر اساس مدل مکانیکی منتخب میراگر MR شبیه سازی میراگر در نرم افزار MATLAB و در محیط SIMULINK انجام شده است [۳۸]. در نهایت نتایج شبیه سازی انجام شده ارائه می گردد که با نتایج ارائه شده در مقالات مربوط تطبیق خوبی نشان می دهد.

۴-۲- خواص سیال مگنتورئولوژیکال

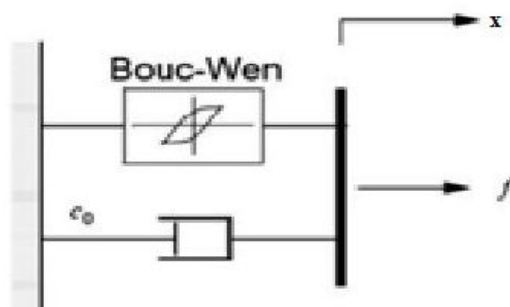
سیال مگنتورئولوژیکال، از ذرات ریزی که دارای خاصیت مغناطیسی و در روغن معلق هستند، تشکیل شده است. هنگامی که ذرات سیال در یک میدان مغناطیسی قرار می گیرند، دوقطبی شده و به صورت ردیف قرار گرفته که در این حالت جریان مایع سخت می شود. در نتیجه مقاومت برشی آن افزایش می یابد. این تغییر در حالت سیال فقط در چند میلی ثانیه اتفاق می افتد و مقدار سختی آن به شدت میدان مغناطیسی بستگی دارد. مواد مختلفی نظیر روان کننده های ویسکوپلاستیک، مواد جلوگیری کننده از رسوب ذرات و موادی برای افزایش عمر دستگاه به سیال MR اضافه می شود. حداکثر قدرت تحمل تنش برشی سیال MR به درجه مغناطیسی بودن ذرات معلق بستگی دارد. برای تهیه یک سیال با قدرت تحمل برشی زیاد، باید از ذرات با درجه مغناطیسی بالا استفاده کنیم. بهترین نوع این ذرات آلیاژ آهن و کبالت با درجه مغناطیسی ۲/۴ تسلا می باشد. از آنجا که این آلیاژ خیلی گران است، بجای آن از آهن خالص با درجه مغناطیسی ۲/۱۵ تسلا استفاده می شود. قطر این ذرات بین ۲ تا ۵ میکرون می باشد [۳۹].

۳-۴- ساختار فیزیکی

برای استفاده هرچه بهتر از خصوصیات منحصر به فرد میراگرهای MR در کاربردهای کنترلی، باید مدلی معرفی شود که دقیقاً جایگزین کننده رفتار میراگر MR باشد. در ولتاژ صفر ولت میراگر MR مثل یک وسیله کاملاً ویسکوز عمل می‌کند؛ به این معنی که رابطه نیرو-جابجایی تقریباً سهمی شکل و رابطه نیرو-سرعت نیز تقریباً خطی است. هرچه ولتاژ بالاتری اعمال شود، نیروی لازم برای جاری شدن مایع افزایش یافته و رفتاری مانند ماده پلاستیک بینگهام نشان می‌دهد. نیروی تولید شده میراگر نسبت به صفر متقارن نیست. این تأثیر به خاطر حضور یک مخزن در میراگر است که از نیتروژن تحت فشار ۳۰۰ پاسکال بر اینچ مربع پر شده است. این مخزن به جلوگیری از تشکیل حفره^۱ در مایع کمک می‌کند [۴۰].

۳-۴-۱- مدل مکانیکی میراگر

مدل رفتاری میراگرهای MR بر پایه مدل هیستریزیس باس-ون، موازی با یک میرائی اضافه شده برای تصحیح عملکرد، در شکل ۱-۴ نشان داده شده است. درستی این مدل ساده مکانیکی برای پیش‌بینی مناسب رفتار میراگر MR در بازه بزرگی از ورودی‌ها در یک مجموعه از آزمایشات نشان داده شده است [۴۱، ۴۲].



شکل ۱-۴ مدل مکانیکی میراگر MR

¹ cavitation

معادلاتی که بر نیروی تولید شده توسط میراگر حاکم هستند به شرح زیر می باشند:

$$F = c_0 \dot{x} + \alpha z \quad (۱-۴)$$

$$\dot{z} = -\gamma |\dot{x}| |z|^{n-1} - \beta \dot{x} |z|^n + A \dot{x} \quad (۲-۴)$$

x جابجایی وسیله، z متغیر تکمیلی و γ ، β ، n و A پارامترهای کنترل خطی سازی در باربرداری و همواری فرم انتقال از حالت قبل از جاری شدن به ناحیه بعد از جاری شدن، می باشند. وابستگی پارامترها به ولتاژ ورودی u به صورت زیر می باشد:

$$\alpha = \alpha(u) = \alpha_a + \alpha_b u, \quad c_0 = c_0(u) = c_{0a} + c_{0b} u \quad (۳-۴)$$

دینامیک سیستم به وسیله یک فیلتر درجه اول بر روی ورودی کنترل مدل شده است:

$$\dot{u} = -\eta(u - v) \quad (۴-۴)$$

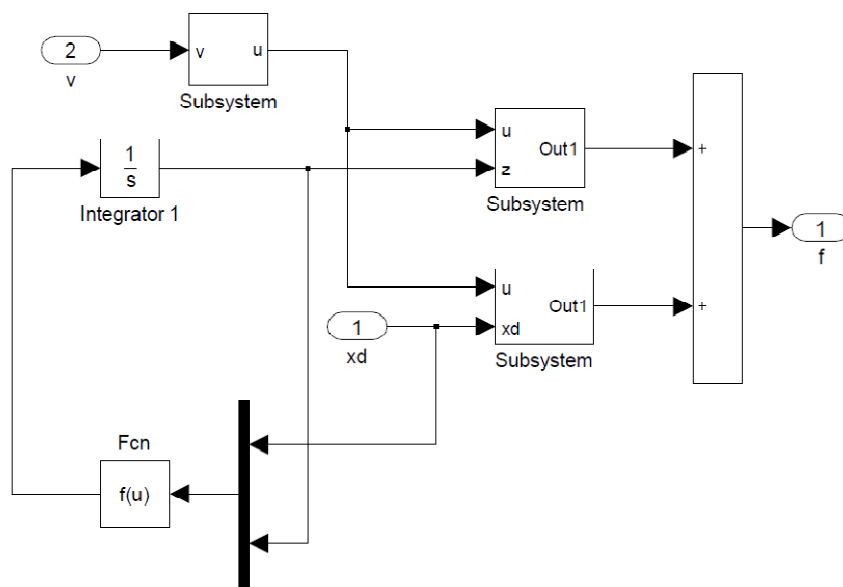
η یک ثابت زمانی می باشد که با فیلتر درجه اول همراه شده و v ولتاژ اعمالی می باشد. مقادیر این پارامترها طبق جدول ۴-۱ و بر اساس مدل یک نمونه آزمایشگاهی میراگر MR تست شده در دانشگاه واشینگتن [۴۲] می باشد که دارای ظرفیت نیروی ۱۰۰۰ کیلونیوتن و ماکزیمم ولتاژ اعمالی ۱۰ ولت می باشد. ماکزیمم توان این وسیله بنا بر نظر تولیدکننده ۵۰ وات است.

جدول ۴-۱ پارامترهای مدل میراگر MR ۱۰۰۰ کیلونیوتنی [۴۲]

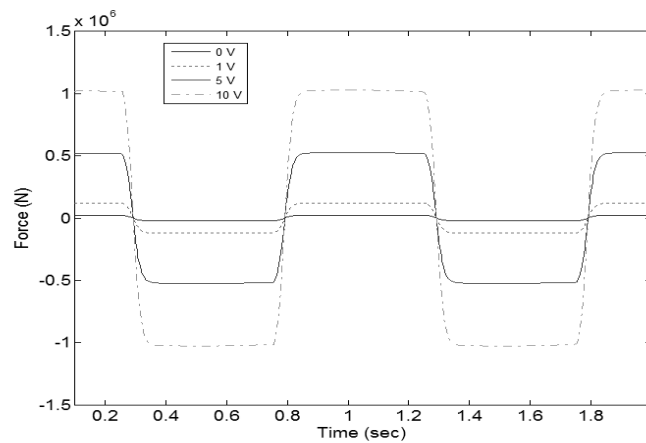
α_a	۱/۰۸۷۲e۵ N/cm	α_b	۴/۹۶۱۶e۵ N/cmV
c_{0a}	۴/۴۰ Ns/cm	c_{0b}	۴۴/۰ Ns/cmV
A	۱/۲	γ	۳ cm ⁻¹
η	۵۰ s ⁻¹	β	۳ cm ⁻¹
n = ۱			

۲-۳-۴- شبیه‌سازی میراگر

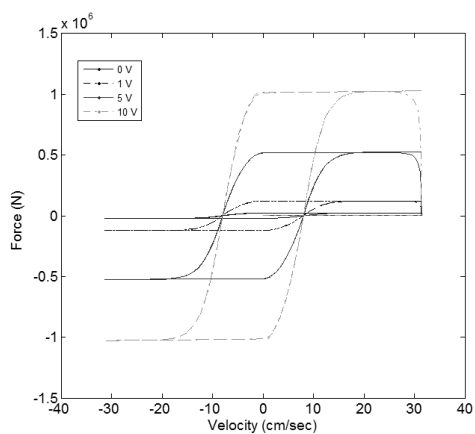
با توجه به مدل مکانیکی پیشنهادی سیستم میراگر MR مطابق شکل ۲-۴ در محیط SIMULINK شبیه‌سازی شده است. این میراگر دارای دو ورودی، اولی سرعت و دومی ولتاژ اعمالی به میراگر که می‌تواند مقداری در محدوده صفر تا ده ولت داشته باشد، می‌باشد. برای اطمینان از درست عمل کردن میراگر MR شبیه‌سازی شده، پاسخ آن را به تحریک تغییر مکان سینوسی با فرکانس ۱ هرتز و دامنه ۵ سانتی‌متر محاسبه کرده و در شکل ۳-۴ آورده شده است. این نتایج با نتایج ارائه شده توسط آگراوال و تن [۴۳] تطابق خوبی نشان می‌دهند.



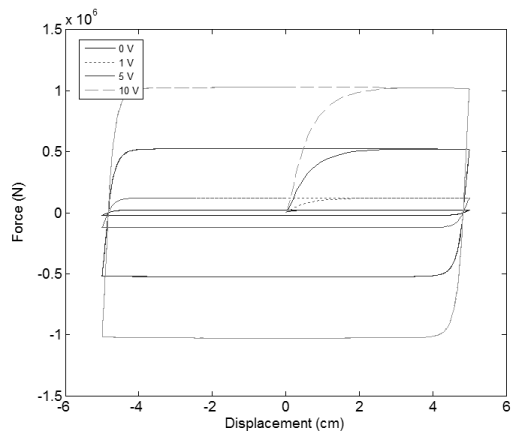
شکل ۲-۴ بلوک شبیه‌سازی میراگر MR ۱۰۰۰ کیلو نیوتنی



(الف) نیرو بر حسب زمان



(پ) نیرو بر حسب سرعت



(ب) نیرو بر حسب تغییر مکان

شکل ۳-۴ پاسخ میراگر MR ۱۰۰۰ کیلونیوتنی به تغییر مکان اعمالی در چهار سطح ولتاژ مختلف

فصل پنجم

کنترل فازی

یک مجموعه فازی دسته‌ای از اشیاء با یک تسلسل درجه عضویت است، که همچنین مجموعه‌ای توسط یک تابع عضویت مشخص می‌گردد که به هر شیء یک درجه عضویت در محدوده صفر تا یک اختصاص می‌دهد [۴۴]. کنترل فازی بر پایه تئوری مجموعه فازی لطفی‌زاده می‌باشد. کنترل فازی یک روش‌شناسی از کنترل هوشمند است که از تفکر انسان تقلید می‌کند و با استفاده از یک منطق فازی چند بنیانی و المان‌های هوش مصنوعی (اصول نتیجه‌گیری ساده شده) عکس‌العمل نشان می‌دهد [۴۵]. کلمه «فازی» در اینجا برای شرح عبارت‌هایی است که به اندازه کافی واضح نمی‌باشند و مشخصات تقریبی آنها به خود آنها، تخمین، و حتی به درک شهودی شخصی که این عبارات را توصیف می‌کند، بستگی دارد. در زندگی روزانه حالات زیادی هستند که با یک درجه معین از ابهام مشخص می‌شوند که توصیف آنها با عباراتی مانند اکثریت، زیاد، متعدد، نادقیق، یا کاملاً اتفاقی، که همه اینها در دسته «عبارات فازی» قرار می‌گیرند. از سوی دیگر، عبارات درست، نادرست، ممکن، لازم، هیچکدام، یا همه، مفاهیم واضح^۱ و دقیق را نشان می‌دهند [۴۶].

در هنگام سعی به توصیف برخی سیستم، ساده یا پیچیده، به این واقعیت برمی‌خوریم که همه پیشامدهای ممکن یا پدیده‌ها در سیستم را نمی‌توان مشخص نمود. حتی اگر بتوان این کار را انجام داد، همچنان یک مشکل وجود خواهد داشت: یک پیشامد ویژه در سیستم هر چند وقت رخ می‌دهد؟ شناخت ناقص از پیشامدها و تکرار غیرقابل پیش‌بینی از رخداد آنها، استفاده از مدل‌های سیستم تقریبی را تحمیل می‌کند. در تئوری سیستم کنترل ابزارهای بسیار خوبی برای مدل‌سازی تقریبی سیستم‌ها و برای طراحی تحلیلی الگوریتم‌های کنترلی پیدا شده، وجود دارد. مشکل زمانی بوجود می‌آید که مدل یک سیستم نامعلوم می‌باشد، یا اگر هم معلوم باشد، به قدری پیچیده است که طراحی کنترل‌کننده با روش‌های تحلیلی کلاسیک کاملاً ناممکن است. همچنین در برخی حالات مدل یک

¹ Crisp meanings

سیستم بسیار غیرخطی، و گوناگونی متغیرها و نرخ‌های تغییرات پارامتر بسیار بزرگ است. برخی از این حالات می‌توانند با استفاده از روش‌های کنترل انطباقی^۱ حل شود، ولی اساس ریاضی آنها نسبتاً پیچیده است و معمولاً با تعداد زیادی از تکرار محاسبات به اتمام می‌رسند. همچنین، برنامه‌های کنترل انطباقی با استفاده از یک مدل مرجع و تطبیق سیگنال همزمان عمل می‌کند (در اولین تکرار)، در نتیجه، فقط ساده‌سازی و تعدیل می‌تواند استفاده عملی از آن را ممکن سازد.

یک دسته مخصوص از مشکلات کنترل، کنترل پروسه‌های بسیار غیرخطی است که در معرض تأثیر بالایی از اختلالات خارجی قرار دارند. در این سیستم‌ها، تنها راه‌حل باقیمانده در عمل انجام می‌گیرد: این سیستم‌ها با اپراتورهایی که از تجربه چندساله و دانش آماری و مشخصات دینامیکی سیستم استفاده می‌کنند، کنترل می‌شود. کیفیت دست‌یافته کنترل معمولاً به دانش و تجربه اپراتور بستگی دارد. به عبارت دیگر، آنها «برنامه» یا «الگوریتم کنترل» را با توجه به تجربه خود و با انجام شکل نوعی تصمیم‌گیری زیر، اجرا می‌کنند:

اگر

یک چنین و یک چنین حالاتی از متغیرهای فرآیند (ورودی‌ها) باشند

آنگاه

یک چنین و یک چنین عمل کنترل (خروجی‌ها) لازم است.

درک چنین نوعی از کنترل بسیار آسان می‌باشد، چون در زندگی روزمره مثال‌های فراوانی، از آن وجود دارد [۴۶].

اولین کنترل‌کننده فازی توسط ممدانی [۴۷] ساخته شد. کنترل‌کننده برای دستگاهی که شامل یک موتور بخار و دیگ بخار می‌باشد، طراحی شد. مدل دستگاه دارای دو ورودی: گرمای ورودی به دیگ بخار و دریچه کنترل بخار در ورودی سیلندر موتور، و دو خروجی: فشار بخار آب در دیگ و

¹ Adaptive control methods

سرعت موتور، می‌باشد. مشکل موجود در کنترل کلاسیک، غیرخطی بودن مدل دستگاه، هم در اندازه و هم قطبیت متغیرهای ورودی، بود.

۵-۲- مجموعه‌های فازی و منطق فازی

در اینجا به صورت مختصر چند مفهوم اساسی از تئوری مجموعه فازی و منطق فازی آورده شده است.

۵-۲-۱- مجموعه‌ها و اصطلاحات فازی

U مجموعه‌ای از اشیائی است که معمولاً به صورت $\{u\}$ نشان داده می‌شوند و پیوسته یا گسسته می‌باشند. U مجموعه مرجع نامیده می‌شود و u المان عمومی U را نشان می‌دهد.

تعریف ۱: مجموعه فازی: یک مجموعه فازی F در مجموعه مرجع U توسط یک تابع عضویت μ_F که مقادیری در بازه $[0,1]$ دارد، مشخص می‌شود، برای مثال $\mu_F: U \rightarrow [0,1]$. یک مجموعه فازی ممکن است به صورت یک حالت عمومی سازی شده از مفهوم یک مجموعه عادی شامل جفت‌هایی از المان‌های عمومی u و درجه تابع عضویت آن مشاهده گردد: $F = \{(u, \mu_F(u)) | u \in U\}$. وقتی که U پیوسته باشد، یک مجموعه فازی F می‌تواند به طور مختصر به صورت $F = \int_U \mu_F(u)/u$ نوشته شود. و وقتی که U گسسته باشد، مجموعه فازی F می‌تواند به صورت زیر نشان داده شود:

$$F = \sum_{i=1}^n \mu_F(u_i)/u_i$$

تعریف ۲: تکیه‌گاه، نطقه تقاطع، و منفرد فازی: تکیه‌گاه مجموعه فازی F یک مجموعه قطعی از تمام نقاط u در U است، طوری که $\mu_F(u) > 0$. در حالت خاص، المان u در U طوری که $\mu_F = 0.5$ ، نطقه تقاطع نامیده می‌شود و اگر تکیه‌گاه یک مجموعه فازی، یک نطقه در U با $\mu_F = 1.0$ باشد، منفرد فازی گفته می‌شود [۴۸].

۵-۲-۲- عملیات نظری مجموعه

A و B دو مجموعه فازی در U، به ترتیب با توابع عضویت μ_A و μ_B می‌باشند. عملیات نظری مجموعه (اتحاد، اشتراک، و مکمل) برای مجموعه‌های فازی بوسیله توابع عضویت آنها تعیین می‌شود. تعریف ۳: اتحاد: تابع عضویت $\mu_{A \cup B}$ از اتحاد $A \cup B$ به صورت نقطه به نقطه برای تمام $u \in U$ به صورت زیر تعیین می‌شود:

$$\mu_{A \cup B}(u) = \max\{\mu_A(u), \mu_B(u)\} = \mu_A(u) \vee \mu_B(u)$$

تعریف ۴: اشتراک: تابع عضویت $\mu_{A \cap B}$ از اشتراک $A \cap B$ به صورت نقطه به نقطه برای تمام $u \in U$ به صورت زیر تعیین می‌شود:

$$\mu_{A \cap B}(u) = \min\{\mu_A(u), \mu_B(u)\} = \mu_A(u) \wedge \mu_B(u)$$

تعریف ۵: مکمل: تابع عضویت $\mu_{\bar{A}}$ از مکمل مجموعه فازی A (که با $\bar{A}$ ، $\neg A$ یا NOT A نشان داده می‌شود) به صورت نقطه به نقطه برای تمام $u \in U$ به صورت زیر تعیین می‌شود:

$$\mu_{\bar{A}}(u) = 1 - \mu_A(u)$$

تعریف ۶: ضرب کارتیزین: اگر $A_1, \dots, A_n$ مجموعه‌های فازی به ترتیب در $U_1, \dots, U_n$ باشند، ضرب کارتیزین $A_1, \dots, A_n$ یک مجموعه فازی در فضای ضرب $U_1 \times \dots \times U_n$ با تابع عضویت زیر خواهد بود:

$$\mu_{A_1 \times \dots \times A_n}(u_1, u_2, \dots, u_n) = \min\{\mu_{A_1}(u_1), \dots, \mu_{A_n}(u_n)\}$$

یا

$$\mu_{A_1 \times \dots \times A_n}(u_1, u_2, \dots, u_n) = \mu_{A_1}(u_1) \cdot \mu_{A_2}(u_2) \cdot \dots \cdot \mu_{A_n}(u_n)$$

تعریف ۷: رابطه فازی: یک رابطه فازی n تایی، یک مجموعه فازی در $U_1 \times \dots \times U_n$ است و به صورت زیر بیان می‌شود:

$$R_{U_1 \times \dots \times U_n} = \left\{ \left((u_1, \dots, u_n), \mu_R(u_1, \dots, u_n) \right) \mid (u_1, \dots, u_n) \in U_1 \times \dots \times U_n \right\}$$

تعریف ۸: ترکیب: اگر R و S به ترتیب روابط فازی در $U \times V$ و $V \times W$ باشند، ترکیب R و S یک رابطه فازی به صورت $R \circ S$ نشان داده می‌شود و به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$R \circ S = \left\{ \left[(u, w), \sup_v (\mu_R(u, v) * \mu_S(v, w)) \right], u \in U, v \in V, w \in W \right\}$$

که $*$ می‌تواند هر نوع عملگری در دسته نرم‌های مثلثی، از جمله مینیمم، ضرب جبری، یا ضرب کراندار باشد [۴۸].

۵-۲-۳- متغیرهای زبانی و مجموعه‌های فازی

تعریف ۹: عدد فازی: یک عدد فازی F در یک مجموعه مرجع پیوسته U ، برای مثال یک خط حقیقی، یک مجموعه فازی F در U است که نرمال و محدب می‌باشد، یعنی:

$$\max_{u \in U} \mu_F(u) = 1 \quad (\text{نرمال})$$

$$\mu_F(\lambda u_1 + (1 - \lambda)u_2) \geq \min(\mu_F(u_1), \mu_F(u_2)), \quad u_1, u_2 \in U, \quad \lambda \in [0, 1] \quad (\text{محدب})$$

استفاده از مجموعه‌های فازی زمینه‌ای برای یک روش سیستماتیک برای بکاربری مفاهیم مبهم و غیردقیق، فراهم می‌آورد. در حالت خاص می‌توان، مجموعه‌های فازی را برای نشان دادن متغیرهای زبانی به کار برد. یک متغیر زبانی می‌تواند، هم به عنوان متغیری که مقادیرش یک عدد فازی و هم متغیری که مقادیرش در عبارات زبانی تعیین شده، ملاحظه شود [۴۸].

۵-۳- مفهوم اصلی کنترل منطق فازی

شکل ۵-۱ ترکیب اساسی کنترل فازی را نشان می‌دهد، که شامل چهار قسمت اصلی می‌شود:

(۱) واسط فازی‌سازی^۱ شامل توابع زیر می‌شود:

(الف) مقادیر متغیرهای ورودی را اندازه می‌گیرد،

(ب) برای انتقال بازه مقادیر متغیرهای ورودی به مجموعه‌های مرجع مربوط، یک

^۱ Fuzzification interface

نگاشت مقیاس انجام می‌دهد،

ج) برای تبدیل داده‌های ورودی به مقادیر زبانی مناسب که ممکن است به عنوان برچسب‌های مجموعه‌های فازی نشان داده شوند، از تابع فازی‌سازی استفاده می‌کند.

۲) پایگاه دانش^۱ شامل دانشی از حوزه کاربرد و اهداف کنترل وابسته می‌باشد. یک «پایگاه داده^۲» و یک «پایگاه قانون کنترل زبانی (فازی)^۳» را دربرمی‌گیرد:

الف) پایگاه داده تعاریف لازم را که برای تعیین قوانین کنترل و بکاربری داده فازی در یک کنترل‌کننده منطق فازی استفاده می‌شوند، فراهم می‌آورد.

ب) پایگاه قانون اهداف کنترل را مشخص می‌کند و رویه کنترل حوزه توسط مجموعه‌ای از قوانین کنترل زبانی مشخص می‌شود.

۳) منطق تصمیم‌گیری^۴ هسته اصلی یک کنترل‌کننده فازی می‌باشد؛ قابلیت شبیه‌سازی تصمیم‌گیری انسان، بر پایه مفاهیم فازی و رفتارهای کنترل فازی استنتاجی که مفهوم فازی و قوانین استنتاج در منطق فازی را به کار می‌گیرند، دارد.

۴) واسط فازی‌زدائی^۵ دستورالعمل زیر را انجام می‌دهد:

الف) نگاشت مقیاس، که بازه مقادیر متغیرهای خروجی را به مجموعه‌های مرجع مربوط تبدیل می‌کند،

ب) فازی‌زدائی، که یک عمل کنترل غیرفازی را از یک عمل کنترل فازی منتج حاصل

می‌کند. روش مرکز سطح (COA^۶) از روش‌های فازی‌زدائی می‌باشد [۴۸].

¹ Knowledge base

² Data base

³ Linguistic (fuzzy) control rule base

⁴ Decision making logic

⁵ Defuzzification interface

⁶ Center of Area



شکل ۵-۱ ترکیب اصلی کنترل کننده منطق فازی

۵-۳-۱- عبارات شرطی فازی و قوانین کنترل فازی

در کنترل کننده فازی، رفتار دینامیکی سیستم فازی توسط یک مجموعه از قوانین تعریف زبانی بر پایه دانش تخصصی، مشخص می گردد. دانش تخصصی معمولاً فرم زیر را داراست:

اگر (مجموعه‌ای از شرایط اقناع شوند) / آنگاه (مجموعه‌ای از نتایج می‌توانند منتج شوند).

به دلیل اینکه شرط مقدم و نتایج این قوانین اگر-آنگاه با مفاهیم فازی مربوط هستند (عبارات زبانی)، معمولاً به آنها عبارات شرطی فازی^۱ گفته می‌شوند. قانون کنترل فازی، یک عبارت شرطی فازی است که شرط مقدم، یک شرط در حوزه کاربرد آن، و نتیجه، یک عمل کنترلی برای سیستم تحت کنترل می‌باشد. اساساً، قوانین کنترل فازی یک روش مناسب برای بیان رویه کنترل و دانش محیط کاربرد فراهم می‌آورند. بعلاوه، متغیرهای زبانی متعددی ممکن است در شروط مقدم و نتایج این قوانین وارد شوند. وقتی چنین است، سیستم به عنوان یک سیستم فازی چند-ورودی-چند-خروجی ($MIMO^2$) ارجاع داده شود. برای مثال، در مورد سیستم‌های فازی دو-ورودی-یک-خروجی ($MISO^3$)، قوانین کنترل فازی فرم زیر را خواهد داشت:

¹ Fuzzy conditional statement

² Multi-input-multi-output

³ Multi-input-single-output

$$\begin{aligned}
R_1 : & \text{if } x \text{ is } A_1 \text{ and } y \text{ is } B_1 \text{ then } z \text{ is } C_1, \\
R_2 : & \text{if } x \text{ is } A_2 \text{ and } y \text{ is } B_2 \text{ then } z \text{ is } C_2, \\
& \dots \quad \dots \quad \dots \quad \dots \\
& \dots \quad \dots \quad \dots \quad \dots \\
R_n : & \text{if } x \text{ is } A_n \text{ and } y \text{ is } B_n \text{ then } z \text{ is } C_n.
\end{aligned}$$

x , y و z متغیرهای زبانی هستند که دو متغیر حالت پردازش و یک متغیر کنترل را نشان می‌دهند؛ A_i , B_i و C_i به ترتیب مقادیر زبانی متغیرهای زبانی x , y و z در مجموعه‌های مرجع مربوط X , Y و Z با $i=1, 2, \dots, n$ می‌باشند؛ و یک رابط جمله ضمنی^۱ نیز قوانین را به یک مجموعه قانون یا به صورت معادل، یک پایگاه قانون، ارتباط می‌دهد [۴۸].

قبل از اینکه برای مدل و تحلیل یک سیستم، قوانین اگر-آنگاه فازی را به کار ببریم، ابتدا باید مفهوم عبارت «if x is A then y is B »، که به صورت $A \rightarrow B$ خلاصه می‌شود، را توصیف کرد. این عبارت رابطه بین دو متغیر x و y را بیان می‌کند؛ قانون اگر-آنگاه فازی به عنوان یک رابطه فازی دوتائی^۲ R ، در فضای ضرب $X \times Y$ مشخص می‌شود. یک رابطه فازی دوتائی R ، بسطی از ضرب کلاسیک کارتزین می‌باشد، که هر عضو $(x, y) \in X \times Y$ با یک درجه عضویت $\mu_R(x, y)$ همراه می‌شود. دو راه برای بیان قانون $A \rightarrow B$ وجود دارد. اگر $A \rightarrow B$ به صورت « A همراه شده با B » بیان شود آنگاه:

$$R = A \rightarrow B = A \times B = \int_{X \times Y} \mu_A(x) \tilde{*} \mu_B(y) / (x, y)$$

$\tilde{*}$ یک اپراتور AND فازی (به طور کلی، اُترم) است. از سوی دیگر، اگر $A \rightarrow B$ به صورت

« A شامل B است»، آنگاه به صورت چهار فرمول زیر می‌تواند نوشته شود:

- استنباط کلی^۳: $R = A \rightarrow B = \neg A \cup B$.
- حساب گزاره‌ای^۴: $R = A \rightarrow B = \neg A \cup (A \cap B)$.

¹ Implicit sentence connective

² Binary fuzzy relation

³ Material implication

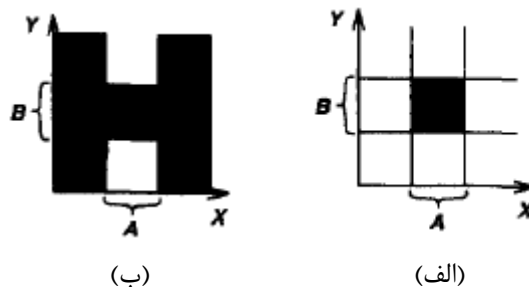
⁴ Propositional calculus

• حساب گزاره‌ای بسط داده شده^۱: $R = A \rightarrow B = (\neg A \cap \neg B) \cup B$.

• عمومی سازی قانون قیاس^۲: $\mu_A(x, y) = \sup \{c \mid \mu_A(x) * c \leq \mu_B(y) \text{ and } 0 \leq c \leq 1\}$.

که $R = A \rightarrow B$ و $*$ یک اپراتور اُترم است.

اگر چه این چهار فرمول در ظاهر متفاوت هستند، وقتی A و B گزاره‌های منطقی دو-ارزشی باشند، تمام آنها به اتحاد $A \rightarrow B \equiv \neg A \cup B$ کاهش می‌یابند. شکل ۵-۲ این دو بیان از قانون فازی $A \rightarrow B$ را نشان می‌دهد [۴۹].



شکل ۵-۲- دو بیان مفهوم فازی: (الف) A همراه شده با B، (ب) A شامل B است.

۵-۳-۲- استدلال فازی (استدلال تقریبی)

استدلال فازی یک رویه استنتاجی است، که برای گرفتن نتایج از یک مجموعه قوانین اگر-آنگاه فازی و یک یا چند شرط، استفاده می‌شود. قبل از معرفی استدلال فازی، قانون ترکیبی استنتاج^۳، که اساس اصلی استدلال فازی است، معرفی می‌شود.

فرض کنید منحنی $y=f(x)$ بر رابطه بین x و y حاکم است. اگر داشته باشیم $x=a$ ، آنگاه از روی $y=f(x)$ داریم $y=b=f(a)$ ؛ به شکل ۵-۳ توجه کنید. در حالت کلی، a می‌تواند یک بازه و $f(x)$ یک تابع بازه-مقدار^۴، همانطور که در شکل ۵-۳-ب نشان داده شده، باشد. برای یافتن بازه نتیجه $y=b$ مطابق با بازه $x=a$ ، ابتدا یک امتداد استوانه‌ای از a (امتداد دامنه a از X به $X \times Y$) ایجاد کرده و سپس فصل

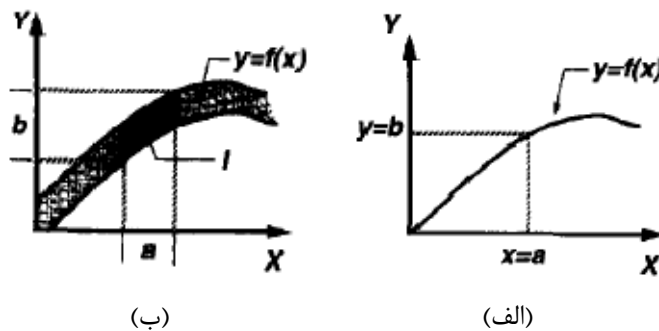
¹ Extended propositional calculus

² Modus ponens

³ Compositional rule of inference

⁴ Interval-valued function

مشترک I با منحنی بازه-مقدار را می‌یابیم. تصویر I بر روی محور y ، بازه $y=b$ را بدست می‌دهد.



شکل ۳-۵- استنتاج $y=b$ از $x=a$ و $y=f(x)$: (الف) و a و b نقطه باشند، $y=f(x)$ منحنی باشد؛ (ب) و a و b بازه باشند، $y=f(x)$ تابع بازه-مقدار باشد.

با یک مرحله کلی‌سازی در این روند، فرض می‌شود A یک مجموعه فازی از X و F یک رابطه فازی در $X \times Y$ ، همانطور که در شکل ۴-۵- (الف) و (ب) نشان داده شده است. برای یافتن مجموعه فازی B ، دوباره، یک امتداد استوانه‌ای با قاعده A ، $c(A)$ ، ایجاد می‌کنیم. فصل مشترک $c(A)$ و F (شکل ۴-۵- (ج)) ناحیه فصل مشترک I ، در شکل ۴-۵- (ب)، را تشکیل می‌دهد. با تصویر $c(A) \cap F$ بر روی محور y ، همانطور که در شکل ۴-۵- (د) نشان داده شده، y را به عنوان یک مجموعه فازی B بر محور y ، نتیجه می‌گیریم. اگر μ_A ، $\mu_{c(A)}$ ، μ_B و μ_F به ترتیب توابع عضویت A ، $c(A)$ ، B و F باشند، آنگاه رابطه $\mu_{c(A)}$ با μ_A به صورت زیر خواهد بود:

$$\mu_{c(A)}(x, y) = \mu_A(x)$$

$$\begin{aligned} \mu_{c(A) \cap F}(x, y) &= \min[\mu_{c(A)}(x, y), \mu_F(x, y)] \\ &= \min[\mu_A(x), \mu_F(x, y)] \end{aligned} \quad \text{سپس داریم:}$$

با تصویر $c(A) \cap F$ بر روی محور y ، داریم:

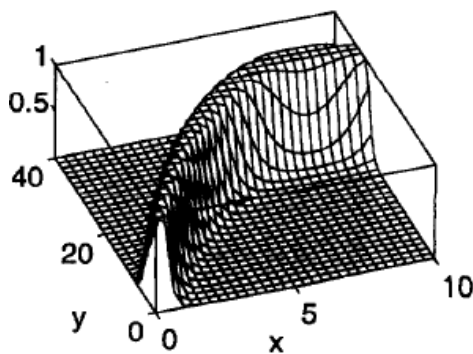
$$\begin{aligned} \mu_B(y) &= \max_x \min[\mu_A(x), \mu_F(x, y)] \\ &= \vee_x [\mu_A(x) \wedge \mu_F(x, y)] \end{aligned}$$

به این رابطه ترکیب max-min اطلاق می‌شود، و B به صورت زیر نشان داده می‌شود:

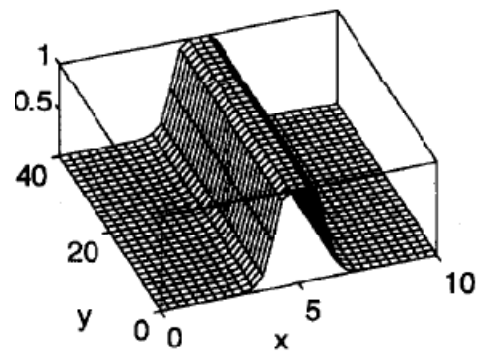
$$B = A \circ F$$

◦ نشان دهنده اپراتور ترکیب است. اگر عمل ضرب را برای AND فازی و ماکزیمم را برای OR فازی

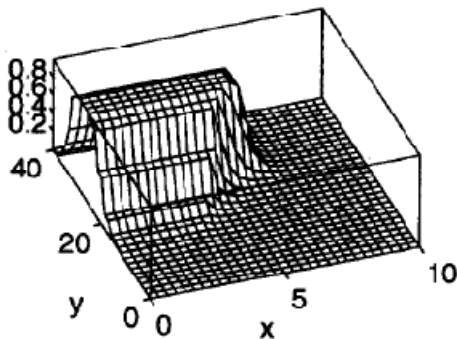
انتخاب کنیم، آنگاه ترکیب ماکزیمم-ضرب خواهیم داشت، و $\mu_B(y)$ برابر با $\bigvee_x [\mu_A(x) \mu_F(x, y)]$ خواهد بود.



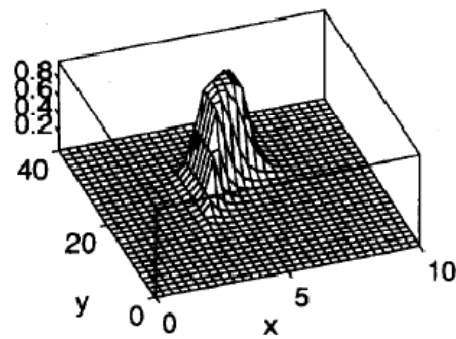
(ب) رابطه فازی F بر x و y



(الف) امتداد استوانه‌ای از A



(د) تصویر (ج) بر روی محور y



(ج) مینیمم (الف) و (ب)

شکل ۴-۵- قانون ترکیبی استنتاج

قانون اصلی استدلال در منطق کلاسیک دو مقدار قانون قیاس نامیده می‌شود و بدین صورت

بیان می‌شود:

x is A
If x is A then y is B

y is B

بطور مثال اگر یک قانون ساده را در نظر بگیریم که: «اگر گوجه فرنگی قرمز است، آنگاه گوجه فرنگی رسیده است.» و «گوجه فرنگی قرمز است.» گزاره درستی باشد، آنگاه «گوجه فرنگی رسیده است.» نیز صحیح خواهد بود. در عمل اکثراً از استدلال‌های تقریبی استفاده می‌شود؛ به طور مثال برای همین قانون: «گوجه فرنگی کمابیش قرمز است.»، آنگاه نتیجه این خواهد بود: «گوجه فرنگی کمابیش رسیده است.» این استدلال را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

$$\begin{array}{l} \text{If } x \text{ is } A \text{ then } y \text{ is } B \\ x \text{ is } A' \\ \hline y \text{ is } B' \end{array}$$

که در آن A' و A مجموعه‌های فازی در مجموعه مرجع X ، B و B' مجموعه‌های فازی در مجموعه مرجع Y هستند. این روند استنباط را استدلال فازی یا قیاس تعمیم یافته^۱ می‌نامند. اگر $A \rightarrow B$ رابطه فازی R در $X \times Y$ باشد، آنگاه تابع عضویت مجموعه فازی B' که بیانگر نتیجه استدلال است، به صورت زیر بدست می‌آید:

$$B' = A' \circ (A \rightarrow B) = A' \circ R \Rightarrow \mu_{B'}(y) = S_x[T(\mu_{A'}(x), \mu_R(x, y))]$$

با توجه به اُترم‌ای که استفاده می‌شود، به ترکیب max-min یا max-product تبدیل می‌شود، زیرا همانطور که گفته شد، معمولاً از تابع max به عنوان زوج اُترم استفاده می‌شود [۴۹].

۵-۳-۲-۱- قیاس تعمیم یافته برای یک قانون با یک شرط

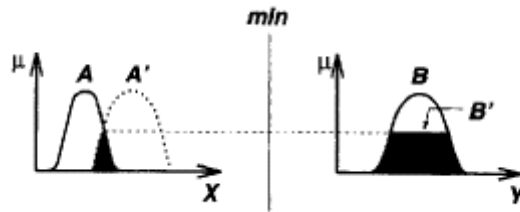
ساده‌ترین مدل استدلال می‌تواند یک قانون با یک شرط باشد، در این صورت چنانچه فرض شود عملگر $*$ ، عملگر اُترم (عملگر AND) باشد و از $\vee$ (OR منطقی یا max) برای زوج اُترم استفاده شود:

$$\mu_{B'}(y) = [\vee_x (\mu_{A'}(x) * \mu_A(x))] * \mu_B(y) = w * \mu_B(y)$$

w به نوعی بیشترین درجه شباهت A و A' می‌باشد. این رویه با فرض عملگر min بجای $*$ نشان داده

^۱ Generalized Modus Ponens

شده است. عملگر * تابع عضویت حکم را بر اساس درجه سازگاری تعدیل می کند [۴۹].



شکل ۵-۵- بیان قیاس عمومی با تفسیر ممدانی و عملگر آنرم

۵-۳-۲- قیاس تعمیم یافته برای یک قانون با چند شرط

شکل کلی این استدلال بدین صورت است:

قانون If x is A and y is B then z is C

فرض x is A' and y is B'

حکم: z is C'

C' را می توان به صورت زیر نوشت:

$$C' = (A' \times B') \circ (A \times B \rightarrow C)$$

و سپس نتیجه می شود:

$$\begin{aligned} \mu_{C'}(z) &= \bigvee_{x,y} [\mu_{A'}(x) \wedge \mu_{B'}(y)] \wedge [\mu_A(x) \wedge \mu_B(y) \wedge \mu_C(z)] \\ &= \bigvee_{x,y} [\mu_{A'}(x) \wedge \mu_{B'}(y) \wedge \mu_A(x) \wedge \mu_B(y)] \wedge \mu_C(z) \\ &= \{ \bigvee_x [\mu_{A'}(x) \wedge \mu_A(x)] \} \wedge \{ \bigvee_y [\mu_{B'}(y) \wedge \mu_B(y)] \} \wedge \mu_C(z) \\ &= (w_1 \wedge w_2) \wedge \mu_C(z) \end{aligned}$$

w_1 و w_2 به ترتیب ماکزیمم درجه سازگاری^۱ بین A و A'، و B و B' نامیده می شود. $w_1 * w_2$ قدرت

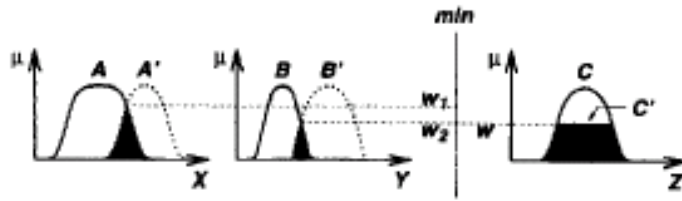
آتش^۲ قانون فازی یا درجه تحقق^۳ نامیده می شود. در شکل ۵-۶ این استدلال نشان داده شده است

[۴۹].

¹ Degree of compatibility

² Firing strength

³ Degree of fulfillment



شکل ۵-۶- استدلال فازی با یک قانون دارای چند شرط

۵-۳-۲-۳- قیاس تعمیم یافته برای چند قانون با چندین شرط

چند قانون فازی معمولاً به صورت اجتماعی از روابط فازی، بیان کننده قوانین فازی می باشد. اگر

قیاس تعمیم یافته‌ای به شکل زیر باشد:

قانون ۱: if x is A_1 and y is B_1 then z is C_1

قانون ۲: if x is A_2 and y is B_2 then z is C_2

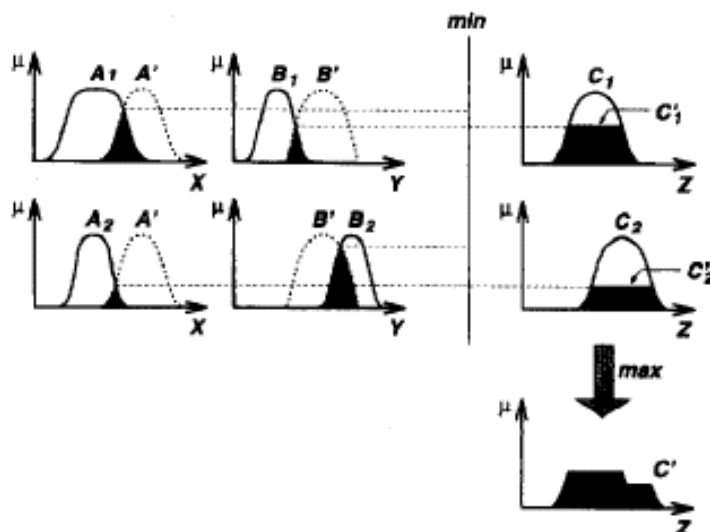
حقیقت: x is A' and y is B'

با فرض $R_1 = A_1 \times B_1 \rightarrow C_1$ و $R_2 = A_2 \times B_2 \rightarrow C_2$ به صورت زیر بدست می آید:

$$C' = (A' \times B') \circ (R_1 \cup R_2) = [(A' \times B') \circ R_1] \cup [(A' \times B') \circ R_2] = C'_1 \cup C'_2$$

C'_1 و C'_2 مجموعه های فازی استنباط شده از قوانین ۱ و ۲ می باشد. این حالت کلی استدلال با

بکارگیری عملگرهای AND و OR منطقی، در شکل ۵-۷ نشان داده شده است.



شکل ۵-۷- استدلال فازی با چند قانون و چند شرط برای هر قانون

بطور خلاصه روند استدلال فازی را می‌توان به چهار مرحله تقسیم کرد:

درجه سازگاری: مقایسه حقایق موجود با فرض‌های قوانین برای به دست آوردن درجه سازگاری

بین حقایق و فرضیات قوانین.

درجه تحقیق: ترکیب درجات سازگاری با عملگرهای AND یا OR فازی برای تعیین درجه

تحقق، نشان‌دهنده این است که تا چه اندازه فرض قانون اقناع شده است.

توابع عضویت تعدیل شده / حکام^۱: اعمال درجه تحقق (و وزن قانون در صورت وجود) بر تابع

عضویت حکم یک قانون، برای بدست آوردن تابع عضویت تعدیل شده حکم.

تابع عضویت خروجی مرکب^۲: جمع توابع عضویت تعدیل شده، برای بدست آوردن تابع عضویت

خروجی مرکب [۴۹].

۵-۳-۴- سیستم استنباط فازی ممدانی

این سیستم تقریباً معادل آنچه در مبحث استدلال فازی با چندین قانون و چند فرض برای هر

قانون می‌باشد، با این تفاوت که الگوهای ورودی (مثلاً A' و B')، بجای یک مجموعه فازی، یک

مجموعه فازی یکتا، یا به عبارت دیگر عدد قطعی می‌باشند. این سیستم استنباط را برای اولین بار

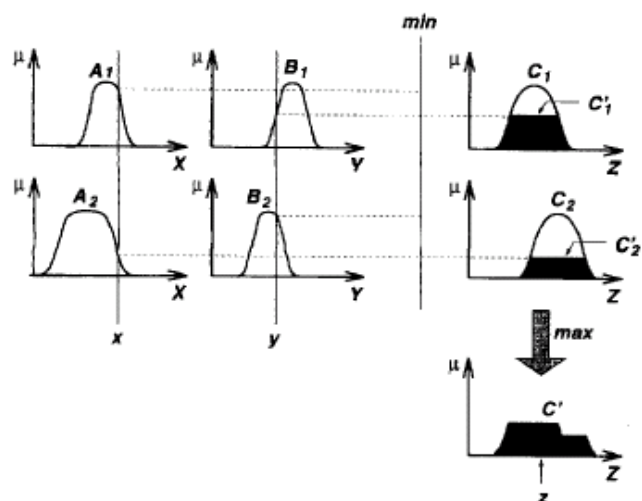
ممدانی برای کنترل یک موتور بخار بکار برد و از توابع $\max$ و $\min$ به ترتیب برای عملگرهای OR و

AND استفاده کرد. سیستم استنباط فازی ممدانی را، همانطور که در شکل ۵-۸ نشان داده شده، با

دو قانون و تحت تأثیر تغییر دو متغیر قطعی x و y نشان می‌دهد [۴۹].

^۱ Qualified consequent membership function

^۲ Overall output membership function



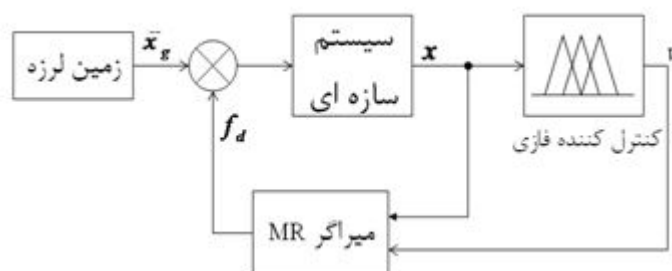
شکل ۵-۸- سیستم استنباط فازی ممدانی با دو قانون برای ورودی‌های قطعی و تابع $\min$ برای عملگر AND

فصل ششم

مدل سازی سیستم و طراحی کنترل کننده

۱-۶- مقدمه

برای بررسی رفتار یک سیستم سازه‌ای همراه با یک سیستم کنترل‌کننده که تحت تحریک زمین‌لرزه یا باد و غیره قرار می‌گیرد، ابتدا نیاز به مدل ریاضی این سیستم است. از محیط Simulink در نرم‌افزار Matlab می‌توان برای شبیه‌سازی این مدل‌های ریاضی استفاده نمود. در این فصل نحوه مدل‌سازی سیستم سازه‌ای و کنترل‌کننده فازی شرح داده می‌شود. به این منظور دیاگرام کلی سیستم شبیه‌سازی شده در شکل ۱-۶ نشان داده شده است. سازه مورد مطالعه تحت تحریک زمین‌لرزه قرار دارد. پاسخ سازه ورودی کنترل‌کننده فازی می‌باشد. کنترل‌کننده فازی با توجه به قوانین فازی، مقدار ولتاژ اعمالی مناسب را برای به کار انداختن میراگر نیمه‌فعال MR محاسبه می‌کند. نیروی میرایی تولید شده توسط میراگر MR به میراگر جرمی تنظیم شده اعمال می‌شود.



شکل ۱-۶ بلوک دیاگرام کنترل فازی نیمه‌فعال سیستم سازه‌ای

۲-۶- مدل سازه‌ای

میراگر جرمی تنظیم شده یک وسیله کنترل مهندسی کلاسیک می‌باشد که شامل یک جرم، یک فنر و یک میراگر ویسکوز می‌باشد. فرکانس طبیعی میراگر جرمی نسبت به یکی از فرکانس‌های طبیعی سازه تنظیم می‌شود. هدف این مطالعه، کنترل سیستم اصلی توسط یک میراگر جرمی تنظیم شده نیمه‌فعال می‌باشد. بدین منظور با توجه به شکل ۲-۶ یک میراگر جرمی همراه با فنر ثابت و میراگر ویسکوز و میراگر نیمه‌فعال MR که نسبت به مد اول سازه تنظیم شده است، استفاده گردیده است.

معادله حرکت یک سازه ساختمانی همراه با میراگر جرمی تنظیم شده نیمه فعال که تحت

تحریک لرزه‌ای تکیه‌گاه $\ddot{x}_g$ قرار دارد به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = -[M]\{\Lambda\}\ddot{x}_g + \{\Gamma\}(c_d\dot{x}_d + k_d x_d + f_{MR}) \quad (۱-۶)$$

معادله حرکت میراگر جرمی نیز به این صورت خواهد بود:

$$m_d\ddot{x}_d + c_d\dot{x}_d + k_d x_d = -m_d(\ddot{x}_n + \ddot{x}_g) - f_{MR} \quad (۲-۶)$$

بردار $n \times 1$ $\{x\}$ نشان‌دهنده جابجایی هر طبقه نسبت به تکیه‌گاه می‌باشد، n تعداد طبقات، بردار $n \times 1$ $\{\Lambda\}$ بردار تأثیر است که جابجایی هر طبقه در نتیجه اثر جابجایی استاتیکی زمین به مقدار یک واحد می‌باشد، و ماتریس‌های $n \times n$ $[M]$ ، $[C]$ ، $[K]$ به ترتیب ماتریس‌های جرم، میرایی و سختی سازه می‌باشند. ماتریس جرم برای سازه با این فرض می‌باشد که جرم‌ها به صورت متمرکز در طبقات می‌باشند. f نیروی معادل میراگر نیمه فعال MR است. m_d ، c_d ، k_d به ترتیب جرم میراگر جرمی، میرایی ویسکوز و سختی میراگر، x_d و x_n به ترتیب جابجایی نسبی میراگر جرمی نسبت به سازه و جابجایی سازه می‌باشد. Γ برداری است که نشان دهنده محل اثر نیروی میراگر جرمی تنظیم شده است. در این مطالعه از یک سیستم سازه‌ای با ده درجه آزادی برای بررسی میراگر جرمی تنظیم شده نیمه فعال استفاده شده است. در پیوست ۱ مشخصات این سیستم سازه‌ای که شامل ماتریس جرم و سختی می‌باشد، آمده است. ماتریس میرایی نیز با فرض میرایی مودال محاسبه می‌شود.

معادله حرکت سازه در فضای حالت به این صورت می‌باشد:

$$\begin{aligned} \dot{Z} &= A_s Z + B_s u \\ Y &= C_s Z + D_s u \end{aligned} \quad (۳-۶)$$

بردار حالت Z به صورت زیر انتخاب می‌شود:

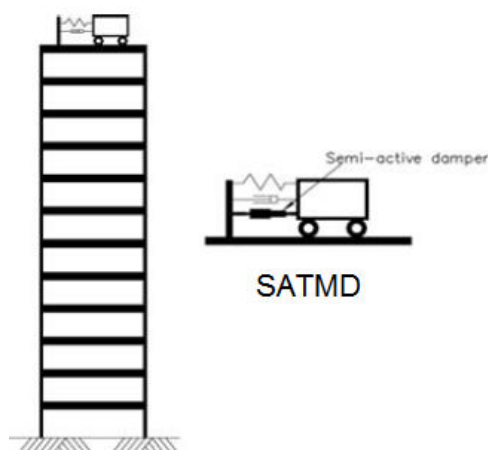
$$Z = \begin{Bmatrix} \{x\} \\ \{\dot{x}\} \end{Bmatrix} \quad (۴-۶)$$

و ماتریس‌های فضای حالت به شرح زیر می‌باشد:

$$\begin{aligned} A_s &= \begin{bmatrix} I & 0 \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{bmatrix} & B_s &= \begin{bmatrix} 0 \\ I \end{bmatrix} \\ C_s &= \begin{bmatrix} I & 0 \\ 0 & I \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{bmatrix} & D_s &= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ I \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (5-6)$$

در این معادلات، ورودی فضای حالت به صورت زیر می‌باشد:

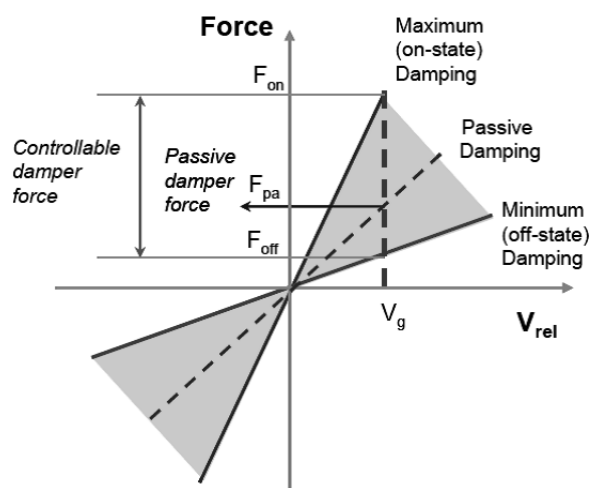
$$u = -\{\Lambda\} \ddot{x}_g + M^{-1} \Gamma (c_d \dot{x}_d + k_d x_d + f) \quad (6-6)$$



شکل ۶-۲ سازه ساختمانی همراه با SATMD

۶-۳- مدل میراگر نیمه‌فعال

شکل ۶-۳ نشان می‌دهد که چگونه یک میراگر قابل کنترل می‌تواند بازه‌ای از نیروی میرایی را تأمین نماید. در یک سرعت داده شده، V_g ، نیروی میراگر مشابه برای میراگر غیرفعال یک نیروی ثابت، F_{pa} ، است. از سوی دیگر، میراگر قابل کنترل یک محدوده نیروی میرایی از F_{off} تا F_{on} را به دست می‌دهد، که به ترتیب مربوط به ولتاژ صفر و اشباع می‌باشند [۳۶].



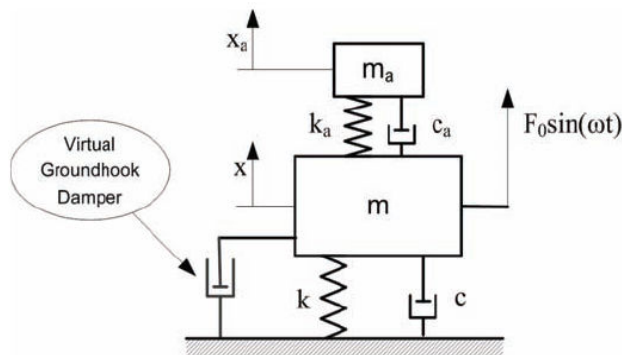
شکل ۳-۶ منحنی نیرو-سرعت میراگر نیمه‌فعال MR [۳۶]

۴-۶- کنترل میراگرهای جرمی تنظیم شده نیمه‌فعال

یکی از سیستم‌های کنترل ساده ولی مؤثر برای میراگرهای جرمی تنظیم شده نیمه‌فعال، کنترل اتصال‌زمین^۱ نامیده می‌شود. روش اتصال‌زمین به خصوص در سیستم‌های تعلیق خودرو استفاده شده است [۵۰]، اما اثبات شده که در اجرای میراگرهای جرمی تنظیم شده نیمه‌فعال نیز قابل اجرا هستند [۵۱-۵۳]. شکل ۴-۶ ایده اولیه سیستم اتصال‌زمین را نشان می‌دهد. یک میراگر مجازی بین سازه اصلی و پی ثابت اضافه می‌شود. میراگر سیستم اصلی را به پی ثابت (زمین) متصل می‌کند، از این‌رو نام این روش «اتصال‌زمین» است. نوع دیگر سیستم اتصال‌زمین، طرح اتصال‌آسمان^۲ است، که در آن میراگر مجازی متصل شده بین سازه اصلی و آسمان ثابت در نظر گرفته می‌شود. طرح اتصال‌آسمان به ویژه در زمینه سیستم‌های تعلیق خودرو مورد مطالعه قرار گرفته است [۵۴، ۵۵].

^۱ Groundhook control

^۲ Skyhook control



شکل ۴-۶ اصل میرائی اتصال زمین ایده‌آل

از نظر تئوری، با اضافه کردن یک میراگر مجازی، ارتعاش سیستم اصلی به شدت کاهش می‌یابد. در حقیقت، اگر نسبت میرائی میراگر مجازی بی‌نهایت بود، ارتعاش جرم اصلی کاملاً کاهش پیدا می‌کرد. اگر چه، این چنین میراگری به کلی مجازی است و قرار دادن یک میراگر بین سیستم اصلی و پی ثابت غیر عملی است. شکل ۵-۶ نشان می‌دهد چگونه یک سیستم اتصال زمین می‌تواند به کار برده شود. یک میراگر قابل تنظیم متصل بین جرم اصلی و تنظیم شده جایگزین میراگر غیرفعال اصلی شده است. در عمل، همواره یک میراگر غیرفعال موازی با میراگر قابل تنظیم وجود دارد. میراگرهای قابل تنظیم عملی همیشه بازه تنظیم محدودی دارند. خارج از این محدوده، همانند میراگرهای غیرفعال رفتار می‌کنند، به همین دلیل مدل کردن سیستم نیمه‌فعال به صورت دو میراگر موازی صحیح می‌باشد [۳۶].

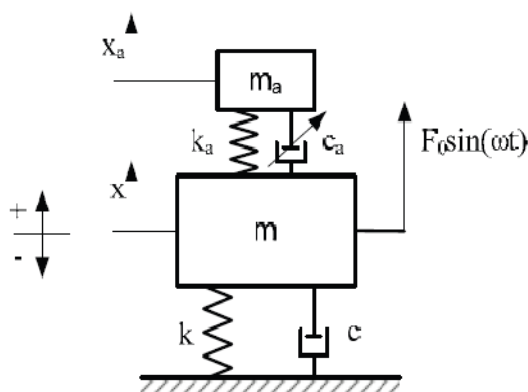
هدف از ایجاد یک کنترل‌کننده برای میراگر اتصال زمین نشان دادن نیروی میرائی اتصال زمین ایده‌آل با ترکیب نشان داده شده در شکل ۴-۶ می‌باشد. الگوریتم کنترل میراگر قابل تنظیم را طوری فرمان می‌دهد تا همانند میراگر اتصال زمین ایده‌آل عمل کند.

حالت‌هایی را که نیروها بر روی سیستم اصلی عمل می‌کند را در نظر می‌گیریم. سرعت میراگر

قابل تنظیم، v_{da} ، به صورت زیر تعیین می‌شود:

$$v_{da} = \dot{x} - \dot{x}_a \quad (7-6)$$

وقتی دو جرم از هم دور شوند، علامت v_{da} منفی است. با توجه به شکل ۵-۶ این امر واضح است.



شکل ۵-۶ اصل میرایی اتصال زمین عملی

یک میراگر اتصال زمین همواره طوری عمل می‌کند که نیروی تولید شده علامت عکس نسبت به سرعت جرم اصلی دارد. وقتی که این چنین رفتاری داشته باشد، چهار وضعیت مختلف پیدا می‌شود: (۱) جرم اصلی به سمت مثبت حرکت می‌کند و میراگر در کشش است، (۲) جرم اصلی به سمت مثبت حرکت می‌کند و میراگر در فشار است، (۳) جرم اصلی به سمت منفی حرکت می‌کند و میراگر در کشش است، (۴) جرم اصلی به سمت منفی حرکت می‌کند و میراگر در فشار است. نیروی تولید شده توسط میراگر قابل تنظیم، تنها در دو وضعیت ۲ و ۳ از نیروی میراگر مجازی پیروی می‌کند. علامت نیروی میراگر عکس نیروی میراگر مجازی در دو وضعیت دیگر است. مطلوب است که در این وضعیت‌ها میرایی در حد امکان پایین باشد. با خلاصه نمودن وضعیت‌ها، قوانین کنترل اتصال زمین بر پایه سرعت^۱ (VBG) به این ترتیب بدست می‌آیند:

$$\begin{aligned} v_{da} \dot{x} &\geq 0, & c_a &= c_{a \max} \\ v_{da} \dot{x} &< 0, & c_a &= 0 \end{aligned} \quad (۸-۶)$$

همچنین می‌توان عبارت سرعت سیستم اصلی را با یک عبارت جابجایی سیستم اصلی جایگزین نمود. استفاده از عبارت جابجایی به قوانین کنترل بر پایه جابجایی^۲ (DBG) بدست می‌آیند:

$$\begin{aligned} v_{da} x &\geq 0, & c_a &= c_{a \max} \\ v_{da} x &< 0, & c_a &= 0 \end{aligned} \quad (۹-۶)$$

^۱ Velocity-based groundhook (VBG)

^۲ Displacement-based groundhook (DBG)

همان‌طور که از معادلات (۸-۶) و (۹-۵) مشخص است، هر دو نوع کنترل اتصال‌زمین میراگر قابل تنظیم را بین حالت‌های میرائی زیاد و کم عوض می‌کند. به دلیل وجود عمل تعویض، بدیهی است که پهنای باند مورد نیاز برای میراگر قابل تنظیم بی‌نهایت می‌باشد. تغییر پله‌ای در نیروی میراگر در عمل ممکن نیست. هرچند، سیستم کنترل اتصال‌زمین همچنان قابل استفاده است، میراگرهای عملی کاملاً نیازهای رویه کنترل را تأمین نمی‌کنند.

از لحاظ نرم‌افزاری، اجرای کنترل اتصال‌زمین بسیار ساده می‌باشد. عملاً، تمام کنترل در یک کُد برنامه‌نویسی، یک عبارت «اگر-درغیراینصورت» است. به هر حال، زمان چرخه برنامه به صورت مشهودی از زمان چرخه ارتعاش حاکم کوچکتر است، در نتیجه از تأخیر^۱ در تعویض حالت میراگر جلوگیری می‌کند. همان‌طور که در معادله (۸-۶) مشاهده می‌شود، زمان تعویض که در الگوریتم کنترل VBG نیاز است، از لحاظ تئوری بی‌نهایت کوچک است و وجود تأخیر در کنترل منجر به عملکرد ناقص می‌شود [۳۶].

۵-۶- طرح کنترل‌کننده فازی میراگر نیمه‌فعال

با توجه به مدل‌های مکانیکی میراگرهای نیمه‌فعال MR، رفتار آنها کاملاً غیرخطی بوده و در نتیجه نمی‌توان به سادگی نیروی مورد انتظار از میراگر را تولید کرد. مسأله‌ای که در اینجا وجود دارد این است که نمی‌توان مستقیماً نیروی میراگر MR را تغییر داد و تنها می‌توان ولتاژ ورودی به میراگر را تعدیل نمود. به دلیل اینکه رابطه میان ولتاژ میراگر و نیروی تولید شده توسط آن غیرخطی می‌باشد، قانون مستقیمی برای تنظیم ولتاژ اعمالی وجود ندارد.

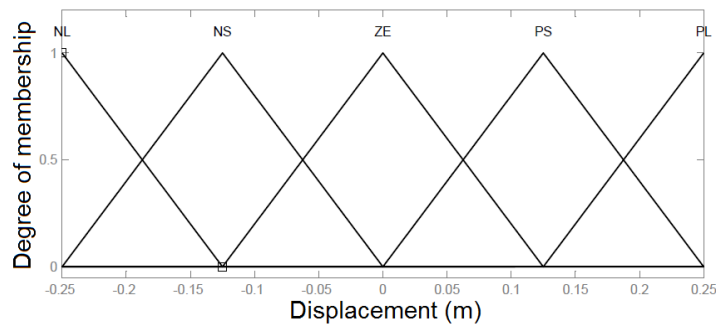
استدلال فازی می‌تواند با استفاده از متغیرهای زبانی رابطه‌های غیرخطی موجود در سیستم را به صورت مناسبی تقریب بزند. در این مطالعه پایگاه قانون فازی را برای کنترل ولتاژ ورودی به میراگر MR به کار رفته در میراگر جرمی تنظیم شده ایجاد کرده‌ایم. این دو پایگاه قانون فازی بر اساس

¹ delay

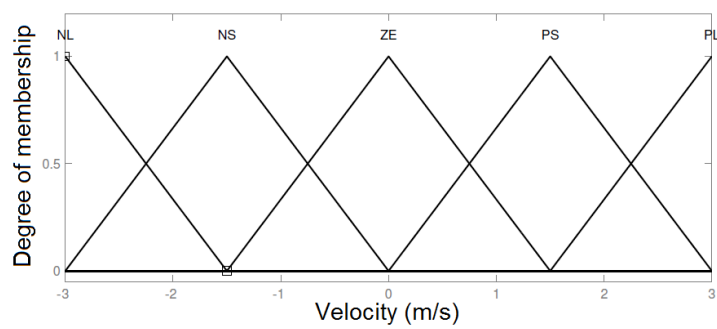
کنترل اتصال زمین که شرح داده شد، به دست آمده است. این کنترل کننده فازی دارای دو ورودی و یک خروجی می باشد.

کنترل کننده فازی به کار گرفته شده در این مطالعه دارای دو ورودی و یک خروجی می باشد. ورودی های این کنترل کننده جابجایی سازه و سرعت میراگر جرمی می باشند و خروجی آن ولتاژ اعمالی به میراگر نیمه فعال MR می باشد. توابع عضویت ورودی ها و خروجی در شکل ۶-۶ نشان داده شده است. تابع عضویت متغیرها مثلی انتخاب شده است. معنی متغیرهای فازی توابع عضویت ورودی به این قرار: $PS = \text{Positive Small}$, $ZE = \text{Zero}$, $NS = \text{Negative Small}$, $NL = \text{Negative Large}$ و $PL = \text{Positive Large}$ و همچنین معنی متغیرهای فازی توابع عضویت خروجی به این قرار است: $L = \text{Large}$ و $M = \text{Medium}$, $S = \text{Small}$, $ZE = \text{Zero}$.

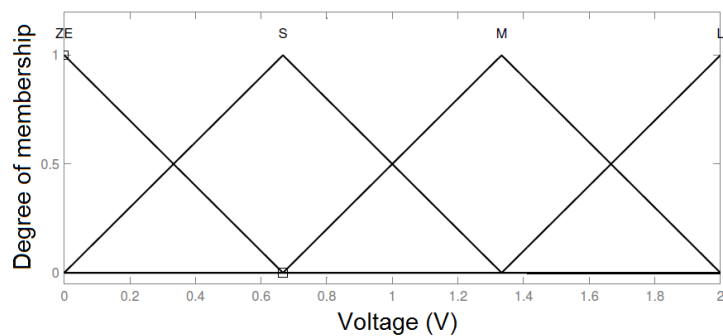
قانون استنتاج فازی بر اساس جابجایی سازه و سرعت میراگر جرمی می باشد. این استنتاج فازی بر پایه کنترل کننده اتصال زمین بر پایه سرعت تنظیم شده است. قانون استنتاج فازی را در جدول ۶-۱ مشاهده می کنید. مزیت اصلی کنترل کننده فازی اتصال زمین برای کنترل ولتاژ ورودی میراگر MR این است که برخلاف کنترل اتصال زمین کلاسیک که مقدار ولتاژ را تنها صفر یا ولتاژ اشباع انتخاب می کرد، می تواند ولتاژ را به هر مقدار مورد نیاز واقع در محدوده ولتاژ میراگر تعویض کند.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۶-۶ توابع عضویت متغیرهای کنترل کننده فازی: (الف) ورودی جابجایی سازه، (ب) ورودی سرعت میراگر، (ج) ولتاژ

جدول ۶-۱ قوانین استنتاج کنترل کننده فازی

Velocity	Displacement				
	NL	NS	ZE	PS	PL
NL	ZE	ZE	S	M	L
NS	ZE	ZE	S	M	L
ZE	M	S	ZE	S	M
PS	L	M	S	ZE	ZE
PL	L	M	S	ZE	ZE

۶-۶- معیارهای کارائی

در این مطالعه سیستم سازه‌ای تحت تحریک زمین‌لرزه توسط دو کنترل‌کننده میراگر جرمی تنظیم شده غیرفعال و نیمه‌فعال، کنترل می‌گردد. برای ارزیابی کارائی سیستم کنترل، شاخص‌هایی که در ادامه توضیح می‌دهیم مورد توجه قرار می‌دهیم. این شاخص‌ها بی‌بعد می‌باشند. معیارهای اول و دوم به توانایی کنترل‌کننده در کاهش ماکزیمم شتاب RMS طبقات وابسته می‌باشند:

$$J_1 = \max(\sigma_{\ddot{x}_i}) / \sigma_{\ddot{x}_{roof\ o}} \quad (۱۰-۶)$$

$\sigma_{\ddot{x}_i}$ شتاب RMS طبقه i ام و $\sigma_{\ddot{x}_{roof\ o}}$ شتاب بالاترین طبقه بدون کنترل است.

$$J_2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\sigma_{\ddot{x}_i} / \sigma_{\ddot{x}_{io}}) \quad (۱۱-۶)$$

$\sigma_{\ddot{x}_{io}}$ شتاب RMS طبقه i ام بدون کنترل است. معیار ارزیابی سوم و چهارم به توانایی کنترل‌کننده در کاهش جابجایی RMS بالاترین طبقه بستگی دارد:

$$J_3 = \sigma_{x_{roof}} / \sigma_{x_{roof\ o}} \quad (۱۲-۶)$$

$$J_4 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\sigma_{x_i} / \sigma_{x_{io}}) \quad (۱۳-۶)$$

σ_{x_i} و $\sigma_{x_{io}}$ جابجایی RMS طبقه i ام به ترتیب با کنترل و بدون کنترل و $\sigma_{x_{roof\ o}}$ جابجایی RMS بالاترین طبقه بدون کنترل است. معیار پنجم به عملکرد کنترل‌کننده بستگی دارد:

$$J_5 = \sigma_{x_m} / \sigma_{x_{roof\ o}} \quad (۱۴-۶)$$

σ_{x_m} جابجایی RMS محرک است. معیارهای ارزیابی مربوط به پاسخ‌های اوج به این صورت می‌باشند:

$$J_6 = \max(\ddot{x}_{p_i}) / \ddot{x}_{p_{roof\ o}} \quad (۱۵-۶)$$

$$J_7 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\ddot{x}_{p_i} / \ddot{x}_{p_{io}}) \quad (۱۶-۶)$$

$$J_8 = x_{p_{roof}} / x_{p_{roof\ o}} \quad (۱۷-۶)$$

$$J_9 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_{p_i} / x_{p_{io}}) \quad (۱۸-۶)$$

$$J_{10} = x_{p_m} / x_{p_{rofo}} \quad (۱۹-۶)$$

x_{p_i} و $x_{p_{io}}$ جابجایی اوج طبقه Iام به ترتیب با کنترل و بدون کنترل، $\dot{x}_{p_i}$ و $\dot{x}_{p_{io}}$ شتاب اوج طبقه Iام به ترتیب با کنترل و بدون کنترل، $x_{p_{rofo}}$ و $\dot{x}_{p_{rofo}}$ به ترتیب جابجایی و شتاب بالاترین طبقه در سازه بدون کنترل و x_{p_m} جابجایی اوج کنترل کننده می باشد. از معیارهای کارائی که در این قسمت مشخص کردیم، بدیهی است کنترل کننده ای دارای کارائی بهتر می باشد که شاخص های کارائی آن از کوچکتر باشد.

۶-۷- مدل شبیه سازی

مدل های شبیه سازی که با رویه بدون کنترل و کنترل غیرفعال و نیمه فعال انتخاب شده ایجاد شده، برای مطالعه تأثیر تغییر پارامترها استفاده می گردند. مدل شبیه سازی با اتصال کنترل کننده و مدل های ریاضی که قبلاً توضیح داده شد، ایجاد شده است. شبیه سازی این مدل ها توسط نرم افزار Matlab با استفاده از بلوک دیاگرام در جعبه ابزار^۱ Simulink برای هر کدام از این مدل ها انجام شده است. در شکل ۶-۷ شبیه سازی سیستم کنترل نیمه فعال نشان داده شده است. برای در نظر گرفتن اثر نویز حسگرها از جعبه ابزار نویز گوسین^۲ استفاده شده است. همچنین برای اعمال تأخیر در مدل شبیه سازی شده، جعبه ابزار تأخیر واحد^۳ اضافه شده است. نتایج این شبیه سازی با استفاده از حل کننده ode5 و نوع ثابت-گام^۴ با در نظر گرفتن هر گام زمانی برابر با $\Delta t = 0.001$ به دست آمده اند.

^۱ toolbox

^۲ Gaussian noise

^۳ Unit delay

^۴ Fixed-step

فصل هفتم

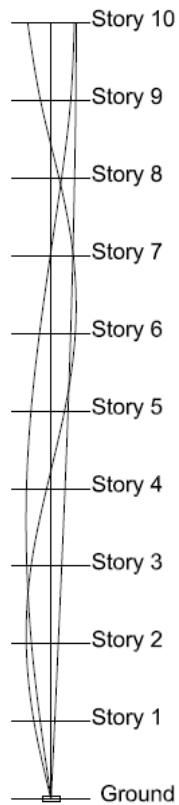
نتایج شبیه‌سازی و تحلیل سیستم‌های کنترل

۷-۱- مقدمه

یکی از مشکلات مهم طراحی در مهندسی عمران، میرائی پایین سازه‌ها می‌باشد. امروزه سیستم‌های کنترل‌کننده غیرفعال و فعال و نیمه‌فعال مختلفی برای افزایش کارائی سیستم‌های سازه‌ای استفاده می‌شوند. مدل‌های ریاضی نسبتاً دقیقی که نشان‌دهنده رفتار این سیستم‌های کنترل‌کننده می‌باشند، ایجاد شده‌اند. در مطالعات گسترده‌ای، سیستم‌های سازه‌ای کنترل‌شده توسط سیستم‌های کنترلی مختلف، تحت تحریک زمین‌لرزه بررسی و رفتار آنها پیش‌بینی شده، و نتایج این بررسی‌ها جهت بهبود عملکرد سازه‌ها استفاده شده است. در این مطالعه رفتار سازه ساختمانی (قاب ده طبقه) همراه با میراگر جرمی تنظیم شده نیمه‌فعال با استفاده از کنترل‌کننده فازی تحت تحریک چهار زمین‌لرزه El Centro، Hachinohe، Northridge و طیس بررسی شده است. مدل‌های ریاضی سازه و سیستم‌های کنترل‌کننده در محیط Simulink شبیه‌سازی شده و پاسخ سازه کنترل‌شده تحت چهار زمین‌لرزه گفته شده، محاسبه گردیده است. پاسخ‌های سازه در حالت کنترل‌نشده و همراه با سیستم‌های کنترل میراگرهای جرمی تنظیم شده غیرفعال و نیمه‌فعال آورده می‌شود. معیارهای کارائی سیستم کنترل‌کننده نیز محاسبه شده و برای مقایسه سیستم‌های کنترل‌کننده مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

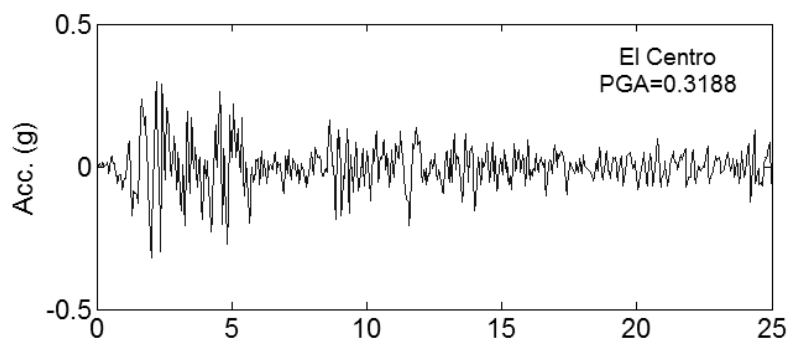
۷-۲- سیستم سازه‌ای

در این پژوهش سیستم سازه‌ای یک قاب ده طبقه [۵۵] برای بررسی اثر میراگرهای جرمی تنظیم شده غیرفعال و نیمه‌فعال کنترل‌شده توسط کنترل‌کننده فازی استفاده شده است. مشخصات این قاب (ماتریس‌های جرم و سختی) در پیوست ۱ آورده شده است. ماتریس میرائی سیستم سازه‌ای با فرض میرائی مودال برابر با ۳٪ محاسبه شده است. سه مُد اول این سازه در شکل ۷-۱ نشان داده شده است. فرکانس‌های طبیعی قاب در سه مُد اول به ترتیب ۷/۱۳، ۲۱/۰۶ و ۳۴/۳۹ رادیان بر ثانیه می‌باشد.

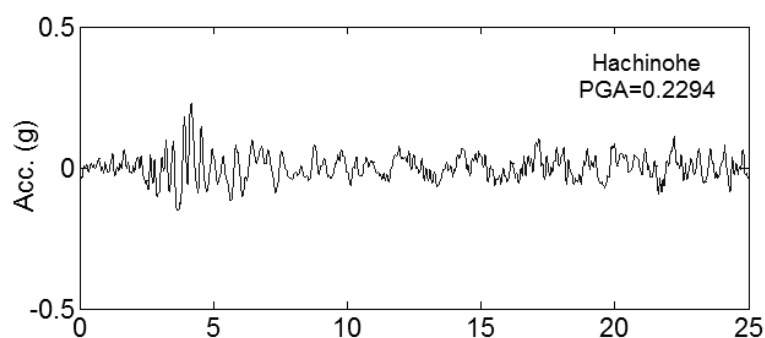


شکل ۷-۱ سه مُد اول قاب ده طبقه

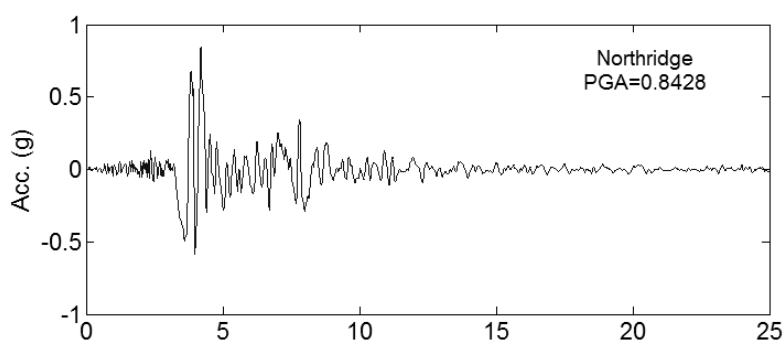
برای بررسی رفتار سازه در حالت‌های بدون کنترل و کنترل‌شده تحت تحریک زمین‌لرزه، از چهار شتاب‌نگاشت El Centro، Hachinohe، Northridge و طیس که دو شتاب‌نگاشت اول حوزه-دور و دو شتاب‌نگاشت بعدی حوزه-نزدیک می‌باشند، مطابق شکل ۷-۲ استفاده شده است. زلزله‌های حوزه-نزدیک دارای خصوصیتی هستند که آنها را از زلزله حوزه-دور متمایز می‌سازد. از خصوصیات شاخص زمین‌لرزه‌های حوزه-نزدیک، وجود سرعت‌های نموی بزرگ زمین است که در پی پالس‌های بلند مدت شتاب ایجاد می‌شود. نمودی از این اثرات به شکل ایجاد تغییرمکان‌های نوسانی بزرگ است که در رکورد تغییرمکان زمین نیز دیده می‌شود [۵۶].



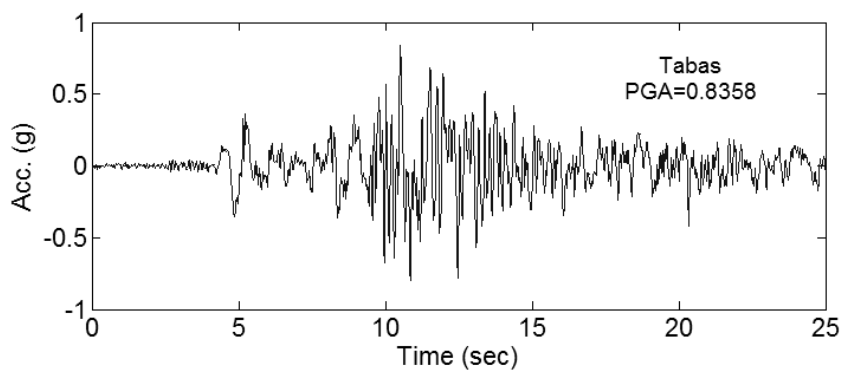
الف) مؤلفه شمال- جنوب ثبت شده در El Centro در طی زلزله کالیفرنیا، ۱۸ می ۱۹۴۰



ب) مؤلفه شمال- جنوب ثبت شده در Hachinohe در طی زلزله Tokachi-oki، ۱۶ می ۱۹۶۸



ج) مؤلفه شمال- جنوب ثبت شده در بیمارستان Sylmar در طی زلزله Northridge در کالیفرنیا، ۱۷ ژانویه ۱۹۹۴

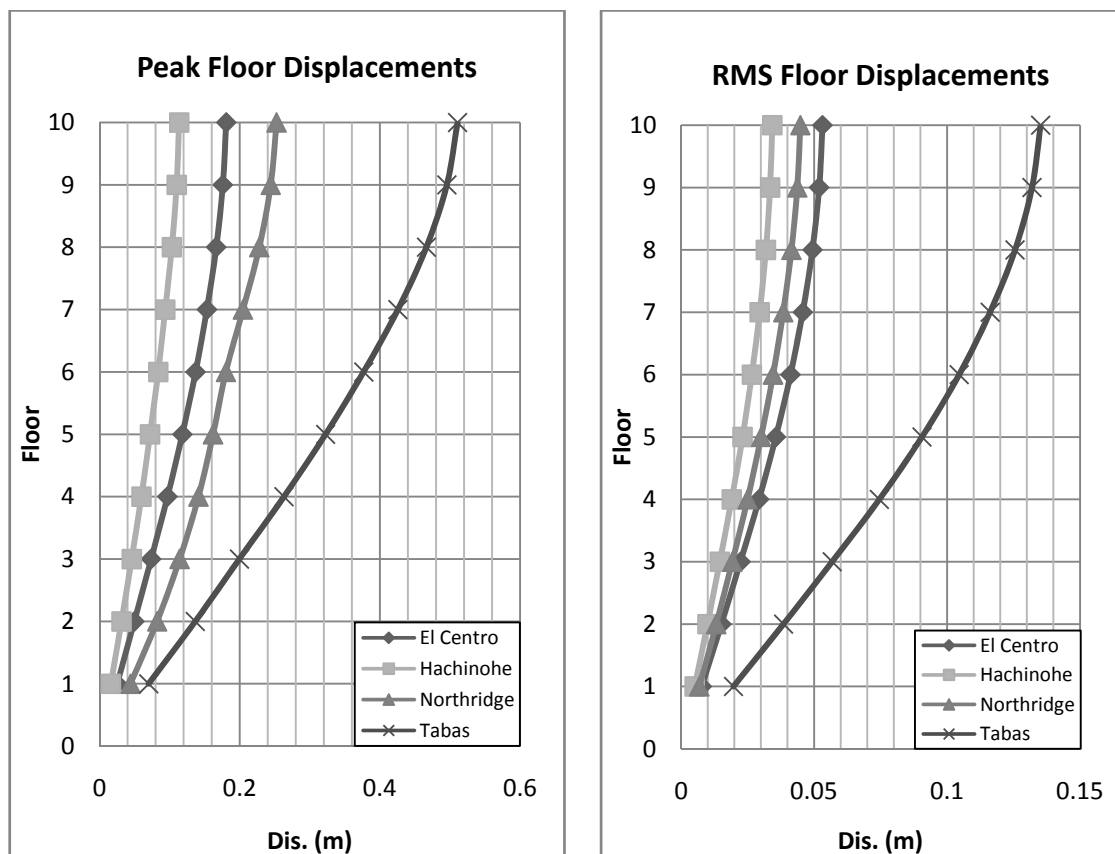


د) رکورد ثبت شده در ایستگاه طبس در طی زلزله طبس، ۱۶ سپتامبر ۱۹۷۸

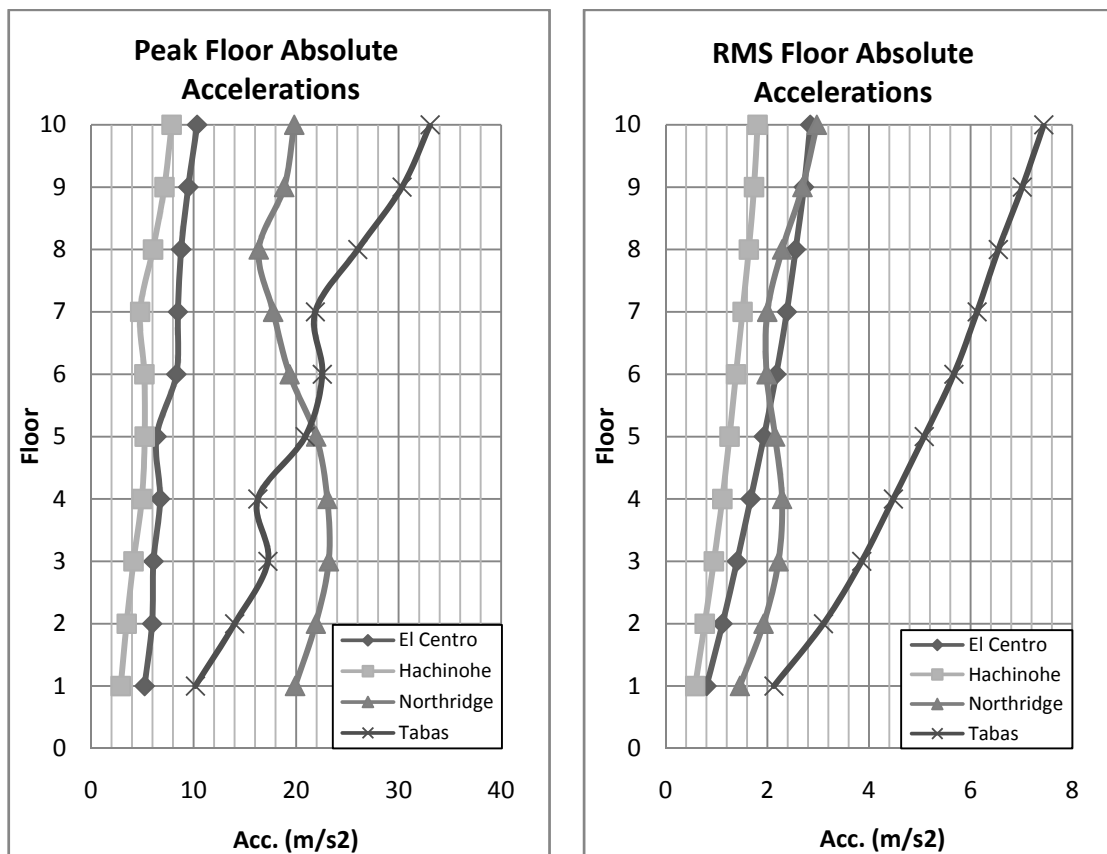
شکل ۷-۲ شتاب‌نگاشت‌های مورد استفاده در این مطالعه

۳-۷- پاسخ سازه کنترل نشده

برای بررسی تأثیر میراگر جرمی تنظیم شده غیرفعال و نیمه فعال بر روی پاسخهای سازه، ابتدا لازم است پاسخهای سازه کنترل نشده را محاسبه نمود. سازه کنترل نشده شبیه سازی شده را تحت چهار زمین لرزه گفته شده، قرار می دهیم. پاسخهای جابجایی و شتاب مطلق اوج و RMS طبقات را در شکل ۳-۷ و شکل ۴-۷ آورده شده است. بررسی شتاب سازه در تحریکات باد و زمین لرزه به عنوان یک نیاز جانبی مطرح می باشد، به دلیل اینکه تأثیر عمده شتاب بر اجزای غیر سازه ای می باشد.



شکل ۳-۷ مقدار جابجایی اوج و RMS طبقات در سازه کنترل نشده



شکل ۴-۷ مقدار شتاب مطلق اوج و RMS طبقات در سازه کنترل نشده

بیشترین پاسخ‌های اوج و RMS سازه، در شتاب‌نگاشت‌های حوزه-دور مربوط به شتاب‌نگاشت El Centro می‌باشند. پاسخ سازه در شتاب‌نگاشت Northridge در هنگامی که این شتاب‌نگاشت به بیشترین دامنه خود می‌رسد، دارای مقدار بزرگی است. مخصوصاً شتاب مطلق طبقات به شدت افزایش پیدا می‌کند. در حالیکه، پاسخ RMS سازه در این زمین‌لرزه نسبتاً پایین است. پاسخ سازه در شتاب‌نگاشت طبس، هم مقدار اوج و هم مقدار RMS بالایی دارد. شتاب اوج طبقات پایین در این زمین‌لرزه نسبت به زمین‌لرزه Northridge کوچکتر است، ولی در طبقات بالاتر برعکس می‌باشد.

۴-۷- تأثیر پارامترهای میراگر جرمی تنظیم شده بر پاسخ سازه

در این قسمت، تأثیر پارامترهای مختلف دو میراگر جرمی تنظیم شده غیرفعال و نیمه‌فعال بر پاسخ سازه بررسی و درصد کاهش پاسخ جابجایی سازه در چهار زمین‌لرزه گفته شده، محاسبه

می‌شود. نسبت میرائی میراگر جرمی ξ_d به ترتیب برابر ۰/۰، ۰/۵ و ۱۰/۰ و نسبت‌های فرکانس میراگر جرمی f برابر با ۰/۸، ۰/۹، ۱/۰، ۱/۱ و ۱/۲ و نسبت جرمی میراگر $\bar{m}$ برابر با ۰/۲، ۰/۵، ۱۰/۰ و ۱۵/۰ نسبت به جرم مُدال مُد اول در نظر گرفته شده است.

۷-۴-۱- میراگر جرمی تنظیم شده غیرفعال

در این قسمت، پارامترهای میراگر جرمی تنظیم شده غیرفعال بر پاسخ سازه بررسی می‌شود. نتایج به صورت درصد کاهش پاسخ اوج و RMS جابجایی طبقه بام سازه، در پارامترهای مختلف میراگر جرمی تنظیم شده غیرفعال، در شکل ۷-۵ تا شکل ۷-۱۲ نشان داده شده است.

با بررسی پاسخ‌های سازه در چهار زمین‌لرزه می‌توان نتایج زیر را گرفت:

- در زمین‌لرزه El Centro بیشترین درصد کاهش جابجایی سازه در نسبت جرمی ۱۰/۰

و نسبت میرائی ۱۵/۰ و نسبت فرکانسی ۰/۹ مشاهده می‌شود. میراگر جرمی با نسبت‌های جرمی ۰/۲ و ۰/۵، در نسبت میرائی ۵/۰ بهترین عملکرد را دارد، و با نسبت‌های جرمی ۱۰/۰ و ۱۵/۰ با افزایش نسبت میرائی درصد کاهش پاسخ نیز افزایش می‌یابد، اما نرخ این افزایش به تدریج کاهش یافته است. بیشترین درصد کاهش پاسخ اوج در نسبت میرائی ۰/۰، با نسبت جرمی ۵/۰ و نسبت فرکانسی ۱/۰ مشاهده می‌شود. در نسبت‌های میرائی ۵/۰ و ۱۰/۰، با افزایش نسبت جرمی از ۰/۲ تا ۱۰/۰ کارائی میراگر در کاهش پاسخ سازه نیز افزایش می‌یابد، اما در نسبت جرمی ۱۵/۰ کارائی میراگر کاهش پیدا کرده است. در نسبت‌های جرمی بالا، با افزایش نسبت میرائی، تغییر نسبت فرکانسی تأثیر کمتری بر کارائی آن در کاهش پاسخ‌های RMS سازه دارد.

- در زمین‌لرزه Hachinohe بیشترین درصد کاهش اوج در نسبت جرمی ۱۵/۰ و نسبت

فرکانسی ۰/۸ با نسبت میرائی ۱۵/۰ و برای پاسخ RMS با نسبت میرائی ۱۰/۰ رخ می‌دهد. با افزایش نسبت میرائی، کارائی میراگر در کاهش پاسخ‌های اوج افزایش

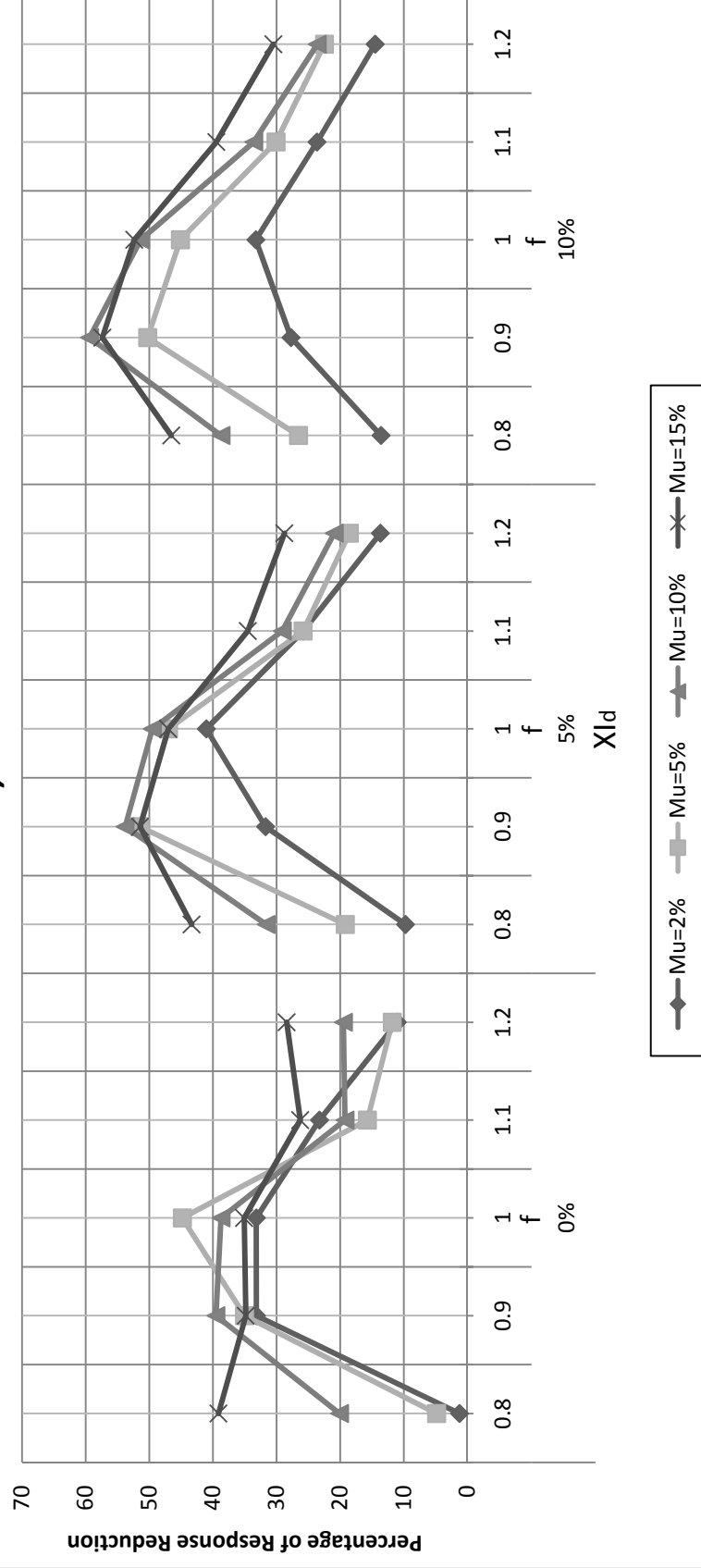
می‌یابد، که این افزایش در میراگر جرمی با نسبت‌های جرمی ۲٪ و ۵٪ چندان محسوس نمی‌باشد، و در میراگرهای جرمی با نسبت جرمی ۱۰٪ و ۱۵٪، در نسبت‌های فرکانسی که کارائی میراگر جرمی کاهش پیدا کرده است، موجب بهبود عملکرد میراگر جرمی شده است. با افزایش در نسبت جرمی کارائی میراگر در کاهش پاسخ سازه به نسبت فرکانسی حساس‌تر می‌شود، طوری که باعث افزایش پاسخ‌های اوج و RMS سازه نیز می‌شود.

- در زمین‌لرزه Northridge بیشترین کاهش پاسخ اوج در نسبت جرمی ۱۵٪ و نسبت میرائی ۱۰٪ و با نسبت فرکانسی ۰/۹ و برای پاسخ RMS در نسبت جرمی ۵٪ و نسبت میرائی ۱۵٪ با نسبت فرکانسی ۰/۸ مشاهده می‌شود. افزایش نسبت میرائی در کارائی میراگر جرمی تنظیم شده غیرفعال در کاهش پاسخ اوج تأثیر چندانی ندارد، اما کارائی آن را در کاهش پاسخ RMS افزایش می‌دهد. کارائی میراگر جرمی در کاهش پاسخ اوج با افزایش نسبت جرمی افزایش می‌یابد، اما در کاهش پاسخ RMS بر عکس است. البته در نسبت جرمی ۱۵٪ با افزایش نسبت فرکانسی کارائی میراگر جرمی در کاهش پاسخ‌های اوج به شدت کاهش می‌یابد. در نسبت میرائی ۰٪ تمام نسبت‌های جرمی باعث افزایش پاسخ RMS جابجایی سازه شده‌اند، و با افزایش نسبت میرائی عملکرد میراگر جرمی بهبود یافته و عملکرد آن در نسبت‌های جرمی مختلف به یکدیگر نزدیک شده است.

- در زمین‌لرزه طبرس بیشترین کاهش پاسخ سازه در نسبت جرمی ۱۵٪ و نسبت میرائی ۱۰٪ و نسبت فرکانسی ۱/۰ رخ می‌دهد. افزایش نسبت میرائی باعث افزایش کارائی میراگر جرمی تنظیم شده غیرفعال شده است. البته در نسبت جرمی ۲٪ ماکزیمم کارائی میراگر جرمی تنظیم شده در نسبت میرائی ۵٪ مشاهده می‌شود. در نسبت‌های

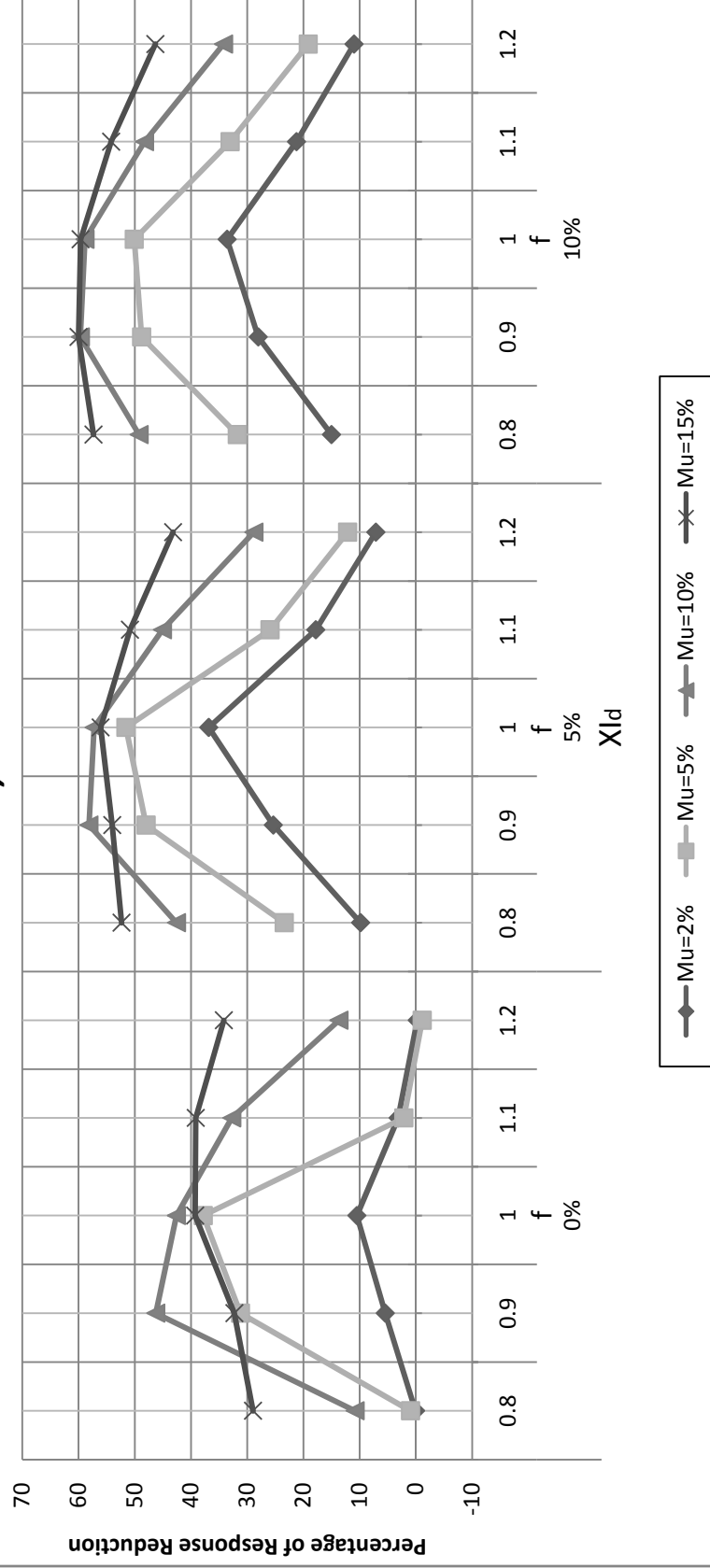
میرائی پایین افزایش نسبت جرمی، کارائی میراگر را نسبت به تغییر در نسبت فرکانسی حساس تر می‌کند. طوری که در نسبت میرائی ۰٪ و نسبت جرمی ۱۵٪ کارائی میراگر در کاهش پاسخ اوج بین ۱۰٪ تا ۶۰٪ و در کاهش پاسخ RMS بین ۵٪- تا ۵۰٪ می‌باشد و کارائی میراگر جرمی در این نسبت جرمی و در نسبت‌های فرکانسی پایین، در مقایسه با نسبت‌های جرمی پایین‌تر از ۱۵٪، کاهش پیدا کرده است.

Percentage of Peak Top Floor Displacement Reduction El Centro, with TMD



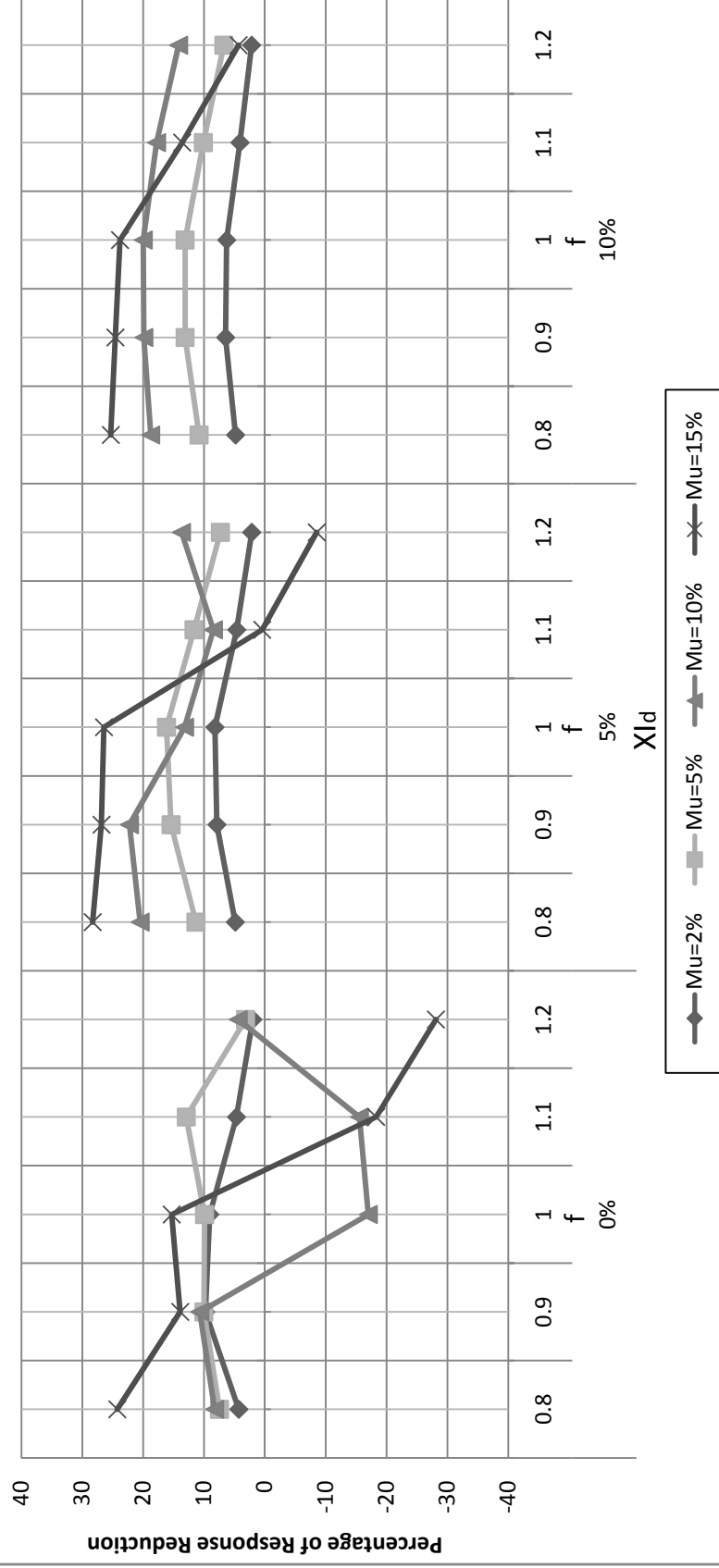
شکل ۵-۷ درصد کاهش پاسخ اوج جابجایی طبقه بام در سازه کنترل شده توسط TMD در زمین لرزه El Centro

Percentage of RMS Top Floor Displacement Reduction El Centro, with TMD



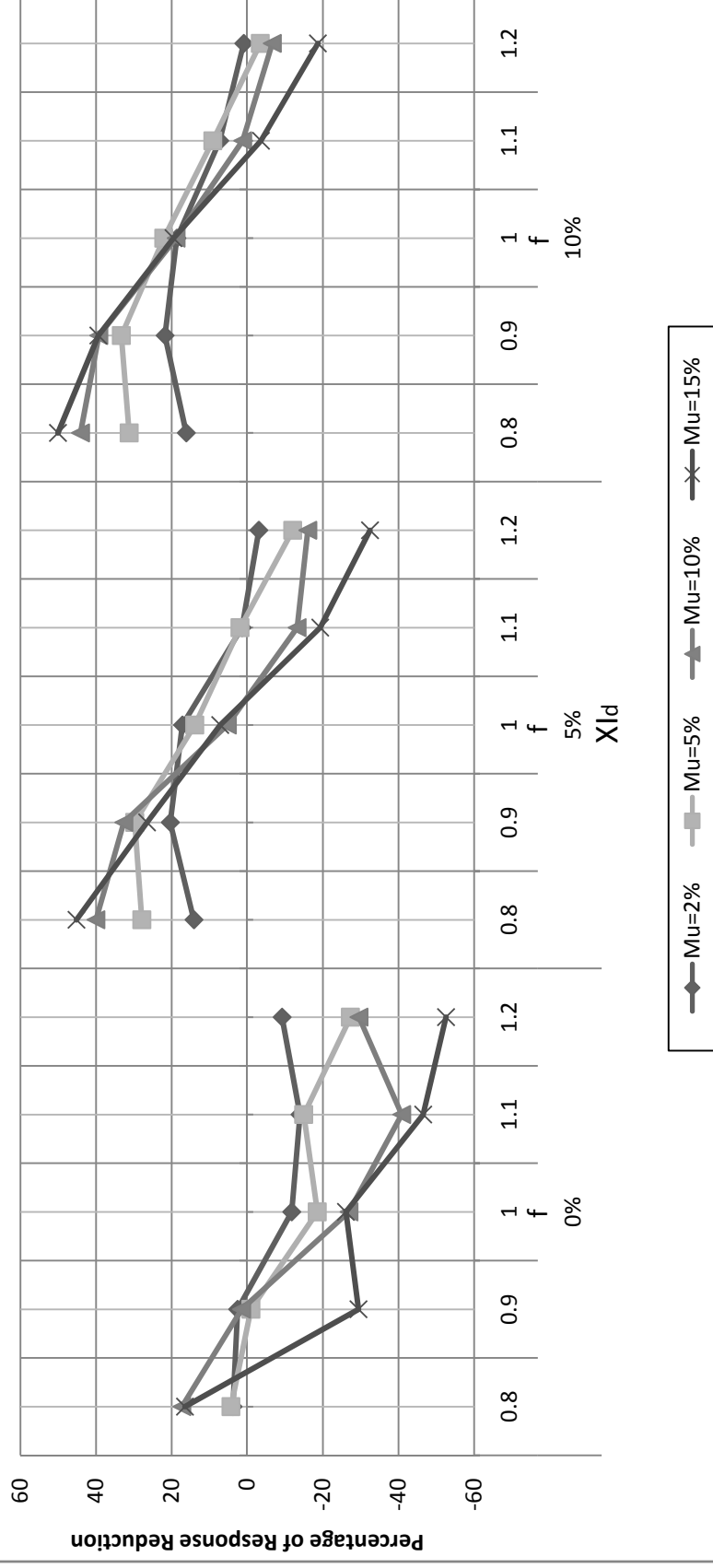
شکل ۶-۷ درصد کاهش پاسخ RMS جابجایی طبقه بام در سازه کنترل شده توسط TMD در زمین لرزه El Centro

Percentage of Peak Top Floor Displacement Reduction Hachinohe, with TMD



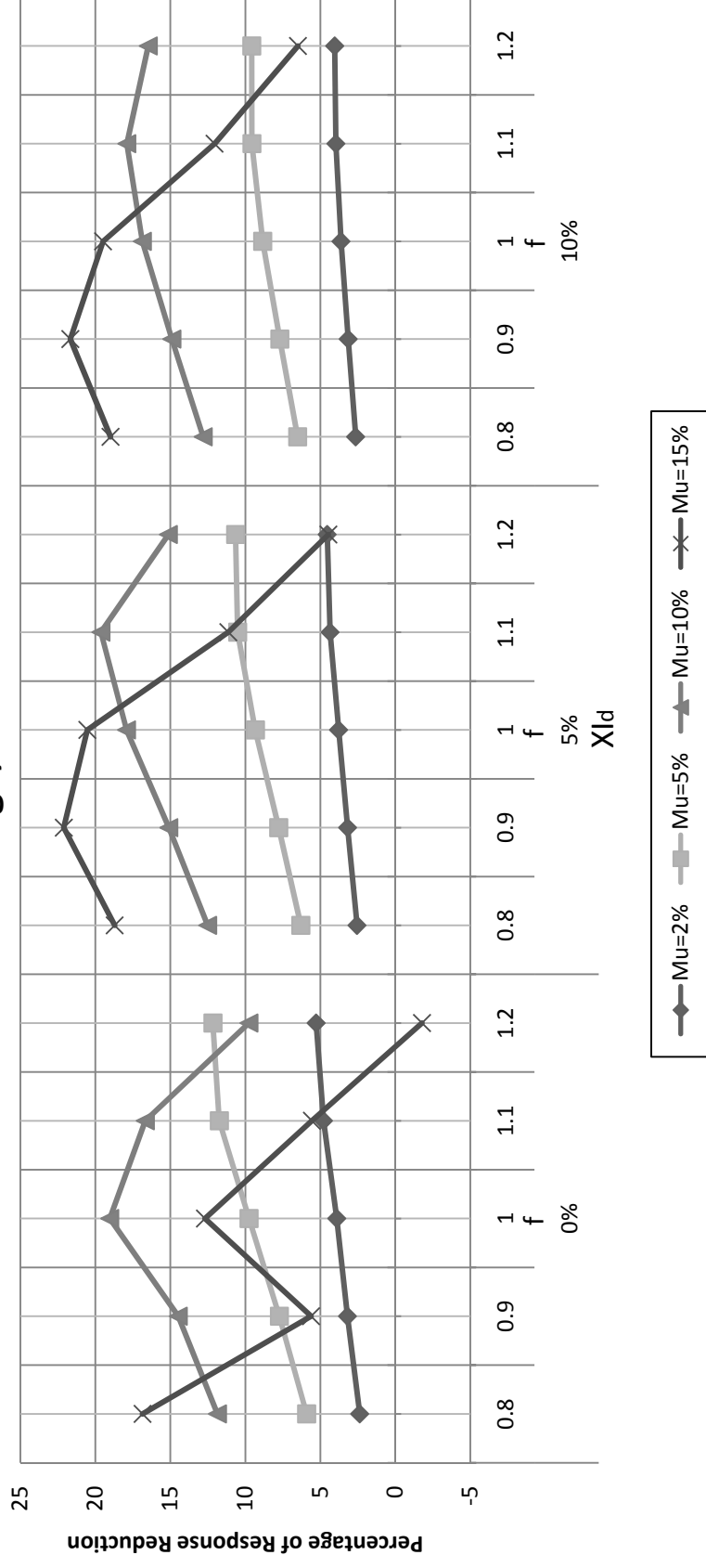
شکل ۷-۷ درصد کاهش پاسخ اوج جابجایی طبقه بام در سازه کنترل شده توسط TMD در زمین لرزه Hachinohe

Percentage of RMS Top Floor Displacement Reduction Hachinohe, with TMD



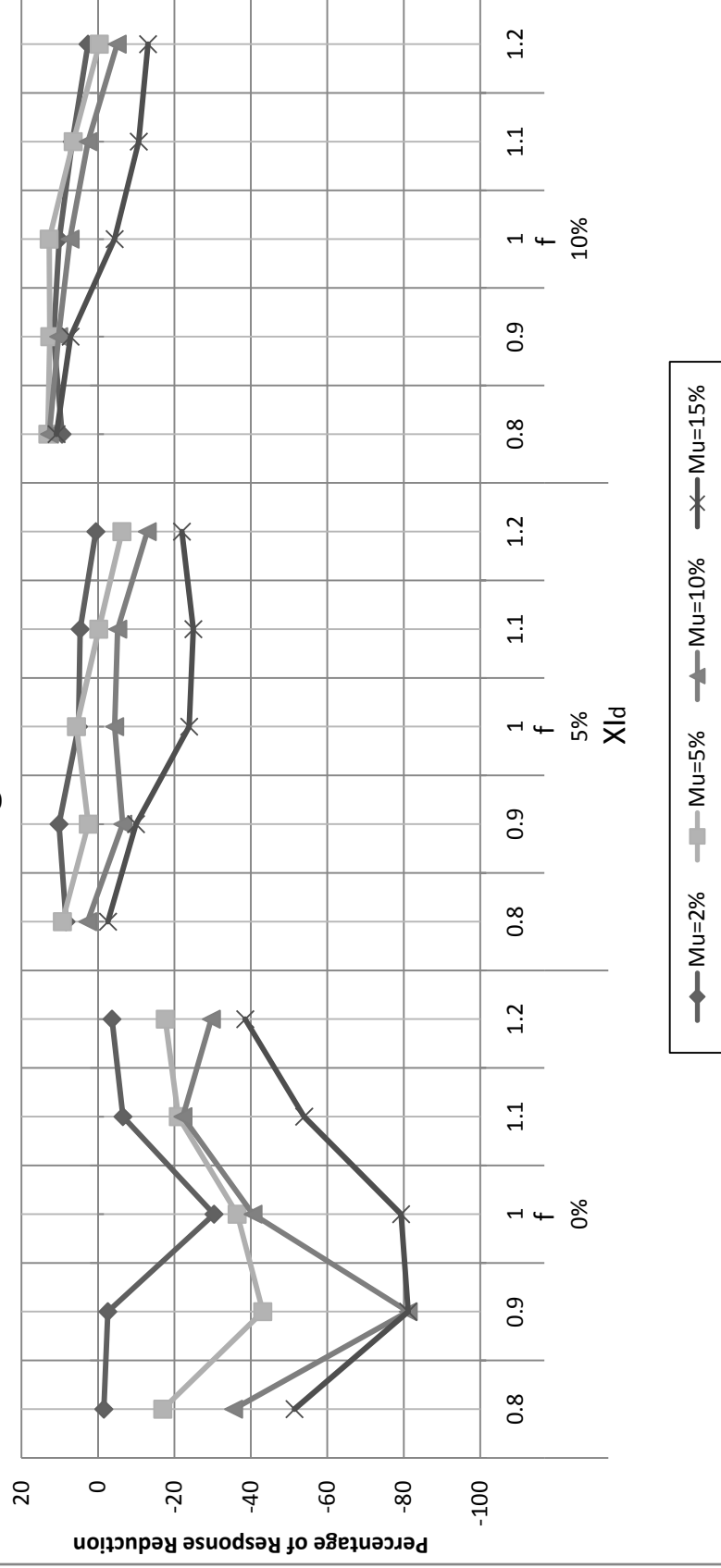
شکل ۸-۷ درصد کاهش پاسخ جابجایی RMS جابجایی طبقه بام در سازه کنترل شده توسط TMD در زمین لرزه Hachinohe

Percentage of Peak Top Floor Displacement Reduction Northridge, with TMD



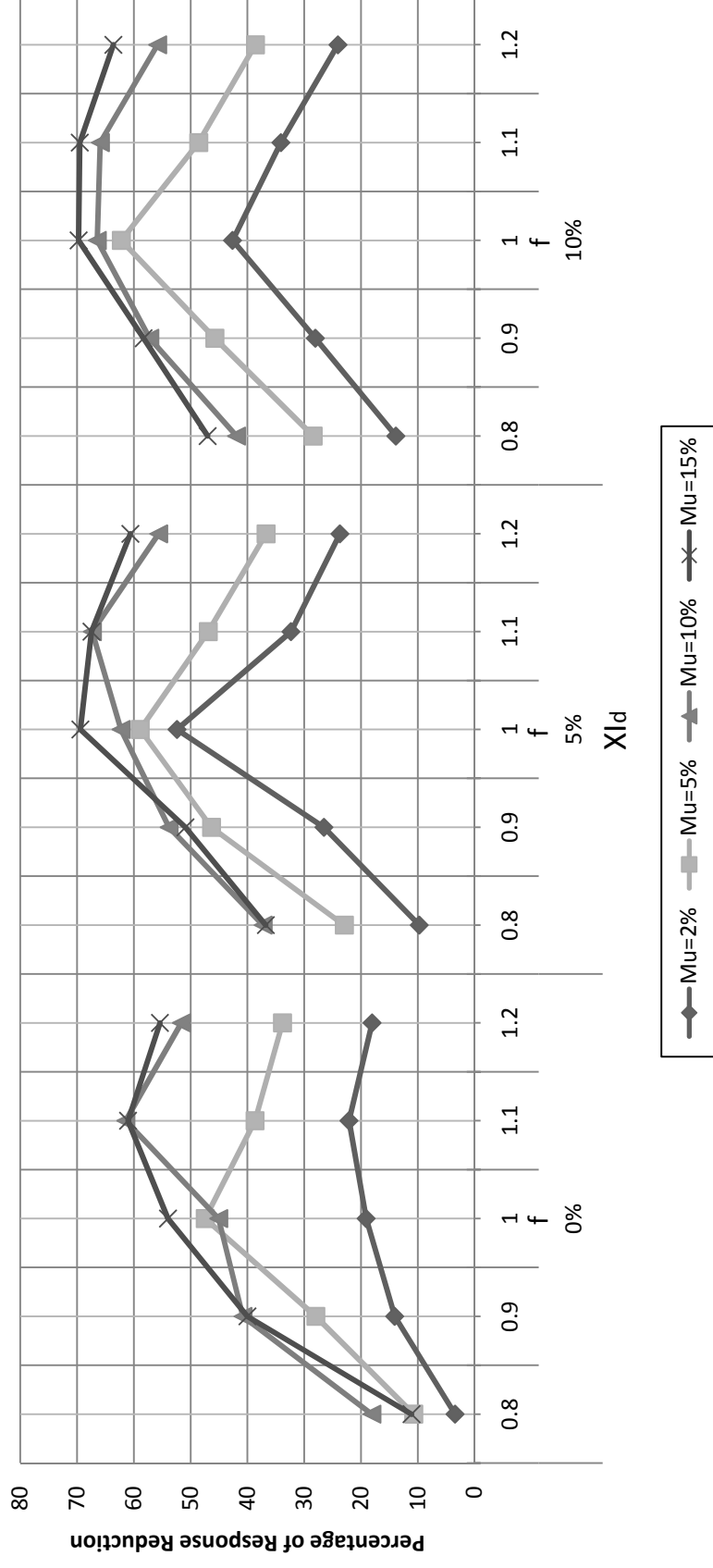
شکل ۹-۷ درصد کاهش پاسخ اوج جابجایی طبقه بام در سازه کنترل شده توسط TMD در زمین لرزه Northridge

Percentage of RMS Top Floor Displacement Reduction Northridge, with TMD



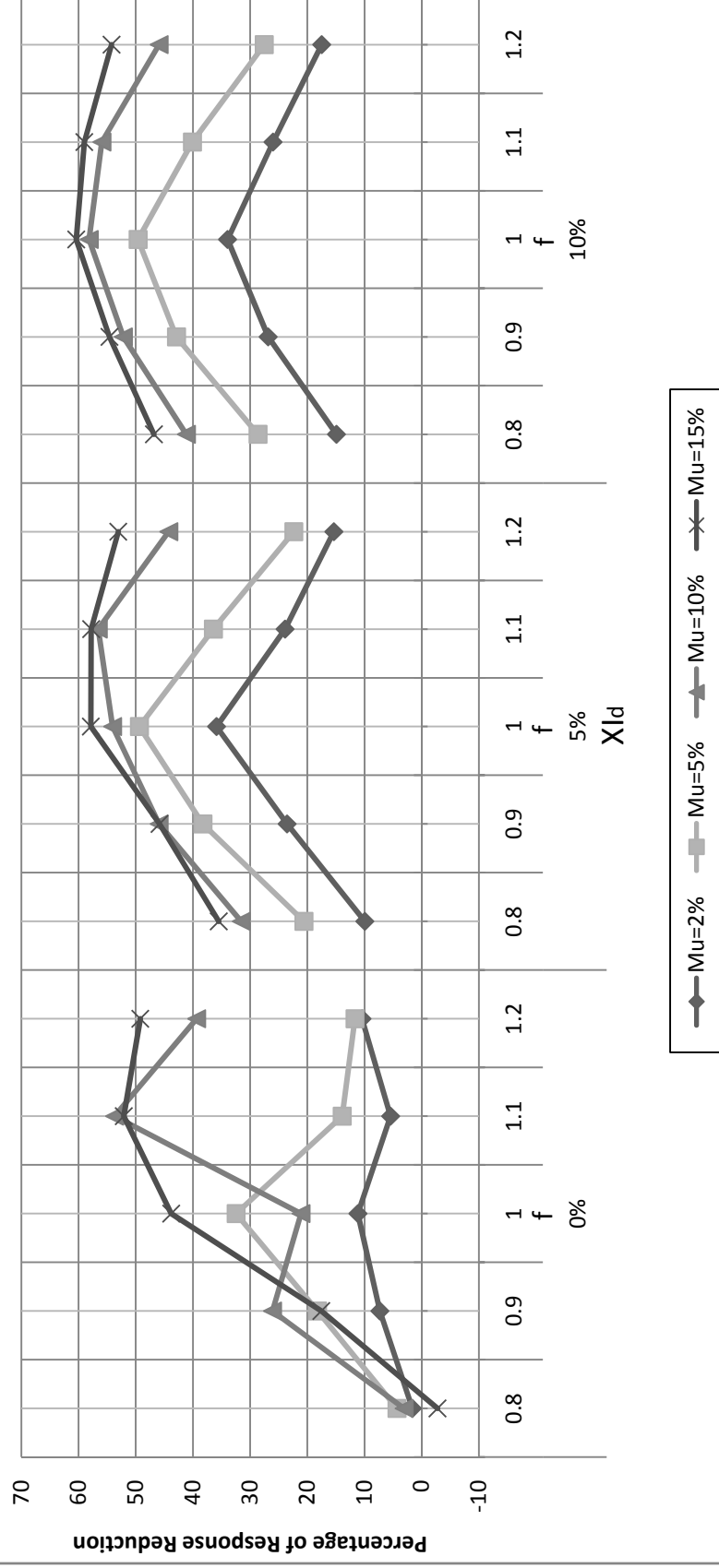
شکل ۱۰-۷ درصد کاهش پاسخ RMS جابجایی طبقه بام در سازه کنترل شده توسط TMD در زمین لرزه Northridge

**Percentage of Peak Top Floor Displacement Reduction
Tabas, with TMD**



شکل ۱۱-۷ درصد کاهش پاسخ اوج جابجایی طبقه بام در سازه کنترل شده توسط TMD در زمین لرزه طیس

**Percentage of RMS Top Floor Displacement Reduction
Tabas, with TMD**



شکل ۱۲-۷ درصد کاهش پاسخ RMS جانبایی طبقه بام در سازه کنترل شده توسط TMD در زمین لرزه طَبَس

۷-۴-۲- میراگر جرمی تنظیم شده نیمه فعال

در این قسمت پاسخ‌های سازه کنترل شده توسط میراگر جرمی تنظیم شده نیمه فعال بررسی می‌شود. نتایج بر حسب درصد کاهش پاسخ اوج و RMS جابجایی طبقه بام نسبت به حالت کنترل نشده در شکل ۷-۱۳ تا شکل ۷-۲۰ نشان داده شده‌اند. نتایج به دست آمده در چهار زمین لرزه به شرح زیر می‌باشند:

- در زمین لرزه El Centro بیشترین کاهش پاسخ سازه در نسبت جرمی ۱۰٪ و نسبت میرائی ۵٪ و نسبت فرکانسی ۰/۹ مشاهده می‌شود. افزایش نسبت میرائی تغییر محسوسی در کارائی میراگر جرمی به خصوص در نسبت‌های جرمی پایین نشان نمی‌دهد. کارائی میراگر جرمی تنظیم شده در نسبت‌های جرمی پایین با افزایش نسبت میرائی کاهش پیدا کرده است. افزایش نسبت جرمی باعث افزایش کارائی میراگر جرمی تنظیم شده در کاهش پاسخ‌های اوج می‌شود، اما به تدریج نرخ افزایش کارائی کاهش پیدا می‌کند، طوری که در نسبت فرکانسی ۰/۹ کارائی میراگر در نسبت جرمی ۱۵٪ تقریباً با کارائی آن در نسبت جرمی ۱۰٪ برابر است.
- در زمین لرزه Hachinohe بیشترین کاهش پاسخ اوج در نسبت میرائی ۰٪ و نسبت جرمی ۱۵٪ و نسبت فرکانسی ۰/۹ و بیشترین کاهش پاسخ RMS در نسبت میرائی ۵٪ و نسبت جرمی ۱۵٪ و نسبت میرائی ۰/۸ مشاهده می‌شود. افزایش نسبت میرائی کارائی میراگر در کاهش پاسخ اوج را تنها در نسبت جرمی ۱۵٪ و نسبت‌های فرکانسی بالا، افزایش می‌دهد و در سایر نسبت‌های جرمی تغییر محسوسی ایجاد نمی‌کند. در نسبت جرمی ۱۵٪ افزایش نسبت فرکانسی باعث کاهش شدیدی در کارائی میراگر در کاهش پاسخ‌های اوج سازه می‌شود، اما با افزایش نسبت میرائی این کاهش شدید کارائی مشاهده نمی‌شود. افزایش در نسبت جرمی و نسبت فرکانسی میراگر جرمی

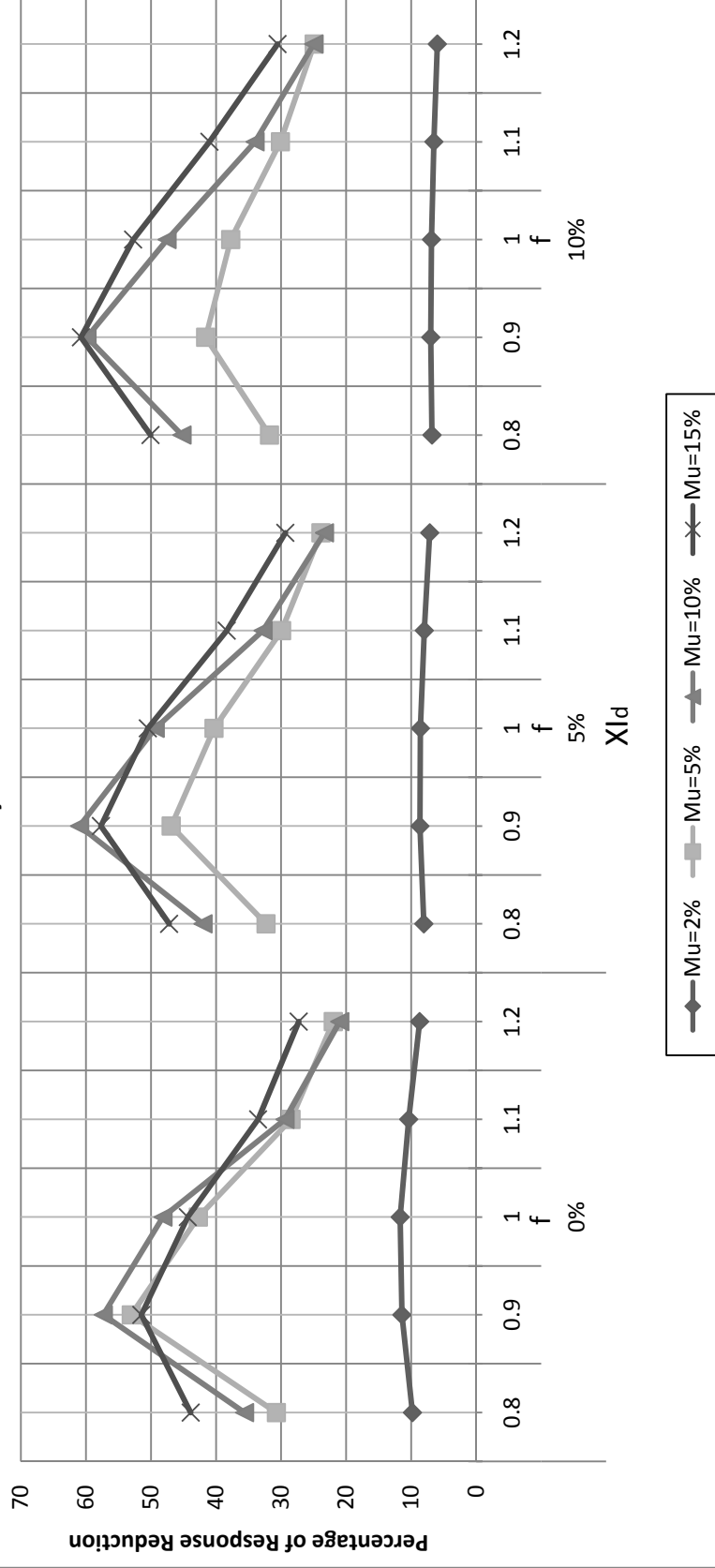
باعث کاهش عملکرد میراگر در کاهش پاسخ RMS سازه شده است. با افزایش نسبت میرائی نرخ این کاهش عملکرد کوچکتر شده است، طوری که در نسبت جرمی ۱۵٪ و نسبت فرکانسی ۱/۲، برای نسبت میرائی ۰٪ کارائی میراگر جرمی ۳۰٪ و برای نسبت میرائی ۱۵٪ تقریباً ۱۰٪ می‌باشد.

- در زمین‌لرزه Northridge بیشترین کاهش پاسخ اوج در نسبت میرائی ۰٪ و نسبت جرمی ۱۵٪ و نسبت فرکانسی ۰/۹ و بیشترین کاهش پاسخ RMS در نسبت میرائی ۱۰٪ و نسبت جرمی ۱۰٪ و نسبت فرکانسی ۰/۸ رخ می‌دهد. افزایش نسبت میرائی تأثیر محسوسی در کارائی میراگر در کاهش پاسخ‌های اوج، در نسبت‌های جرمی مختلف ندارد. در نسبت جرمی ۱۵٪ و در نسبت‌های فرکانسی بالاتر از ۰/۹، با افزایش نسبت فرکانسی کارائی میراگر در کاهش پاسخ اوج پایین می‌آید اما در سایر نسبت‌های جرمی، در نسبت‌های میرائی مختلف، تغییر در نسبت فرکانسی تأثیر محسوسی بر کارائی میراگر جرمی ندارد. در نسبت‌های جرمی ۲٪ و ۵٪ و در نسبت‌های فرکانسی یکسان و نسبت‌های میرائی مختلف، کاهش پاسخ RMS تقریباً برابر است. در نسبت میرائی ۰٪، با افزایش نسبت جرمی به ۱۰٪ و ۱۵٪، کارائی میراگر در کاهش پاسخ RMS کاهش یافته، البته افزایش نسبت میرائی، کارائی میراگر جرمی تنظیم شده نیمه‌فعال را در این نسبت‌های جرمی بهبود داده است.

- در زمین‌لرزه طبس بیشترین کاهش پاسخ در نسبت میرائی ۵٪ و نسبت جرمی ۱۵٪ و نسبت فرکانسی ۱/۰ مشاهده می‌شود. در نسبت‌های میرائی و نسبت‌های جرمی یکسان، بهینه‌ترین نسبت فرکانسی معمولاً برابر با ۱/۰ می‌باشد. در نسبت جرمی ۲٪ افزایش نسبت میرائی باعث کاهش در کارائی میراگر جرمی شده و در نسبت‌های جرمی ۵٪، ۱۰٪ و ۱۵٪ افزایش نسبت میرائی به ۵٪ موجب بهبود عملکرد میراگر

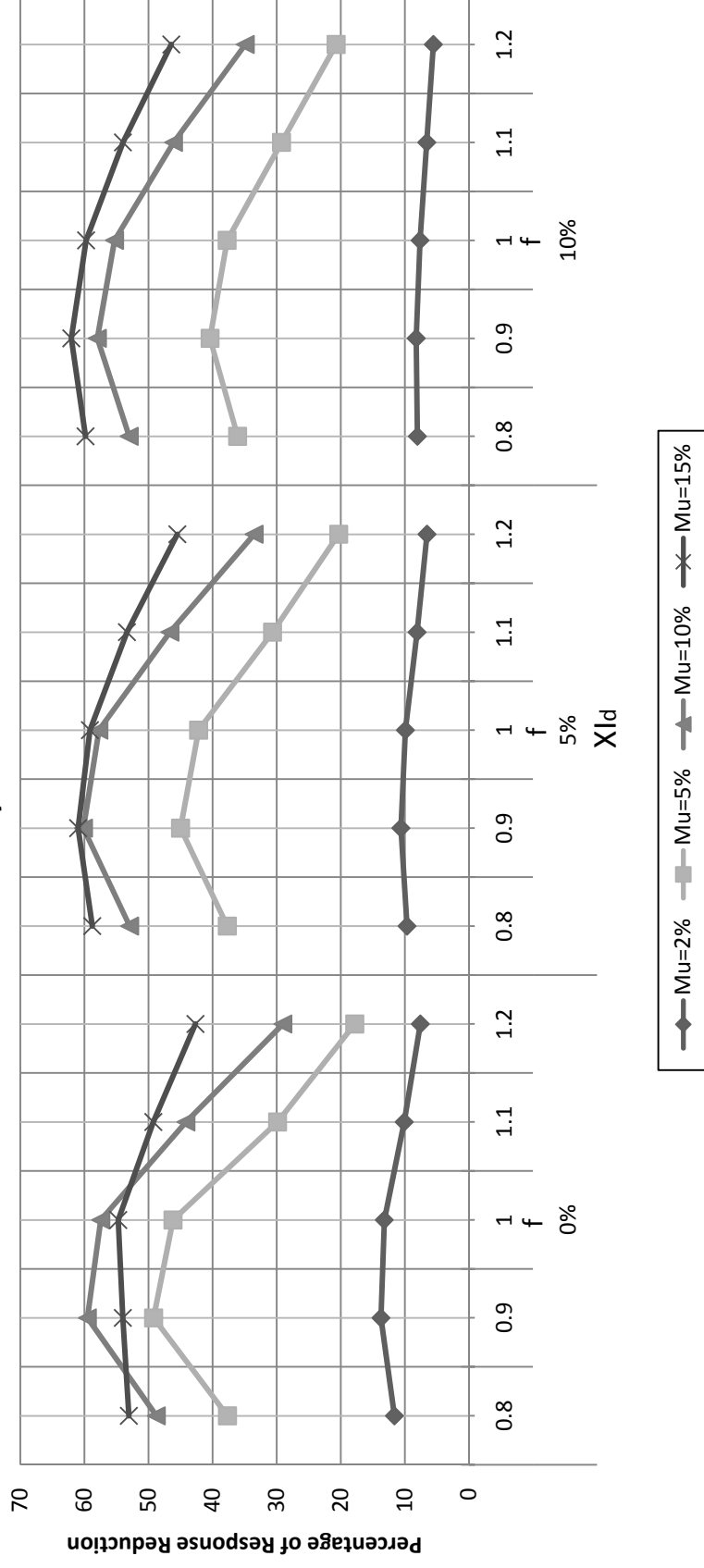
جرمی شده، اما با افزایش آن به ۱۰٪، تغییر محسوسی در عملکرد میراگر مشاهده نمی‌شود. در نسبت‌های میرائی و فرکانسی پایین، افزایش نسبت جرمی به ۱۵٪ باعث کاهش در کارائی میراگر می‌شود. اما با افزایش نسبت میرائی، این کاهش عملکرد مشاهده نمی‌شود. با افزایش نسبت جرمی کارائی میراگر افزایش می‌یابد، اما نرخ این افزایش به تدریج کاهش می‌یابد، طوری که در نسبت‌های جرمی ۱۰٪ و ۱۵٪ کارائی میراگر تقریباً برابر است.

Percentage of Peak Top Floor Displacement Reduction El Centro, with SATMD



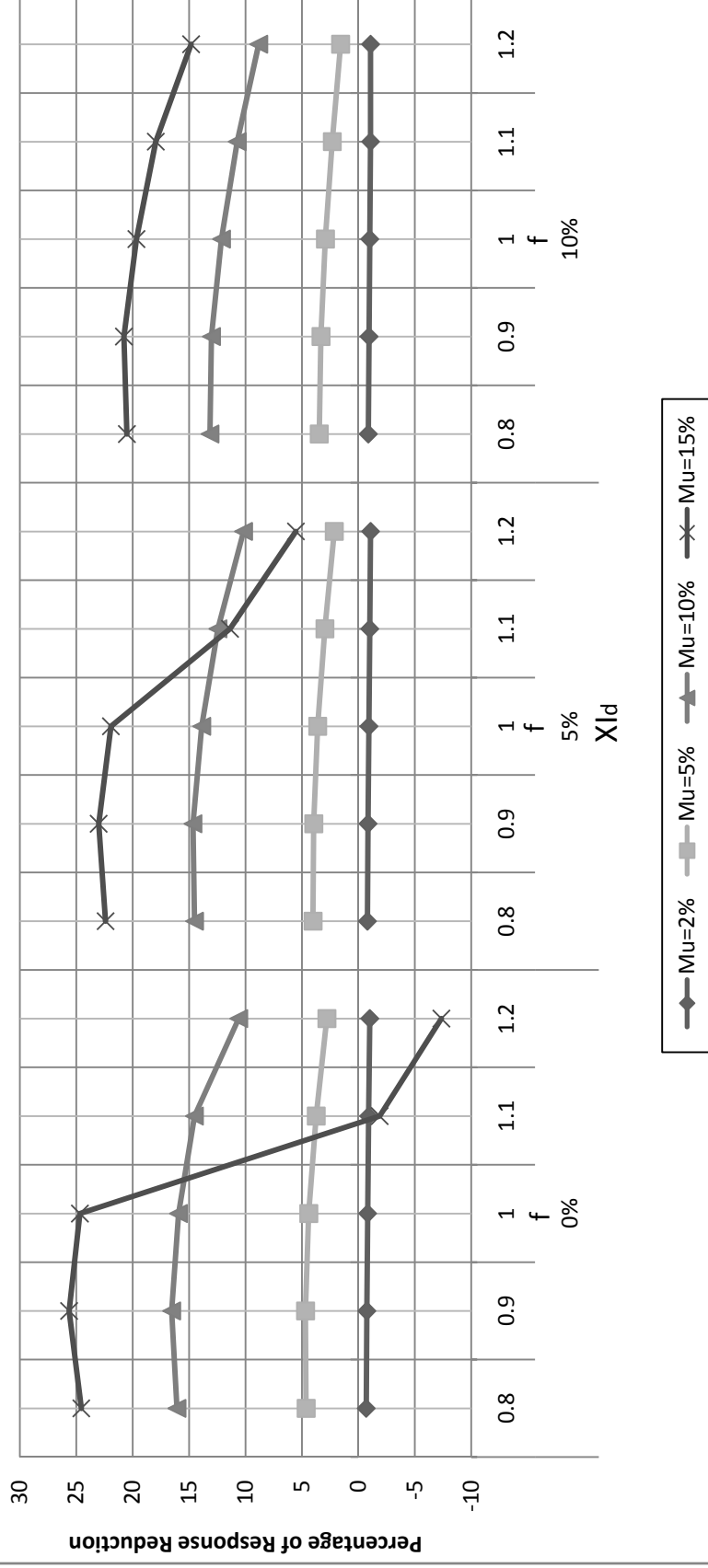
شکل ۷-۱۳ درصد کاهش پاسخ اوج جابجایی طبقه بام در سازه کنترل شده توسط SATMD در زمین لرزه El Centro

Percentage of RMS Top Floor Displacement Reduction El Centro, with SATMD



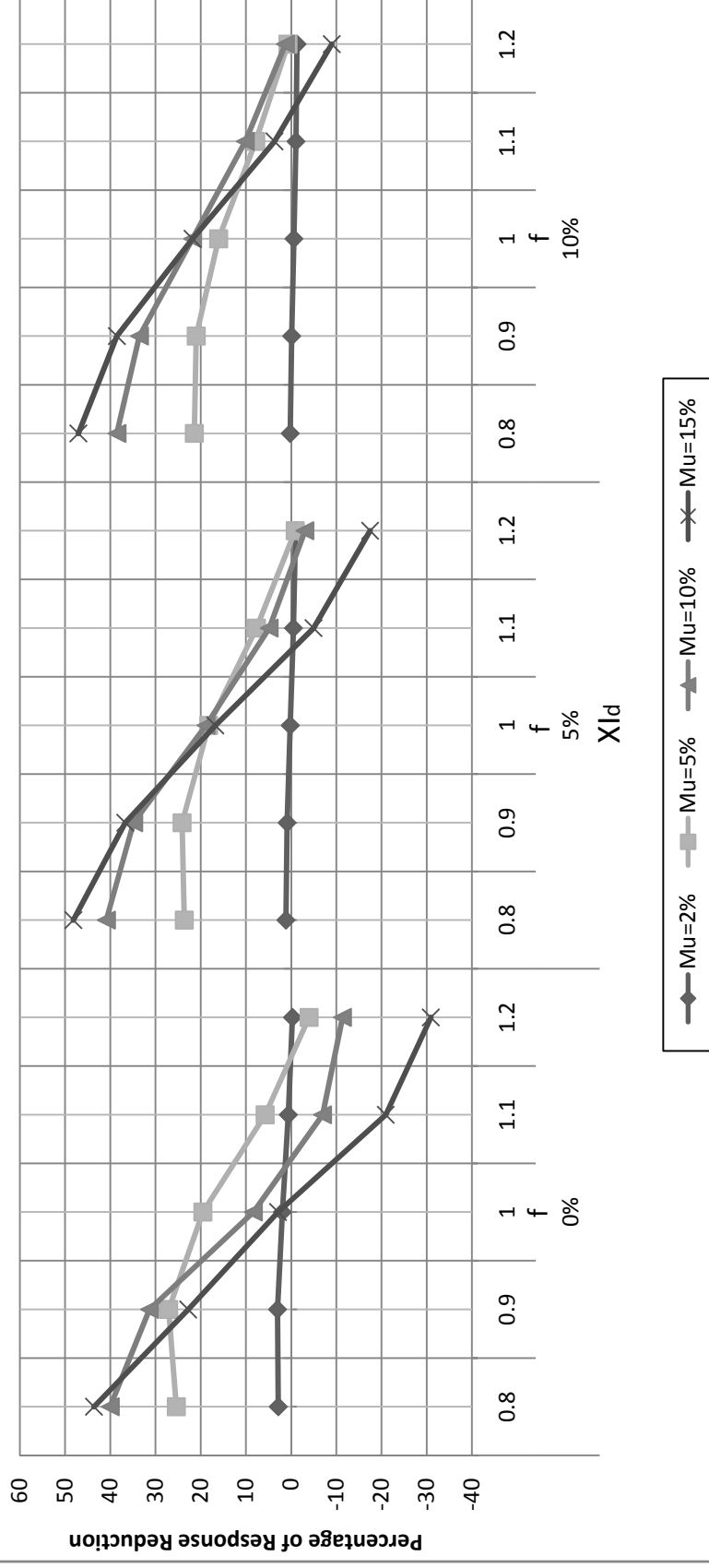
شکل ۱۴-۷ درصد کاهش پاسخ RMS جابجایی طبقه بام در سازه کنترل شده توسط SATMD در زمین لرزه El Centro

Percentage of Peak Top Floor Displacement Reduction Hachinohe, with SATMD



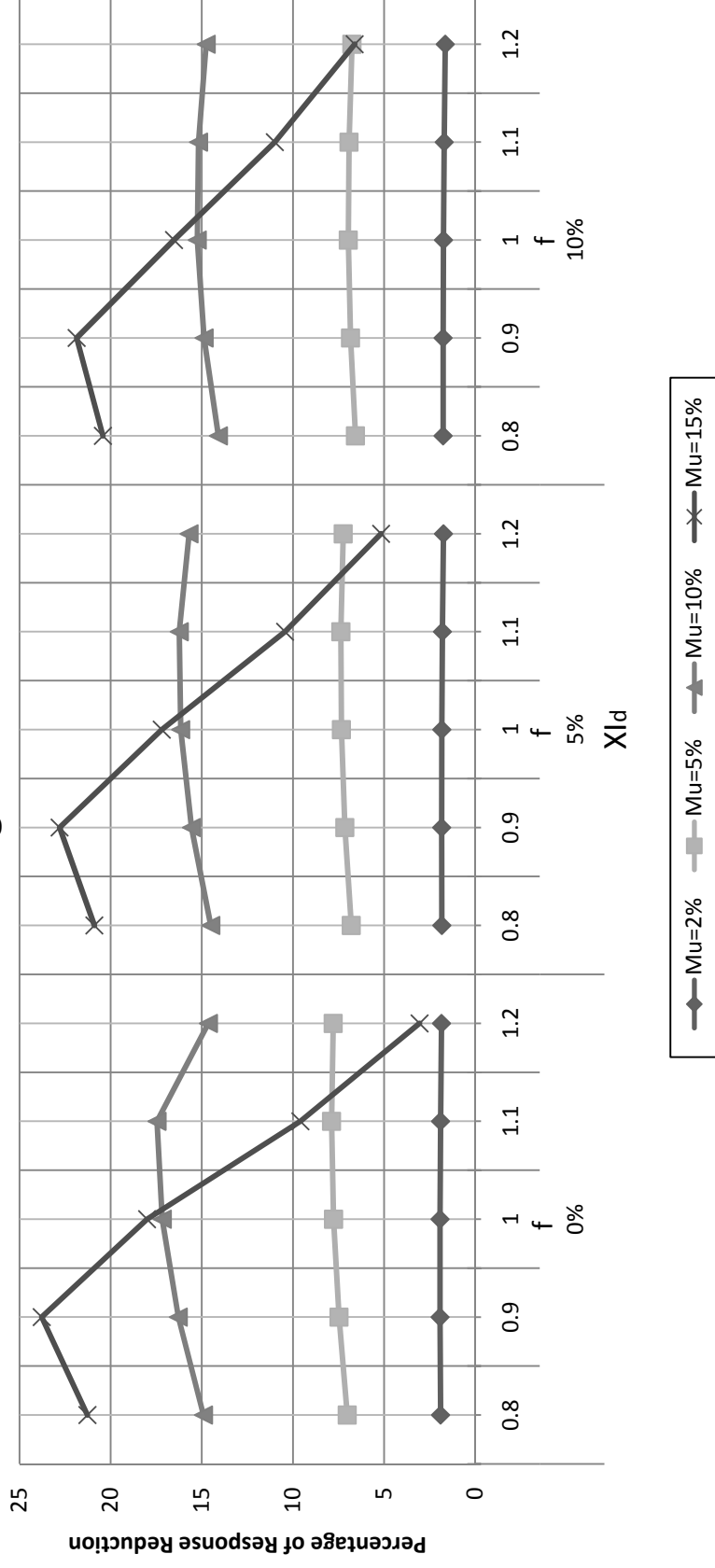
شکل ۱۵-۷ درصد کاهش پاسخ اوج جابجایی طبقه بام در سازه کنترل شده توسط SATMD در زمین لرزه Hachinohe

Percentage of RMS Top Floor Displacement Reduction Hachinohe, with SATMD



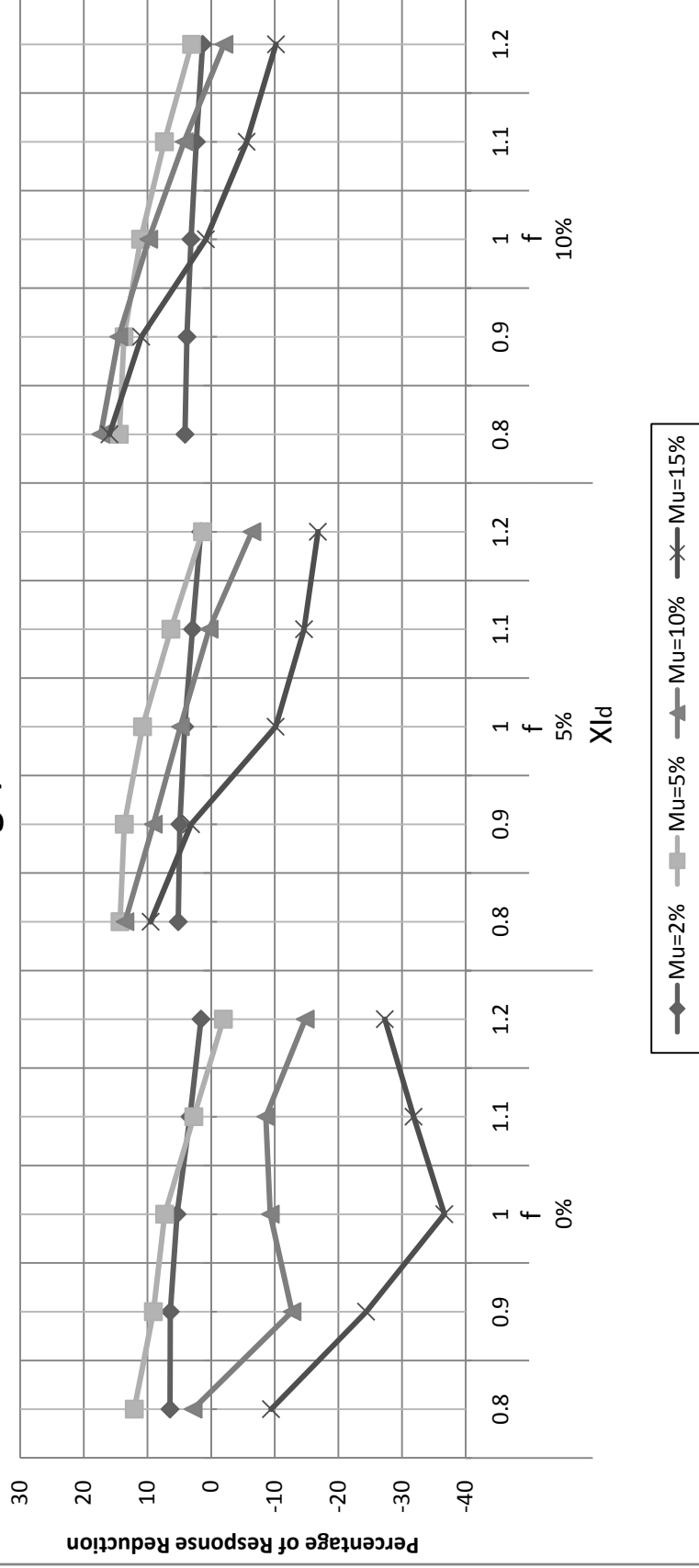
شکل ۱۶-۷ درصد کاهش پاسخ RMS جابجایی طبقه بام در سازه کنترل شده توسط SATMD در زمین لرزه Hachinohe

Percentage of Peak Top Floor Displacement Reduction Northridge, with SATMD



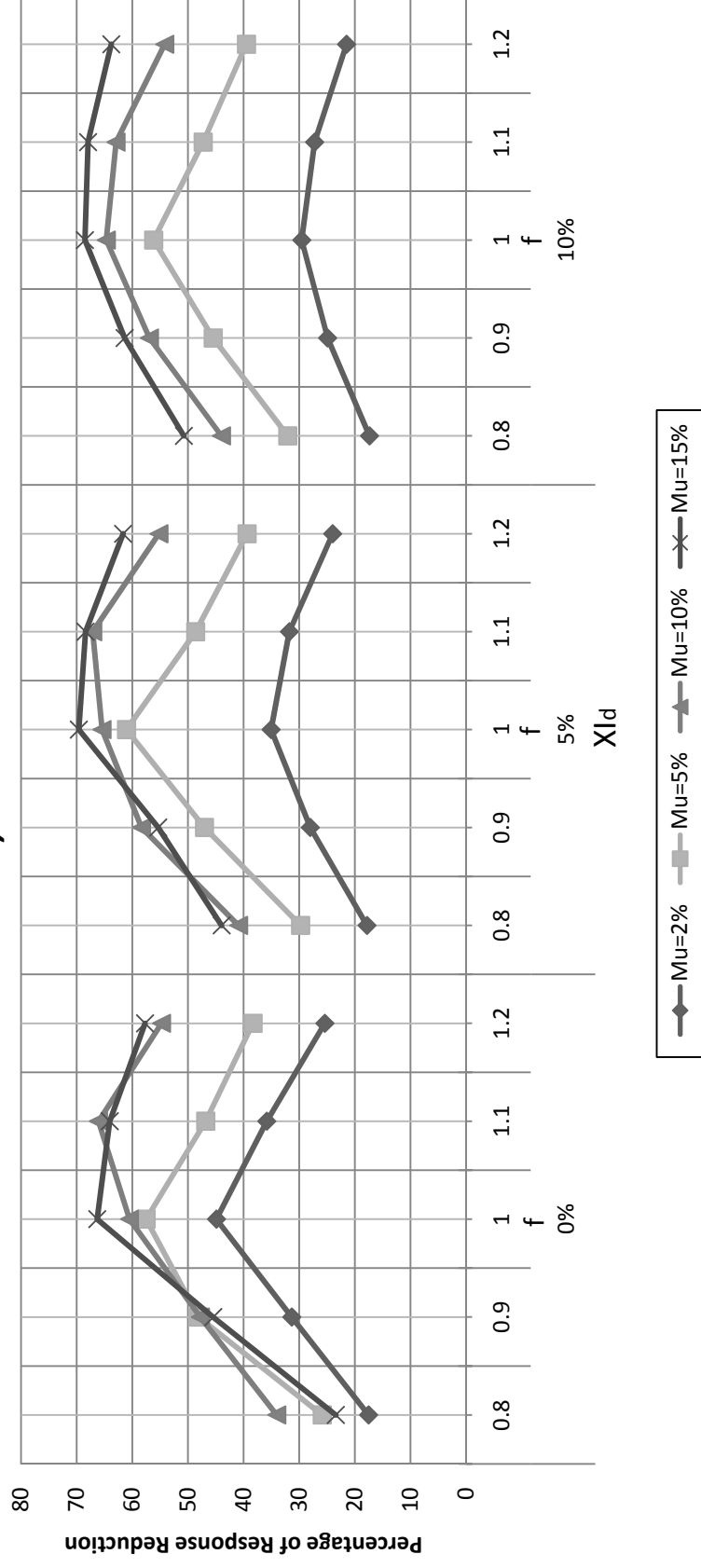
شکل ۱۷-۷ درصد کاهش پاسخ اوج جابجایی طبقه بام در سازه کنترل شده توسط SATMD در زمین لرزه Northridge

Percentage of RMS Top Floor Displacement Reduction Northridge, with SATMD



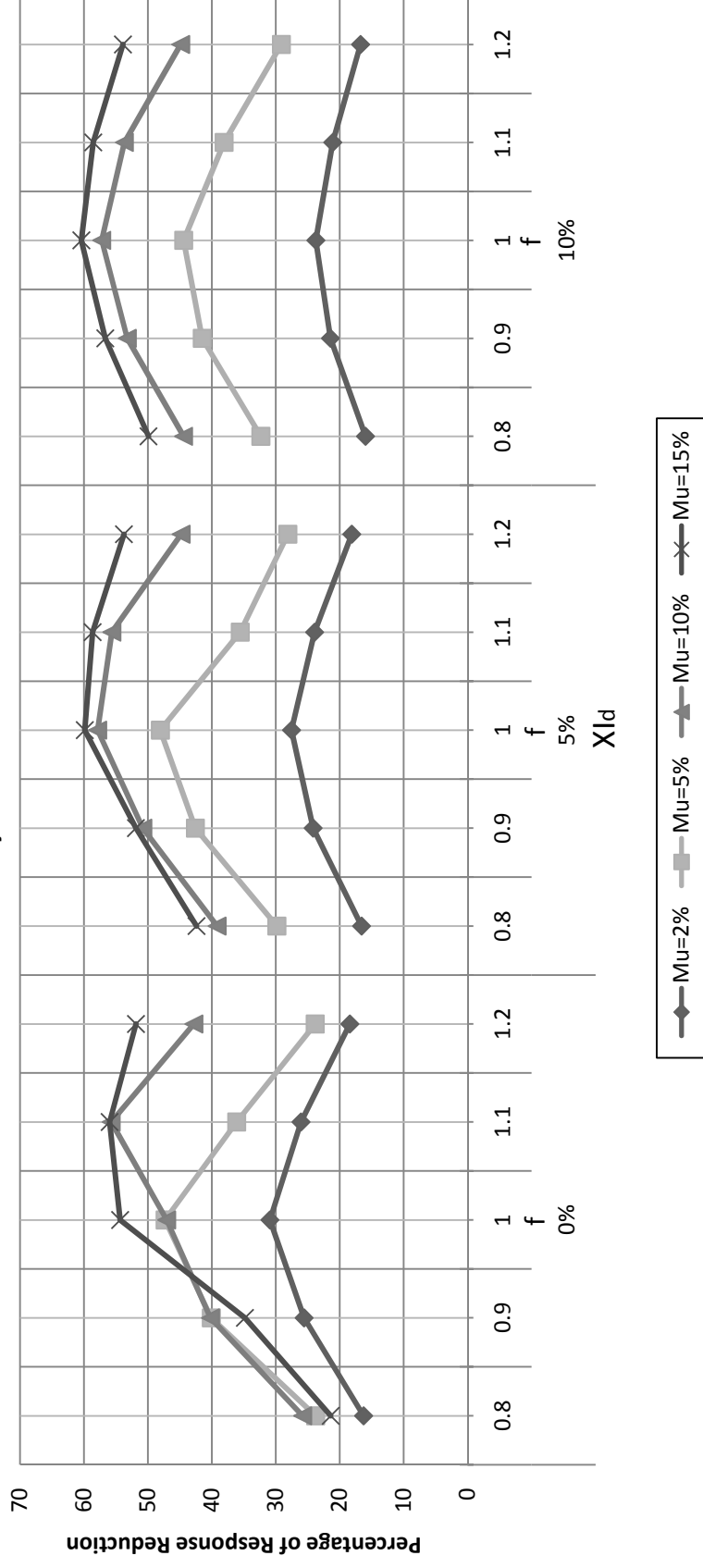
شکل ۷-۱۸ درصد کاهش پاسخ RMS جابجایی طبقه بام در سازه کنترل شده توسط SATMD در زمین لرزه Northridge

**Percentage of Peak Top Floor Displacement Reduction
Tabas, with SATMD**



شکل ۱۹-۷ درصد کاهش پاسخ اوج جابجایی طبقه بام در سازه کنترل شده توسط SATMD در زمین لرزه طیس

**Percentage of RMS Top Floor Displacement Reduction
Tabas, with SATMD**



شکل ۲۰-۷ درصد کاهش پاسخ RMS جابجایی طبقه بام در سازه کنترل شده توسط SATMD در زمین لرزه طیس

۷-۴-۳- مقایسه روش‌های کنترلی

تأثیر پارامترهای میراگرهای جرمی بر پاسخ جابجایی سازه کنترل شده توسط میراگرهای جرمی تنظیم شده غیرفعال و نیمه فعال تحت تحریکات چهار زمین لرزه بررسی و نشان داده شد. حال رفتار سازه کنترل نشده و کنترل شده توسط میراگر جرمی تنظیم شده غیرفعال و نیمه فعال را با یکدیگر مقایسه می‌کنیم. در میراگر جرمی نیمه فعال، نیروی کنترلی توسط میراگر نیمه فعال MR، به میراگر جرمی اعمال می‌شود، و برای کنترل ولتاژ ورودی میراگر نیمه فعال MR از کنترل فازی استفاده شده است. در نتیجه، مقایسه پاسخ‌های میراگرهای جرمی غیرفعال و نیمه فعال می‌تواند نشان‌دهنده تأثیر کنترل فازی میراگر نیمه فعال MR بر روی عملکرد میراگرهای جرمی باشد.

در بحث کنترل سیستم‌های سازه‌ای معیارهای عملکرد (ارزیابی) کنترل‌کننده‌ها که در فصل قبل به آنها اشاره شد، میزان کارایی کنترل‌کننده در کاهش پاسخ‌های سیستم را نشان می‌دهند. مقایسه معیارهای عملکرد کنترل‌کننده‌های مختلف، روش مناسبی برای انتخاب روش کنترلی مطلوب می‌باشد. معیارهای عملکرد سیستم‌های میراگر جرمی تنظیم شده غیرفعال (TMD) و نیمه فعال (SATMD) با نسبت فرکانسی ۱/۰ محاسبه و در جدول ۷-۱ تا جدول ۷-۴ آورده شده و در هر گروه نسبت میرایی و نسبت جرمی، معیار عملکرد کوچکتر مشخص شده است.

در جدول ۷-۱ و جدول ۷-۲ معیارهای عملکرد میراگر جرمی تنظیم شده غیرفعال با معیارهای عملکرد میراگر جرمی تنظیم شده نیمه فعال به ترتیب در زمین لرزه‌های حوزه دور و حوزه نزدیک، در نسبت‌های جرمی ۰.۲٪ و ۰.۵٪ مقایسه شده است. در نسبت جرمی ۰.۲٪ و نسبت میرایی ۰.۱٪، میراگر جرمی تنظیم شده نیمه فعال در زمین لرزه‌های El Centro، Hachinohe و Northridge نسبت به میراگر جرمی غیرفعال در کاهش پاسخ‌های RMS و در زمین لرزه طیس در کاهش تمامی پاسخ‌ها، عملکرد مطلوب‌تری نشان می‌دهد. در این نسبت جرمی و در نسبت‌های میرایی ۰.۵٪ و ۰.۱٪، میراگر جرمی تنظیم شده غیرفعال نسبت به میراگر جرمی نیمه فعال عملکرد بهتری دارد. نتایج مربوط به نسبت

جرمی ۵٪، نشان‌دهنده عملکرد بهتر میراگر جرمی تنظیم شده نیمه‌فعال نسبت به میراگر جرمی غیرفعال در نسبت میرائی ۰٪ است. در این نسبت جرمی و نسبت میرائی ۵٪، در زمین‌لرزه‌های حوزه-دور عملکرد میراگر جرمی غیرفعال نسبت به میراگر جرمی نیمه‌فعال و در زمین‌لرزه‌های حوزه-نزدیک عملکرد میراگر جرمی نیمه‌فعال نسبت به میراگر جرمی غیرفعال، بهتر است. در نسبت میرائی ۱۰٪ میراگر جرمی غیرفعال عملکرد بهتری نشان می‌دهد. مقایسه معیارهای عملکرد میراگر جرمی نیمه‌فعال در این دو نسبت جرمی، نشان‌دهنده عملکرد بهتر آن در نسبت جرمی ۵٪ است.

در بحث کنترل سازه‌ها توسط میراگرهای جرمی تنظیم شده، یکی از محدودیت‌های طراحی، فضای اشغال شده توسط میراگر جرمی در سازه می‌باشد. معیارهای عملکرد J5 و J10 به ترتیب نسبت جابجایی RMS میراگر جرمی تنظیم شده به پاسخ RMS جابجایی سازه کنترل‌نشده و نسبت جابجایی اوج میراگر جرمی تنظیم شده به پاسخ اوج جابجایی سازه کنترل‌نشده در طبقه بام می‌باشد. مقایسه این معیارهای عملکرد در مورد میراگر جرمی تنظیم شده غیرفعال و نیمه‌فعال نشان می‌دهد که میراگر جرمی نیمه‌فعال نسبت به میراگر جرمی غیرفعال، جابجایی کمتری دارد. در نتیجه، جابجایی بیشتر میراگر جرمی نمی‌تواند موجب بهبود عملکرد آن باشد.

در شکل ۷-۲۱ تا شکل ۷-۳۲ پاسخ‌های جابجایی و شتاب مطلق طبقات سازه کنترل‌نشده و کنترل‌شده توسط میراگرهای جرمی با نسبت جرمی ۲٪ و ۵٪ و در سه نسبت میرائی ۰٪، ۵٪ و ۱۰٪، در نسبت فرکانسی ۱/۰ نشان داده شده‌اند.

در شکل ۷-۲۱ تا شکل ۷-۲۳ مشاهده می‌شود که در زمین‌لرزه El Centro میراگر جرمی تنظیم شده نیمه‌فعال با نسبت میرائی ۰٪ و نسبت جرمی ۲٪ در کاهش پاسخ اوج نسبت به میراگر جرمی غیرفعال عملکرد پایین‌تر، اما در کاهش پاسخ RMS عملکرد بالاتری دارد، و در نسبت جرمی ۵٪ میراگر جرمی نیمه‌فعال نسبت به میراگر جرمی غیرفعال عملکرد مطلوب‌تری نشان می‌دهد. در نسبت‌های میرائی بالاتر، میراگرهای غیرفعال عملکرد بهتری در کاهش پاسخ‌ها نشان می‌دهند. با

افزایش نسبت میرائی، عملکرد میراگرهای جرمی نیمه فعال کاهش پیدا کرده است.

نتایج مربوط به زمین لرزه Hachinohe، شکل ۷-۲۴ تا شکل ۷-۲۶، نشان دهنده این است که در نسبت میرائی ۰٪، میراگرهای جرمی نیمه فعال در کاهش پاسخ های RMS و میراگرهای جرمی غیرفعال در کاهش پاسخ های اوج عملکرد بهتری دارند. میراگرهای جرمی غیرفعال در کاهش پاسخ های RMS عملکرد منفی نشان می دهند، یعنی باعث افزایش در پاسخ سازه شده اند. با افزایش نسبت میرائی عملکرد میراگرهای جرمی غیرفعال بهبود یافته و در مقایسه با میراگرهای جرمی نیمه فعال عملکرد نسبتاً بهتری نشان می دهند. در این زمین لرزه نیز با افزایش نسبت میرائی، عملکرد میراگرهای جرمی نیمه فعال کاهش پیدا کرده است.

نتایج مربوط به زمین لرزه Northridge در شکل ۷-۲۷ تا شکل ۷-۲۹ نشان داده شده است. در نسبت میرائی ۰٪، میراگر جرمی نیمه فعال در کاهش پاسخ های RMS و میراگر جرمی غیرفعال در کاهش پاسخ های اوج عملکرد بهتری نشان می دهد. میراگرهای جرمی تنظیم شده غیرفعال در کاهش پاسخ های RMS عملکرد منفی نشان می دهند. در نسبت میرائی ۵٪ و در نسبت جرمی ۲٪، میراگر جرمی تنظیم شده غیرفعال در کاهش پاسخ ها نسبت به میراگر جرمی تنظیم شده نیمه فعال عملکرد بهتری نشان می دهد، و در نسبت جرمی ۵٪، میراگر جرمی نیمه فعال در کاهش پاسخ های RMS و میراگر جرمی غیرفعال در کاهش پاسخ های اوج، عملکرد بهتری دارد. در نسبت میرائی ۱۰٪، میراگر جرمی غیرفعال عملکرد بهتری نشان می دهد.

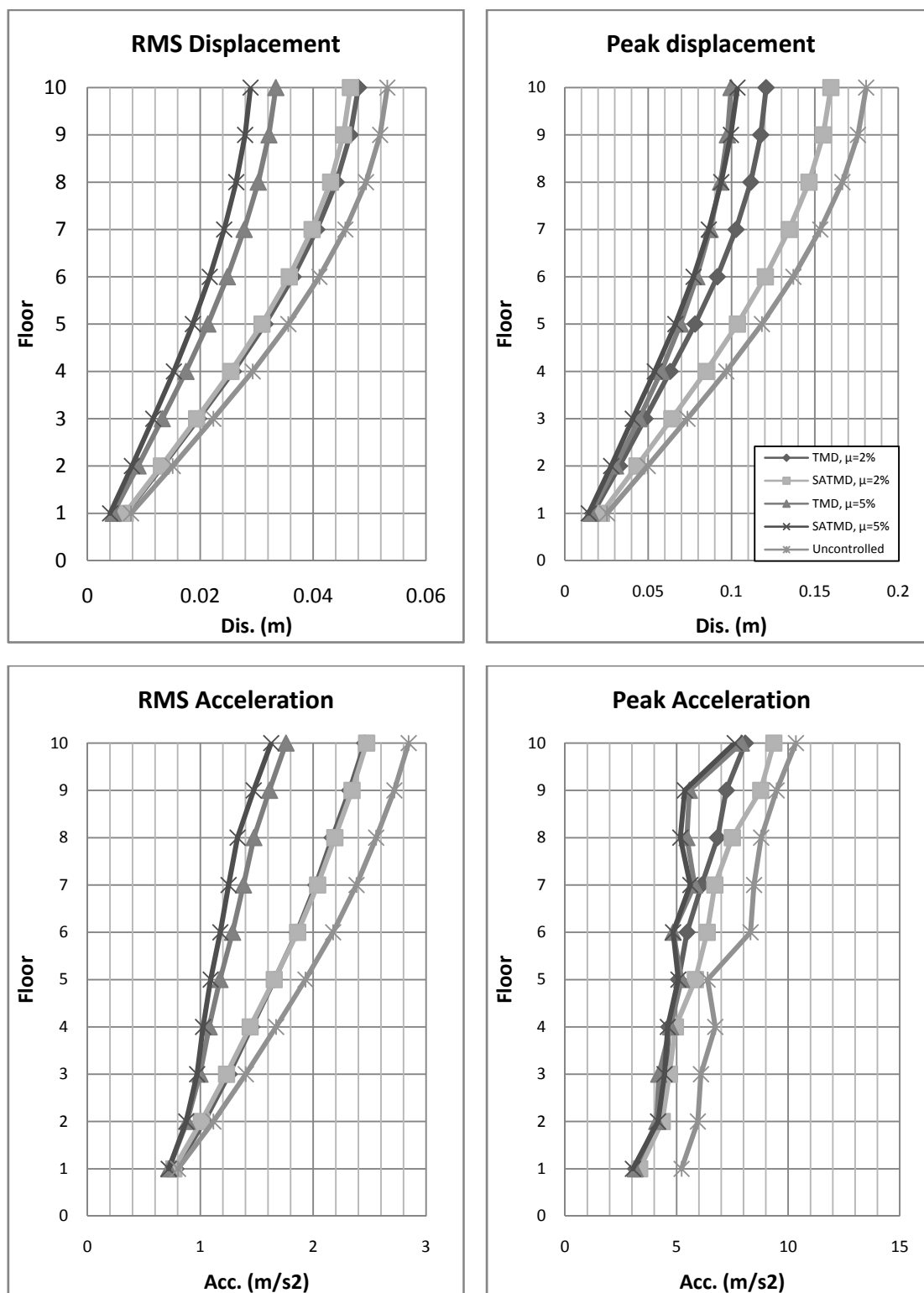
در زمین لرزه طبس، که نتایج آن در شکل ۷-۳۰ تا شکل ۷-۳۲ نشان داده شده است، در نسبت میرائی ۰٪، میراگرهای جرمی نیمه فعال عملکرد بهتری نشان می دهند. در نسبت میرائی ۵٪ و نسبت جرمی ۲٪، میراگر جرمی غیرفعال و در نسبت جرمی ۵٪، میراگر جرمی نیمه فعال عملکرد بهتری دارد. در نسبت میرائی ۱۰٪، میراگرهای جرمی غیرفعال عملکرد بهتری نشان می دهند.

جدول ۱-۷ معیارهای عملکرد میراگرهای جرمی تنظیم شده غیرفعال و نیمه‌فعال با نسبت‌های جرمی ۲٪ و ۵٪ در زمین‌لرزه‌های El Centro و Hachinohe

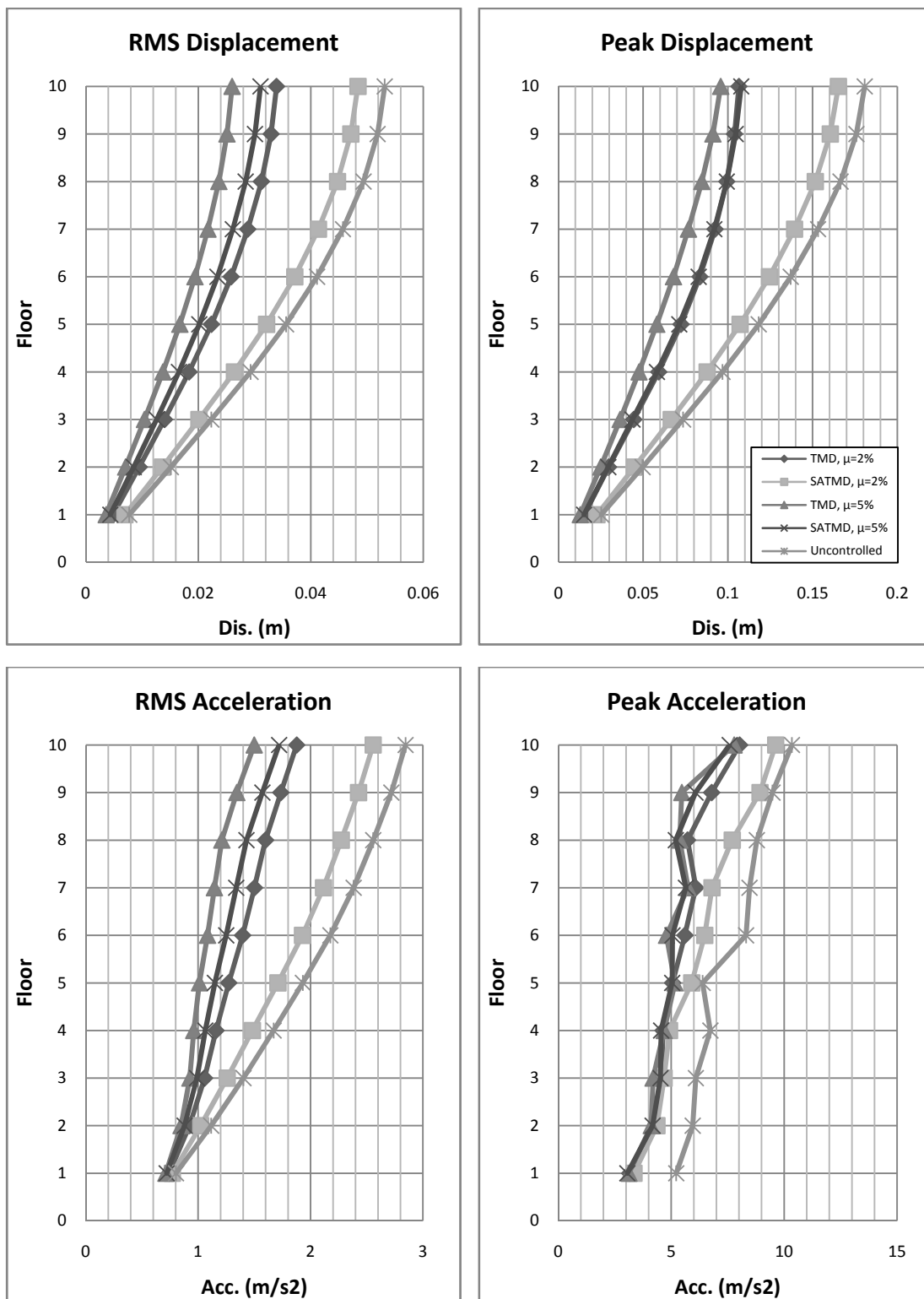
		Xld									
		0%					5%				
		Mu					Mu				
		2%		5%		2%		5%		2%	
		TMD	SATMD	TMD	SATMD	TMD	SATMD	TMD	SATMD	TMD	SATMD
El Centro	J1	0.854	0.860	0.612	0.566	0.653	0.889	0.521	0.598	0.686	0.909
	J2	0.086	0.086	0.061	0.056	0.066	0.089	0.052	0.060	0.069	0.091
	J3	0.895	0.868	0.622	0.538	0.631	0.901	0.484	0.578	0.664	0.924
	J4	0.088	0.086	0.061	0.053	0.063	0.090	0.047	0.057	0.066	0.092
	J5	7.035	1.181	3.069	1.716	3.884	0.829	2.175	1.375	2.741	0.600
	J6	0.766	0.887	0.749	0.720	0.761	0.912	0.738	0.719	0.758	0.925
	J7	0.081	0.091	0.073	0.071	0.078	0.093	0.072	0.073	0.079	0.093
	J8	0.668	0.883	0.552	0.573	0.589	0.914	0.530	0.597	0.667	0.931
	J9	0.067	0.088	0.057	0.056	0.060	0.091	0.051	0.060	0.066	0.093
	J10	6.050	1.506	2.891	1.831	3.774	1.010	2.134	1.445	2.700	0.768
Hachinohe	J1	1.042	0.961	1.036	0.757	0.802	0.976	0.772	0.776	0.799	0.984
	J2	0.103	0.096	0.103	0.076	0.081	0.098	0.077	0.078	0.080	0.098
	J3	1.117	0.981	1.185	0.805	0.828	0.998	0.861	0.818	0.814	1.006
	J4	0.110	0.098	0.116	0.079	0.082	0.099	0.084	0.081	0.081	0.100
	J5	7.463	0.502	4.650	2.005	4.159	0.313	3.066	1.598	2.976	0.244
	J6	0.904	0.983	0.822	0.933	0.927	0.983	0.853	0.937	0.940	0.984
	J7	0.091	0.098	0.084	0.093	0.093	0.099	0.086	0.093	0.094	0.099
	J8	0.910	1.008	0.901	0.956	0.918	1.009	0.838	0.964	0.937	1.010
	J9	0.093	0.100	0.091	0.094	0.091	0.100	0.082	0.095	0.093	0.100
	J10	5.691	0.510	3.401	2.025	3.590	0.319	2.492	1.586	2.651	0.248

جدول ۲-۷ معیارهای عملکرد میراگرهای جرمی تنظیم شده غیرفعال و نیمه‌فعال با نسبت‌های جرمی ۰.۲٪ و ۰.۵٪ در زمین‌لرزه‌های Northridge و طیس

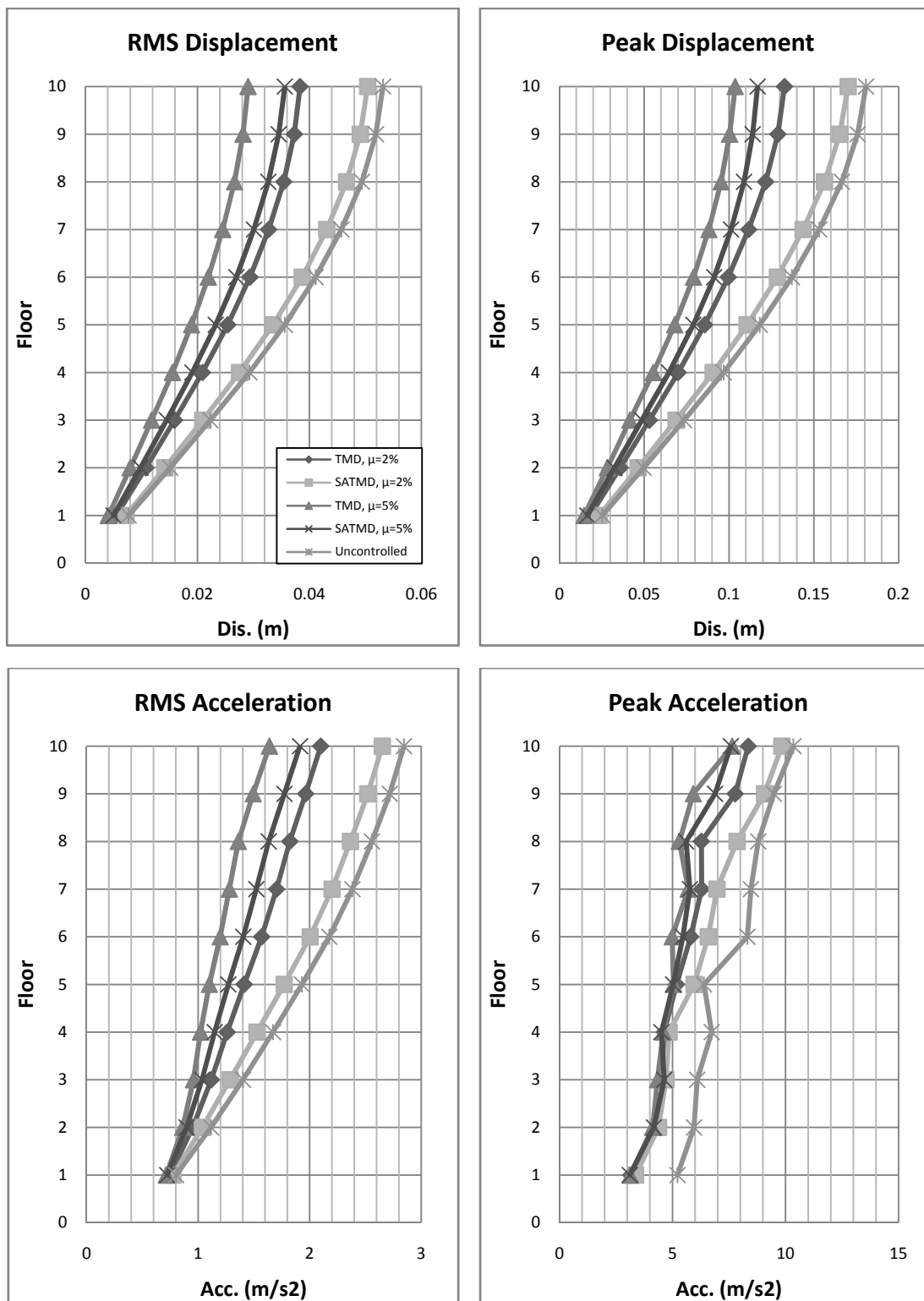
0%						5%						10%					
Mu						Mu						Mu					
2%		5%				2%		5%				2%		5%			
TMD	SATMD	TMD	SATMD	TMD	SATMD	TMD	SATMD	TMD	SATMD	TMD	SATMD	TMD	SATMD	TMD	SATMD		
J1	1.182	0.949	1.238	0.922	0.955	0.952	0.923	0.892	0.922	0.954	0.881	0.922	0.954	0.874	0.881		
J2	0.117	0.095	0.124	0.093	0.096	0.095	0.093	0.090	0.093	0.096	0.089	0.093	0.096	0.088	0.089		
J3	1.304	0.947	1.364	0.927	0.949	0.959	0.944	0.892	0.892	0.969	0.889	0.899	0.969	0.873	0.889		
J4	0.130	0.094	0.137	0.092	0.095	0.095	0.094	0.088	0.088	0.096	0.088	0.090	0.096	0.086	0.088		
J5	7.782	1.427	5.892	2.530	4.066	1.127	3.158	1.876	1.876	2.821	1.531	2.821	0.936	2.306	1.531		
J6	0.980	0.982	0.949	0.945	0.976	0.982	0.941	0.941	0.941	0.981	0.938	0.974	0.981	0.936	0.938		
J7	0.097	0.098	0.094	0.095	0.097	0.098	0.093	0.095	0.095	0.098	0.095	0.097	0.098	0.093	0.095		
J8	0.961	0.981	0.902	0.922	0.962	0.982	0.907	0.927	0.927	0.983	0.930	0.964	0.983	0.912	0.930		
J9	0.096	0.098	0.091	0.093	0.096	0.098	0.090	0.093	0.093	0.098	0.093	0.096	0.098	0.091	0.093		
J10	4.006	1.284	2.905	2.070	2.586	1.006	2.249	1.640	1.640	2.050	1.343	2.050	0.806	1.802	1.343		
Northridge						Tabas											
J1	0.907	0.734	0.791	0.631	0.699	0.757	0.608	0.598	0.598	0.786	0.614	0.709	0.786	0.585	0.614		
J2	0.092	0.074	0.082	0.064	0.070	0.076	0.062	0.060	0.060	0.079	0.062	0.071	0.079	0.059	0.062		
J3	0.888	0.695	0.675	0.527	0.641	0.725	0.506	0.519	0.519	0.763	0.556	0.660	0.763	0.504	0.556		
J4	0.089	0.069	0.069	0.053	0.064	0.072	0.051	0.052	0.052	0.076	0.055	0.066	0.076	0.050	0.055		
J5	7.088	2.733	3.398	2.332	3.773	2.029	2.232	1.712	1.712	2.649	1.404	2.649	1.699	1.731	1.404		
J6	0.847	0.645	0.708	0.618	0.586	0.762	0.587	0.510	0.510	0.764	0.537	0.663	0.764	0.492	0.537		
J7	0.090	0.069	0.075	0.064	0.064	0.076	0.062	0.056	0.056	0.079	0.058	0.070	0.079	0.055	0.058		
J8	0.809	0.555	0.526	0.425	0.476	0.647	0.411	0.389	0.389	0.703	0.438	0.574	0.703	0.378	0.438		
J9	0.082	0.055	0.054	0.044	0.047	0.064	0.042	0.040	0.040	0.069	0.045	0.057	0.069	0.038	0.045		
J10	4.341	2.489	2.611	1.704	2.841	1.838	1.557	1.440	1.440	2.151	1.282	2.151	1.638	1.341	1.282		
Earthquake Record																	



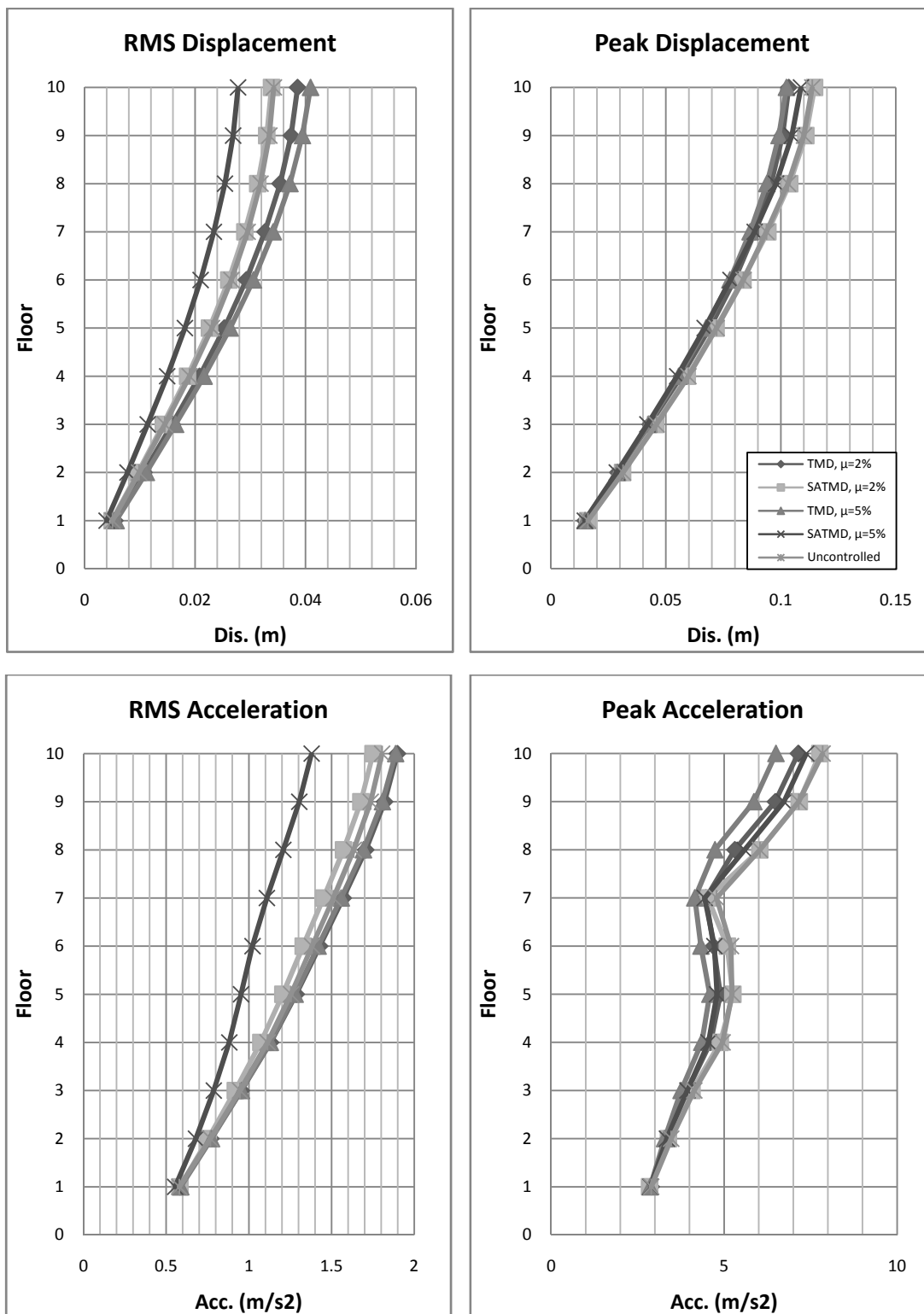
شکل ۷-۲۱ پاسخ‌های جابجایی و شتاب مطلق طبقات سازه کنترل‌نشده و کنترل‌شده توسط میراگرهای جرمی تنظیم شده با نسبت‌های جرمی ۲٪ و ۵٪ و نسبت میرایی ۰٪، در زمین‌لرزه El Centro



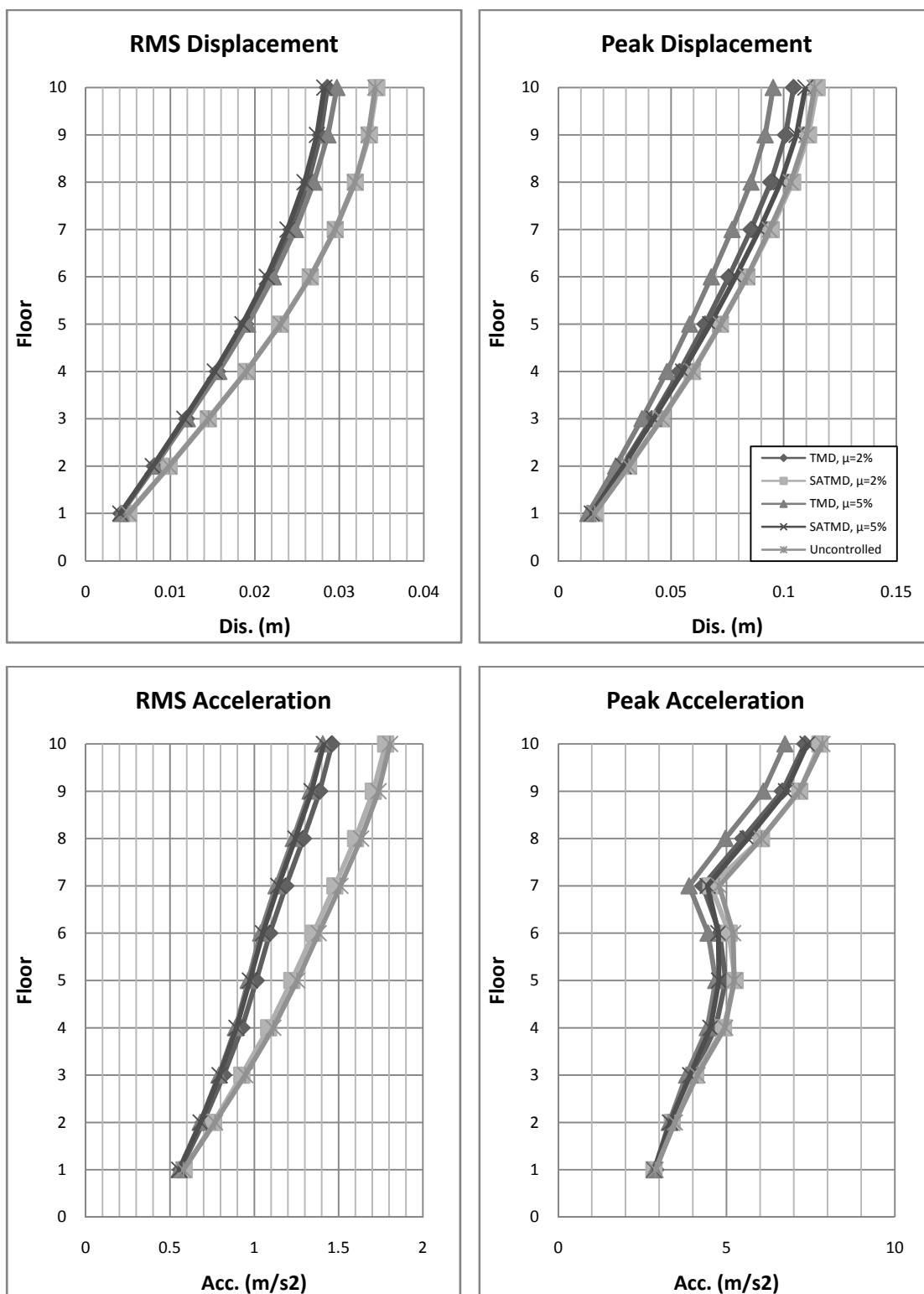
شکل ۷-۲۲ پاسخ‌های جابجایی و شتاب مطلق طبقات سازه کنترل‌نشده و کنترل‌شده توسط میراگرهای جرمی تنظیم شده با نسبت‌های جرمی ۲٪ و ۵٪ و نسبت میرایی ۵٪، در زمین‌لرزه El Centro



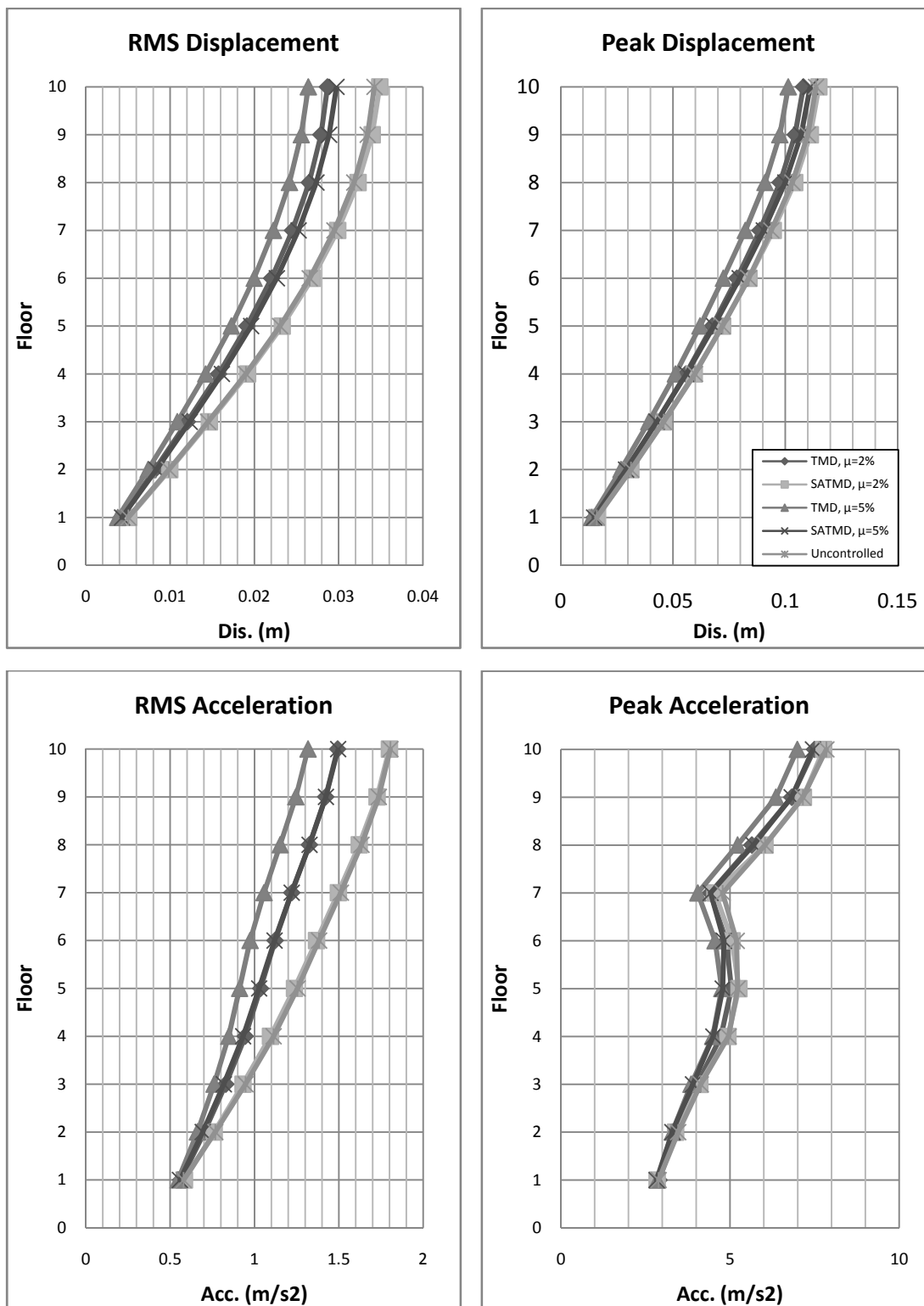
شکل ۷-۲۳ پاسخ‌های جابجایی و شتاب مطلق طبقات سازه کنترل‌نشده و کنترل‌شده توسط میراگرهای جرمی تنظیم شده با نسبت‌های جرمی ۲٪ و ۵٪ و نسبت میرایی ۱۰٪، در زمین‌لرزه El Centro



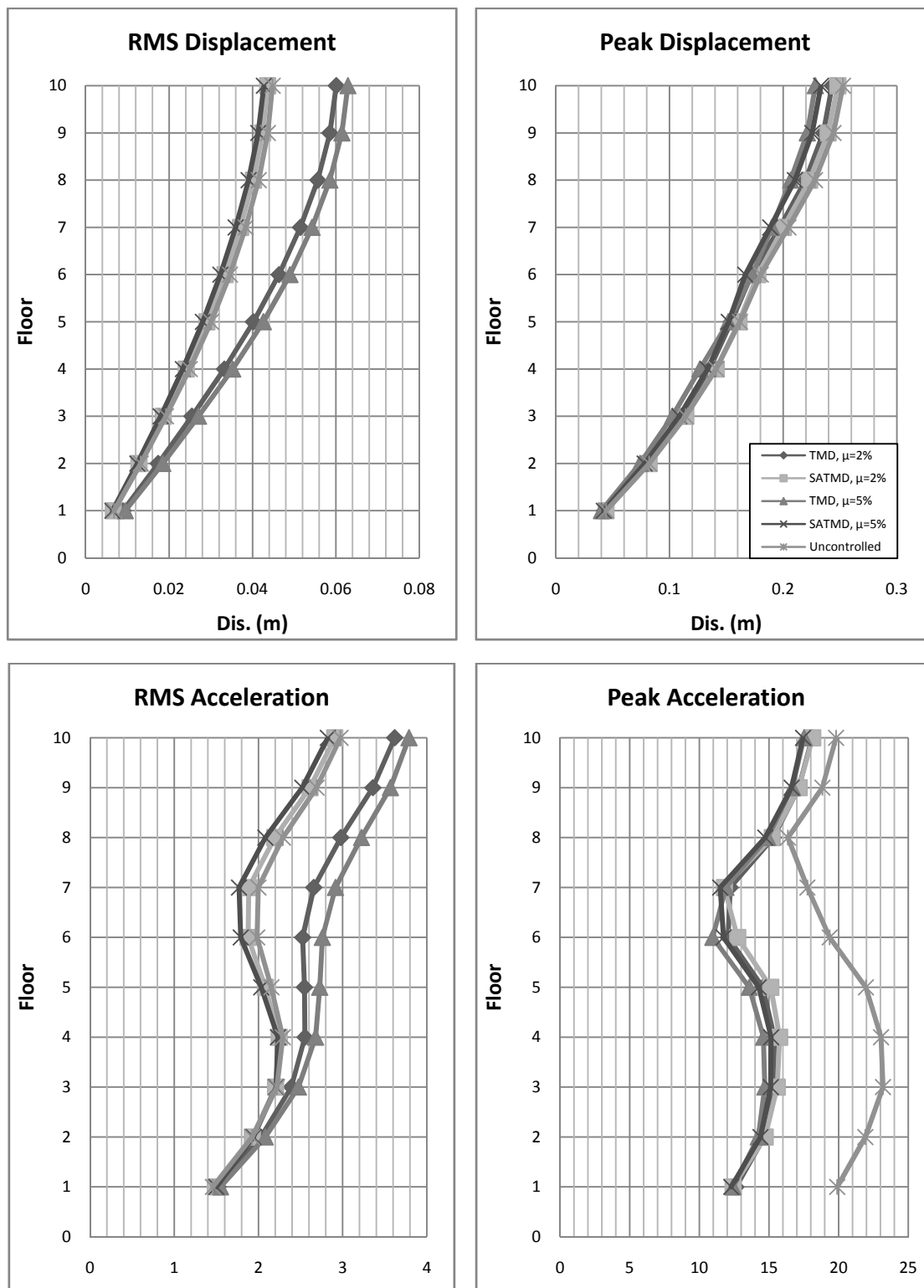
شکل ۷-۲۴ پاسخ‌های جابجایی و شتاب مطلق طبقات سازه کنترل‌نشده و کنترل‌شده توسط میراگرهای جرمی تنظیم شده با نسبت‌های جرمی ۲٪ و ۵٪ و نسبت میرایی ۰٪، در زمین‌لرزه Hachinohe



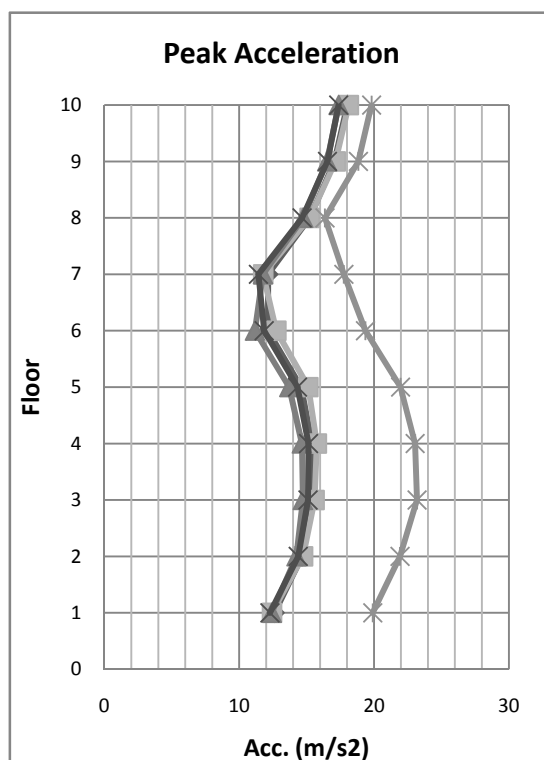
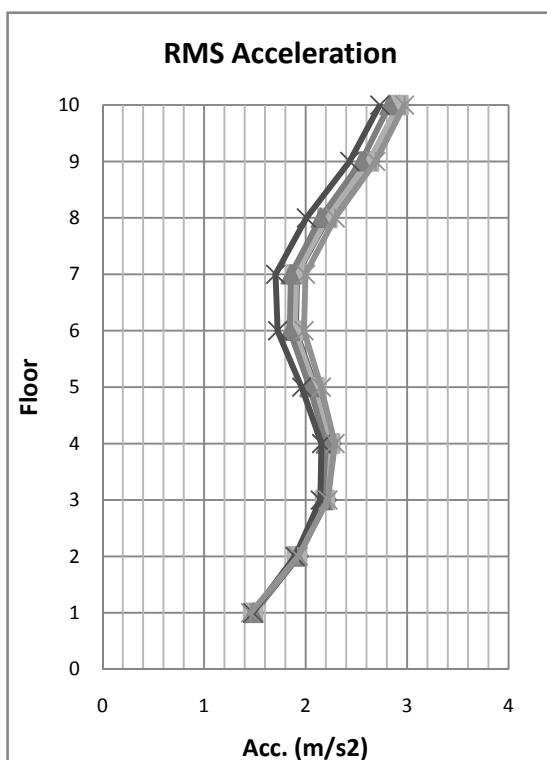
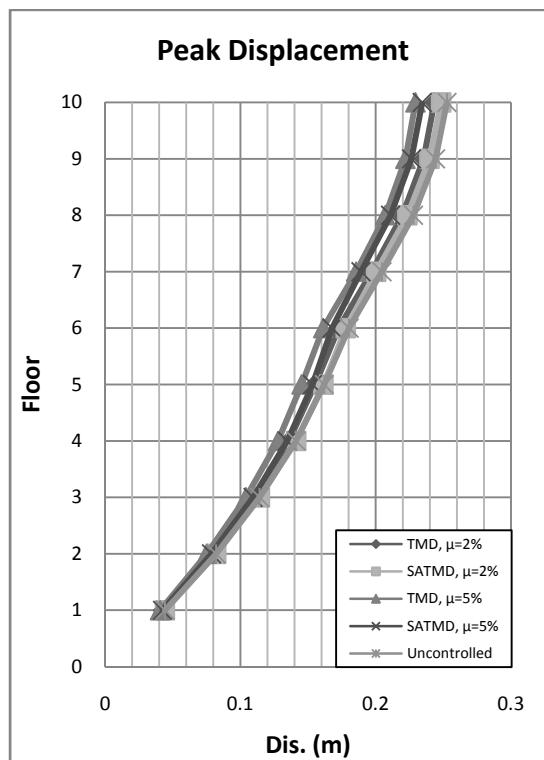
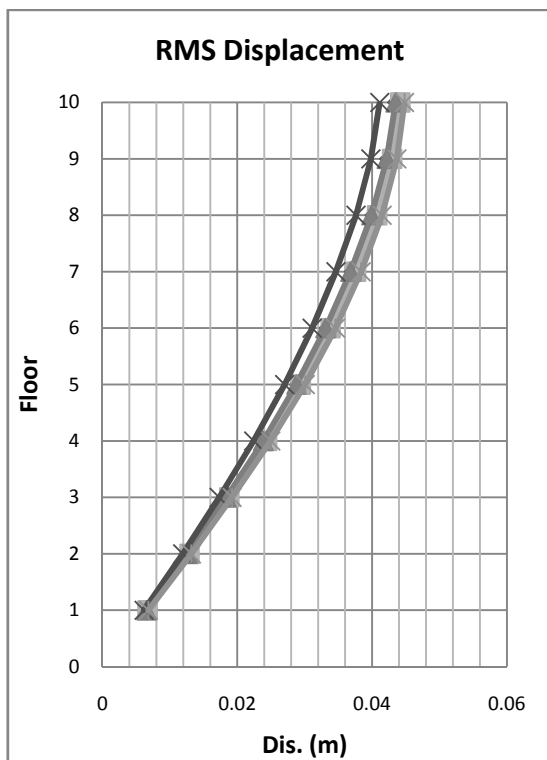
شکل ۷-۲۵ پاسخ‌های جابجایی و شتاب مطلق طبقات سازه کنترل نشده و کنترل شده توسط میراگرهای جرمی تنظیم شده با نسبت‌های جرمی ۲٪ و ۵٪ و نسبت میرایی ۵٪، در زمین‌لرزه Hachinohe



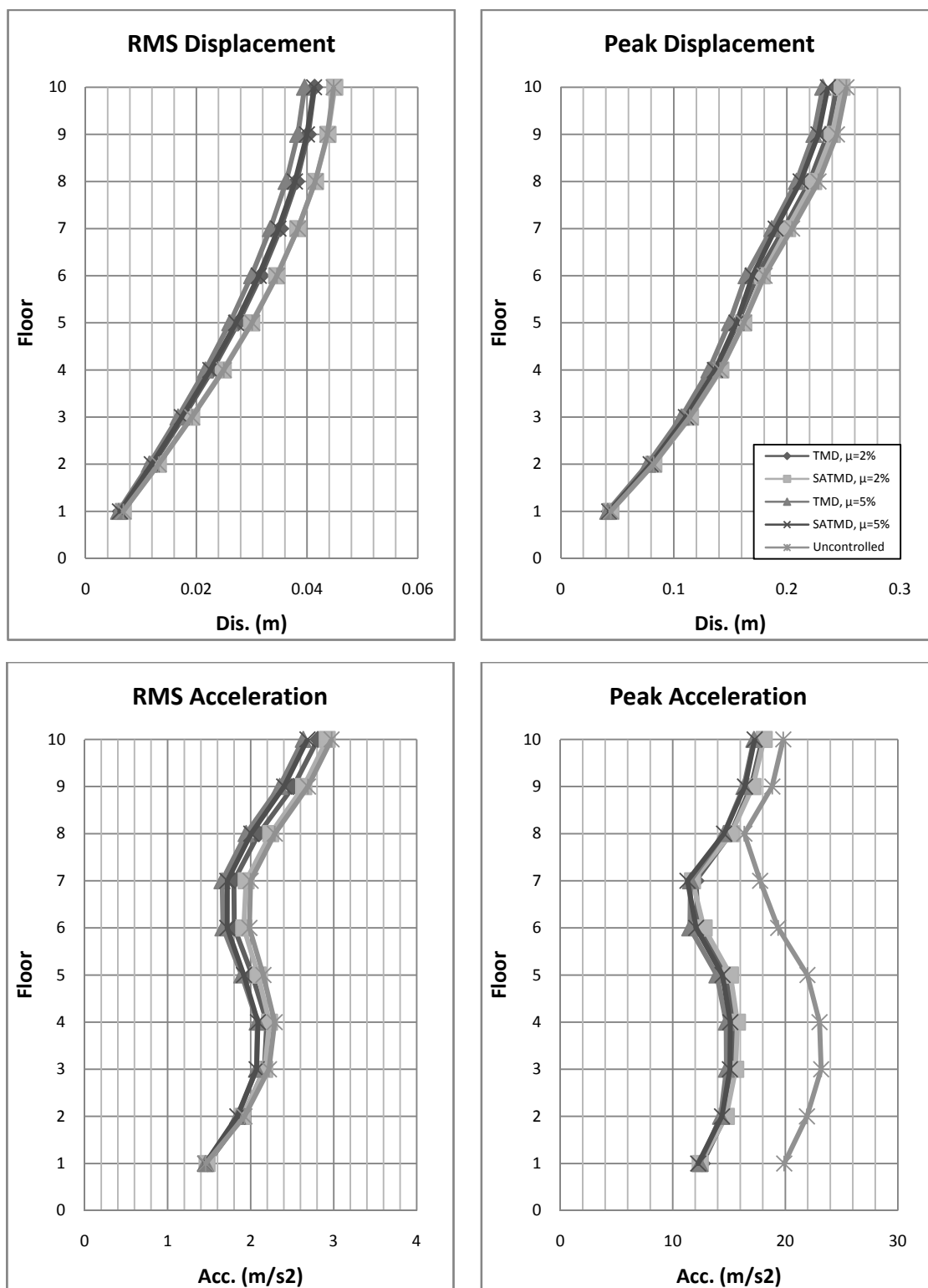
شکل ۷-۲۶ پاسخ‌های جابجایی و شتاب مطلق طبقات سازه کنترل‌نشده و کنترل‌شده توسط میراگرهای جرمی تنظیم شده با نسبت‌های جرمی ۲٪ و ۵٪ و نسبت میرایی ۱۰٪، در زمین‌لرزه Hachinohe



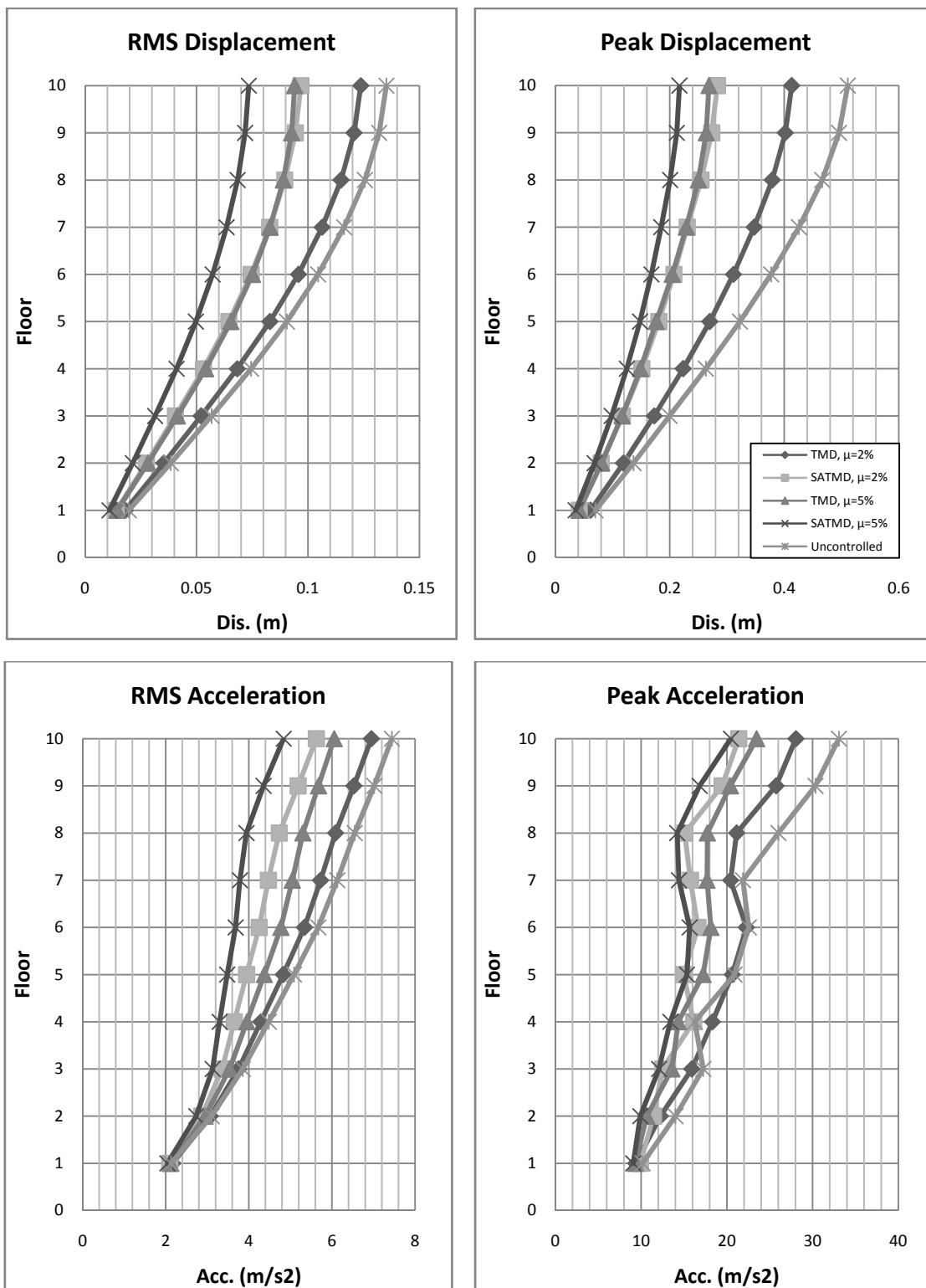
شکل ۷-۲۷ پاسخ‌های جابجایی و شتاب مطلق طبقات سازه کنترل‌نشده و کنترل‌شده توسط میراگرهای جرمی تنظیم شده با نسبت‌های جرمی ۲٪ و ۵٪ و نسبت میرایی ۰٪، در زمین‌لرزه Northridge



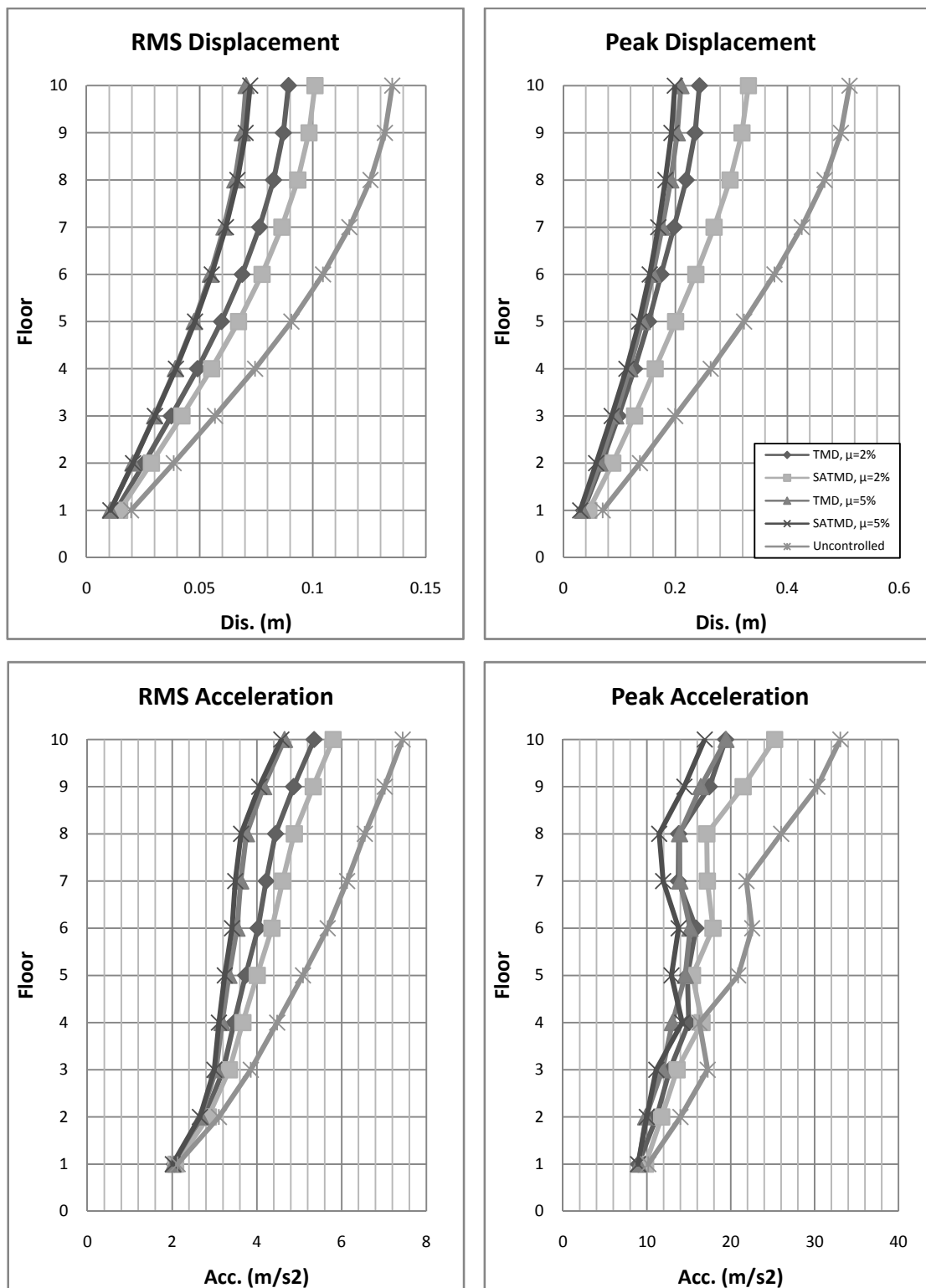
شکل ۷-۲۸ پاسخ‌های جابجایی و شتاب مطلق طبقات سازه کنترل‌نشده و کنترل‌شده توسط میراگرهای جرمی تنظیم شده با نسبت‌های جرمی ۲٪ و ۵٪ و نسبت میرایی ۵٪، در زمین‌لرزه Northridge



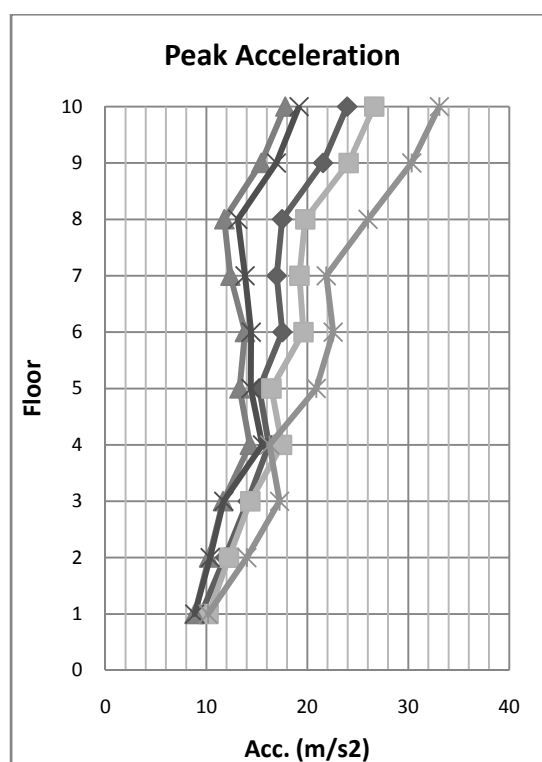
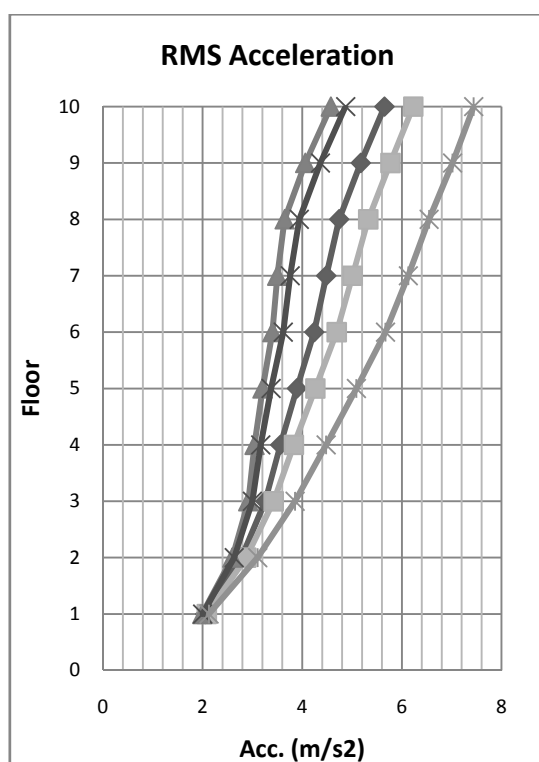
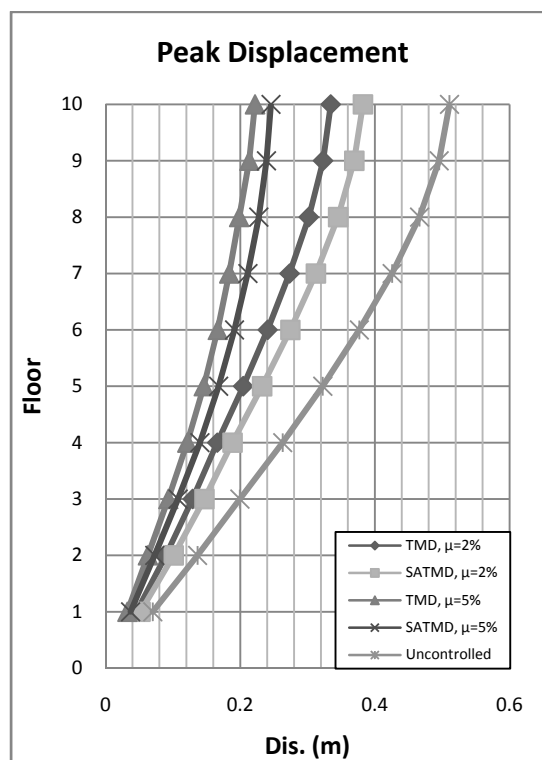
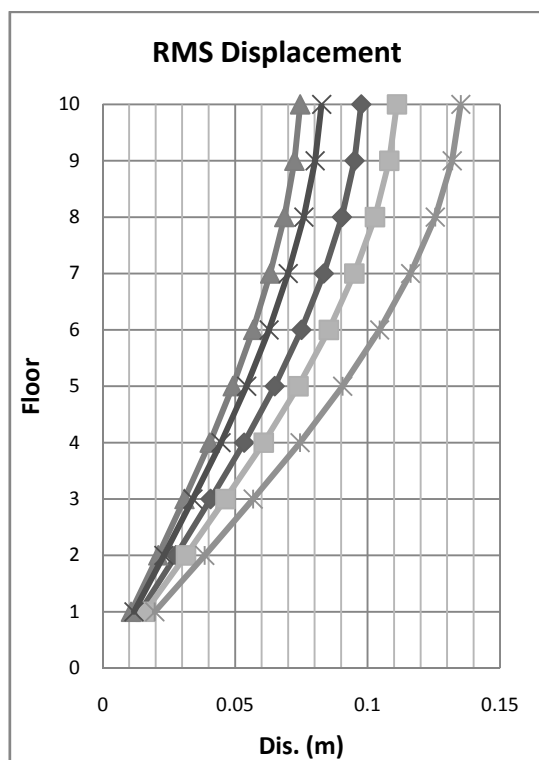
شکل ۷-۲۹ پاسخ‌های جابجایی و شتاب مطلق طبقات سازه کنترل‌نشده و کنترل‌شده توسط میراگرهای جرمی تنظیم شده با نسبت‌های جرمی ۲٪ و ۵٪ و نسبت میرایی ۱۰٪، در زمین‌لرزه Northridge



شکل ۷-۳۰ پاسخ‌های جابجایی و شتاب مطلق طبقات سازه کنترل نشده و کنترل شده توسط میراگرهای جرمی تنظیم شده با نسبت‌های جرمی ۲٪ و ۵٪ و نسبت میرایی ۰٪، در زمین لرزه طیس



شکل ۷-۳۱ پاسخ‌های جابجایی و شتاب مطلق طبقات سازه کنترل‌نشده و کنترل‌شده توسط میراگرهای جرمی تنظیم شده با نسبت‌های جرمی ۲٪ و ۵٪ و نسبت میرائی ۵٪، در زمین‌لرزه طیس



شکل ۷-۳۲ پاسخ‌های جابجایی و شتاب مطلق طبقات سازه کنترل نشده و کنترل شده توسط میراگرهای جرمی تنظیم شده با نسبت‌های جرمی ۲٪ و ۵٪ و نسبت میرایی ۱۰٪، در زمین‌لرزه طیس

در جدول ۳-۷ و جدول ۴-۷ معیارهای عملکرد میراگرهای جرمی تنظیم شده غیرفعال و نیمه‌فعال با نسبت‌های جرمی ۱۰٪ و ۱۵٪، به ترتیب در زمین‌لرزه‌های حوزه-دور و حوزه-نزدیک، مقایسه شده است. در این زمین‌لرزه‌ها، در نسبت میرائی ۰٪، میراگر جرمی نیمه‌فعال در مقایسه با میراگر جرمی غیرفعال، عملکرد بهتری دارد. در نسبت میرائی ۵٪، در زمین‌لرزه El Centro و طبس میراگر جرمی نیمه‌فعال نسبت به میراگر جرمی غیرفعال عملکرد مطلوب‌تر، و در زمین‌لرزه‌های Hachinohe و Northridge میراگر جرمی نیمه‌فعال در کاهش پاسخ‌های RMS و میراگر جرمی غیرفعال در کاهش پاسخ‌های اوج، عملکرد مطلوب‌تری نسبت به دیگری دارند. در نسبت میرائی ۱۰٪ و در نسبت جرمی ۱۰٪، در زمین‌لرزه El Centro، میراگر جرمی نیمه‌فعال در کاهش پاسخ‌های اوج شتاب عملکرد مطلوب‌تر، و در نسبت جرمی ۱۵٪، در مقایسه با میراگر جرمی غیرفعال، نسبتاً عملکرد مطلوب‌تری دارد. در این نسبت میرائی، در زمین‌لرزه Hachinohe، میراگرهای جرمی نیمه‌فعال در کاهش پاسخ‌های RMS جابجایی عملکرد مطلوب‌تر، و در زمین‌لرزه Northridge میراگر جرمی نیمه‌فعال در کاهش پاسخ‌های RMS و میراگر جرمی غیرفعال در کاهش پاسخ‌های اوج، عملکرد مطلوب‌تری دارند. همچنین، در زمین‌لرزه طبس، میراگر جرمی نیمه‌فعال در کاهش پاسخ‌های شتاب مطلق سازه، تأثیر مطلوب‌تری دارد.

در شکل ۳۳-۷ تا شکل ۴۴-۷ پاسخ‌های جابجایی و شتاب مطلق طبقات سازه کنترل‌نشده و کنترل‌شده توسط میراگرهای جرمی با نسبت جرمی ۱۰٪ و ۱۵٪ و در سه نسبت میرائی ۰٪، ۵٪ و ۱۰٪، در نسبت فرکانسی ۱/۰ نشان داده شده‌اند.

در شکل ۳۳-۷ تا شکل ۳۵-۷ نتایج پاسخ‌های سازه در زمین‌لرزه El Centro نشان داده شده است. در نسبت‌های میرائی ۰٪ و ۵٪، میراگرهای جرمی نیمه‌فعال نسبت به میراگرهای جرمی غیرفعال، عملکرد بالاتری دارند. در نسبت میرائی ۱۰٪ و نسبت جرمی ۱۰٪، میراگر جرمی نیمه‌فعال تنها در کاهش پاسخ‌های اوج شتاب مطلق طبقات نسبت به میراگر جرمی غیرفعال عملکرد بالاتری

دارد، و در نسبت جرمی ۱۵٪، میراگر جرمی تنظیم شده نیمه فعال عملکرد مطلوب تری را نشان می دهد.

در شکل ۷-۳۶ تا شکل ۷-۳۸ پاسخ های سازه در زمین لرزه Hachinohe نشان داده شده است. در نسبت میرائی ۰٪، میراگرهای جرمی نیمه فعال نسبت به میراگرهای جرمی غیرفعال، عملکرد مطلوب تری نشان می دهند. در این نسبت میرائی، میراگر جرمی نیمه فعال با نسبت جرمی ۱۰٪، در کاهش پاسخ های RMS جابجایی و میراگر جرمی نیمه فعال با نسبت جرمی ۱۵٪، در کاهش پاسخ های اوج جابجایی، بهترین عملکرد را نشان می دهند. میراگرهای جرمی نیمه فعال نسبت به میراگرهای جرمی غیرفعال، در کاهش پاسخ های شتاب مطلق سازه، عملکرد مطلوب تری دارد. با افزایش نسبت میرائی، میراگرهای جرمی غیرفعال عملکرد بهتری در کاهش پاسخ های اوج نشان می دهند، اما در کاهش پاسخ های RMS میراگرهای جرمی نیمه فعال عملکرد بهتری دارند.

نتایج مربوط به زمین لرزه Northridge در شکل ۷-۳۹ تا شکل ۷-۴۱ نشان داده شده است. در نسبت میرائی ۰٪، میراگرهای جرمی نیمه فعال در کاهش پاسخ های سازه عملکرد بهتری دارند. در این نسبت میرائی، عملکرد تمام میراگرهای جرمی در کاهش پاسخ RMS جابجایی و همچنین عملکرد میراگرهای جرمی غیرفعال در کاهش پاسخ های RMS شتاب مطلق طبقات، منفی می باشد. میراگرهای جرمی غیرفعال و نیمه فعال در کاهش پاسخ های اوج شتاب مطلق طبقات عملکرد تقریباً یکسانی دارند. افزایش نسبت میرائی، عملکرد میراگرهای جرمی در کاهش پاسخ RMS جابجایی و شتاب مطلق را بهبود داده است، اما در کاهش پاسخ های اوج سازه تأثیر محسوسی نداشته است. میراگر جرمی غیرفعال در مقایسه با میراگر جرمی نیمه فعال در کاهش پاسخ های اوج جابجایی، نسبتاً، عملکرد مطلوب تری دارند. همچنین، در تمام نسبت های میرائی، افزایش نسبت جرمی میراگر باعث کاهش عملکرد میراگر جرمی در کاهش پاسخ های RMS جابجایی و شتاب مطلق سازه شده است.

در شکل ۷-۴۲ تا شکل ۷-۴۴ نتایج مربوط به زمین لرزه طبس نشان داده شده است.

میراگرهای جرمی عملکرد بالایی در کاهش پاسخ‌ها در این زمین‌لرزه نشان می‌دهند و باعث کاهش پاسخ جابجایی سازه در حدود ۵۰٪ تا ۷۰٪ شده‌اند. در نسبت‌های میرائی ۰٪ و ۵٪، میراگرهای جرمی نیمه‌فعال نسبت به میراگرهای جرمی غیرفعال، عملکرد مطلوب‌تری در کاهش پاسخ جابجایی و شتاب مطلق سازه نشان می‌دهند. افزایش نسبت میرائی عملکرد میراگرهای جرمی غیرفعال را بهبود داده است. در نسبت میرائی ۱۰٪ و نسبت جرمی ۱۰٪، میراگرهای جرمی تنظیم شده نیمه‌فعال در کاهش پاسخ‌های RMS و میراگر جرمی تنظیم شده غیرفعال در کاهش پاسخ‌های اوج عملکرد بهتری دارد، و در نسبت جرمی ۱۵٪، میراگر جرمی نیمه‌فعال نسبت به میراگر جرمی غیرفعال عملکرد بهتری در کاهش پاسخ‌های سازه نشان می‌دهد.

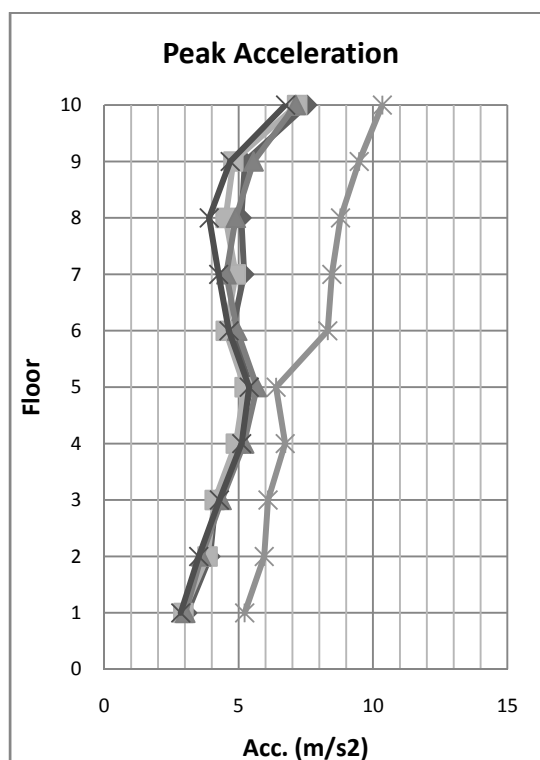
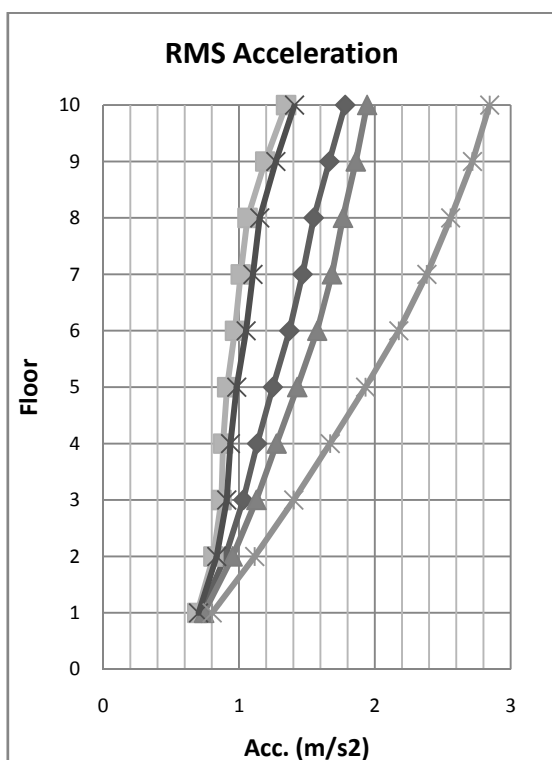
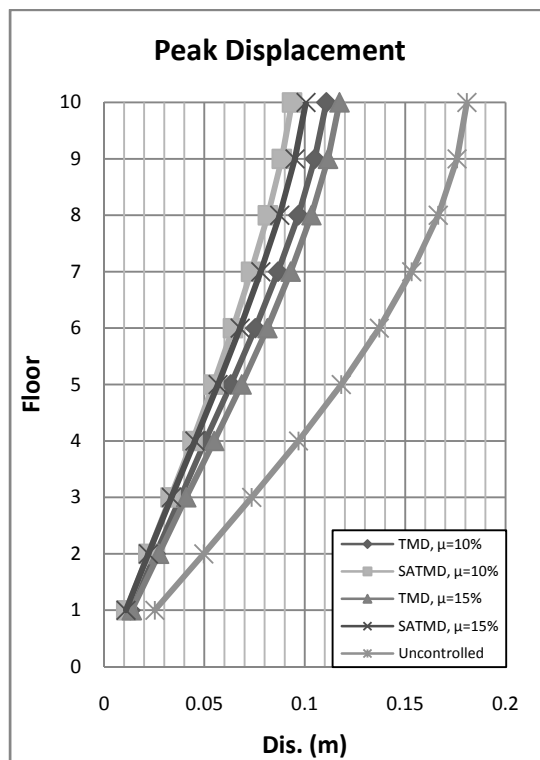
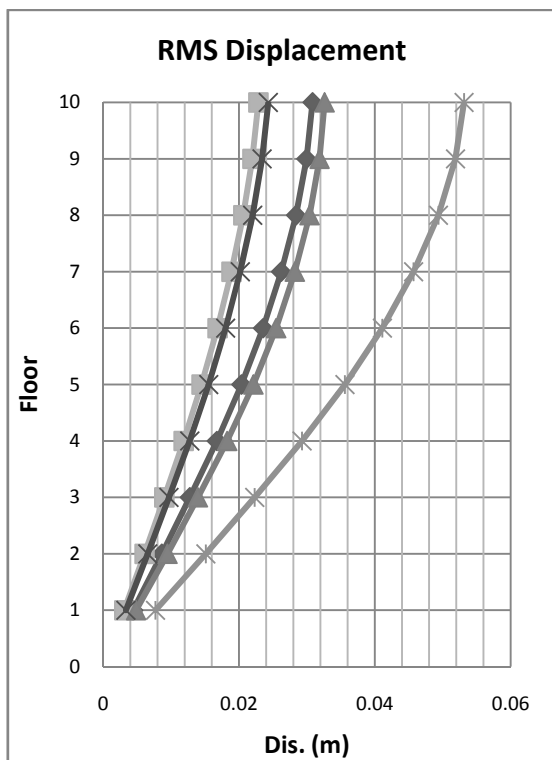
جدول ۳-۷ معیارهای عملکرد میز آگرهای جرمی تنظیم شده غیرفعال و نیمه‌فعال با نسبت‌های جرمی ۱۰٪ و ۱۵٪ در زمین‌لرزه‌های El Centro و Hachinohe

0%						XId						10%					
Mu						Mu						Mu					
10%		15%				10%		15%				10%		15%			
TMD	SATMD	TMD	SATMD	TMD	SATMD	TMD	SATMD	TMD	SATMD	TMD	SATMD	TMD	SATMD	TMD	SATMD		
J1	0.620	0.468	0.676	0.490	0.481	0.463	0.481	0.481	0.444	0.461	0.478	0.443	0.432	0.443	0.432		
J2	0.064	0.047	0.071	0.050	0.049	0.046	0.049	0.049	0.045	0.046	0.048	0.045	0.043	0.045	0.043		
J3	0.574	0.426	0.607	0.453	0.428	0.423	0.439	0.439	0.409	0.412	0.447	0.404	0.403	0.404	0.403		
J4	0.057	0.041	0.061	0.044	0.042	0.041	0.043	0.043	0.039	0.040	0.043	0.039	0.039	0.039	0.039		
J5	1.858	1.232	1.608	1.056	1.312	1.045	1.046	0.864	0.864	1.107	0.917	0.874	0.753	0.874	0.753		
J6	0.715	0.680	0.675	0.639	0.696	0.674	0.651	0.630	0.630	0.683	0.671	0.635	0.624	0.635	0.624		
J7	0.070	0.066	0.069	0.064	0.068	0.066	0.064	0.062	0.062	0.067	0.066	0.063	0.061	0.063	0.061		
J8	0.613	0.518	0.649	0.557	0.505	0.506	0.530	0.495	0.495	0.486	0.525	0.476	0.473	0.476	0.473		
J9	0.057	0.049	0.061	0.052	0.047	0.048	0.049	0.046	0.046	0.046	0.051	0.045	0.045	0.045	0.045		
J10	1.665	1.270	1.291	1.023	1.318	1.091	1.015	0.864	0.864	1.132	0.953	0.863	0.790	0.863	0.790		
El Centro						Hachinohe											
J1	0.968	0.748	0.929	0.735	0.757	0.692	0.699	0.653	0.653	0.680	0.686	0.630	0.633	0.630	0.633		
J2	0.094	0.074	0.090	0.072	0.074	0.069	0.068	0.064	0.064	0.068	0.069	0.062	0.063	0.062	0.063		
J3	1.269	0.917	1.261	0.971	0.947	0.812	0.928	0.832	0.832	0.812	0.782	0.805	0.782	0.805	0.782		
J4	0.121	0.088	0.119	0.092	0.091	0.078	0.088	0.079	0.079	0.078	0.076	0.076	0.075	0.076	0.075		
J5	3.535	2.276	2.791	2.053	2.520	1.752	2.001	1.618	1.618	1.955	1.436	1.625	1.360	1.625	1.360		
J6	0.757	0.838	0.713	0.758	0.777	0.842	0.725	0.767	0.767	0.793	0.847	0.737	0.773	0.737	0.773		
J7	0.082	0.085	0.076	0.078	0.081	0.085	0.076	0.078	0.078	0.081	0.085	0.076	0.078	0.076	0.078		
J8	1.170	0.841	0.847	0.753	0.868	0.861	0.735	0.781	0.781	0.800	0.879	0.762	0.803	0.762	0.803		
J9	0.115	0.083	0.084	0.072	0.086	0.084	0.071	0.075	0.075	0.078	0.085	0.073	0.077	0.073	0.077		
J10	3.020	1.979	2.150	1.689	1.978	1.632	1.572	1.408	1.408	1.604	1.381	1.340	1.204	1.340	1.204		
Earthquake Record																	

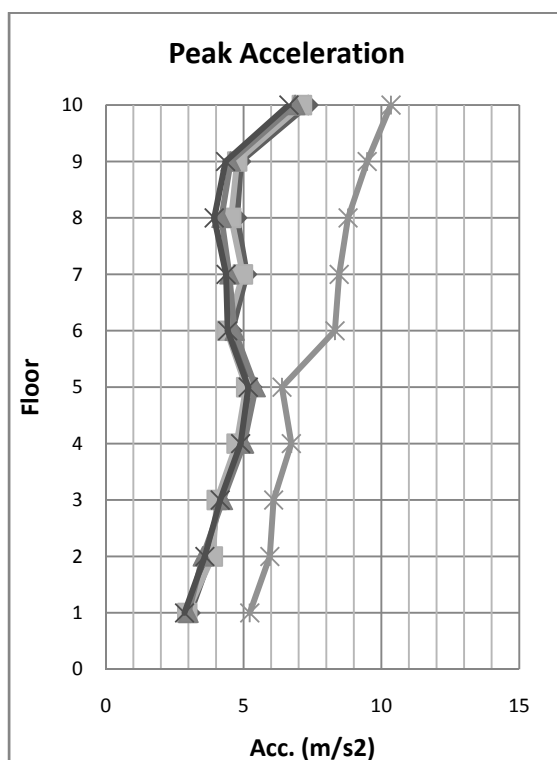
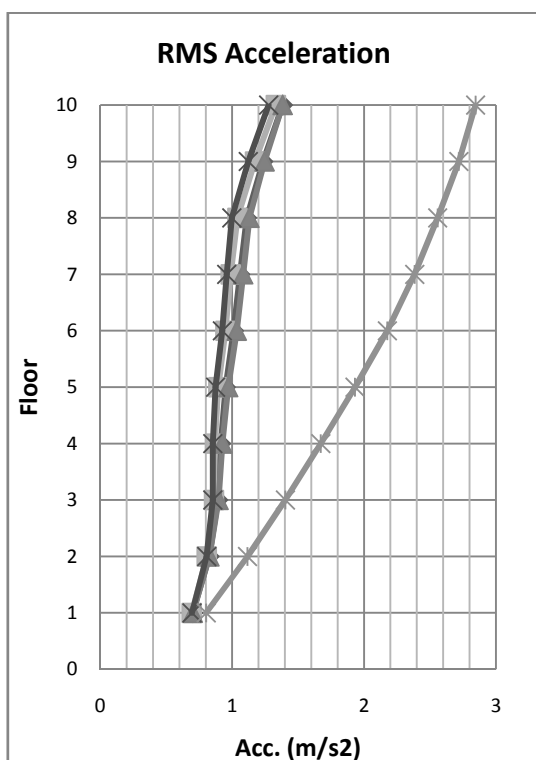
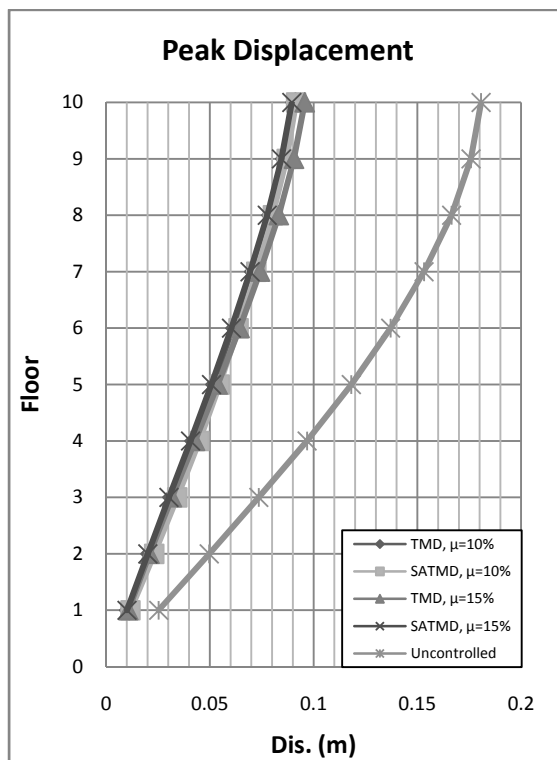
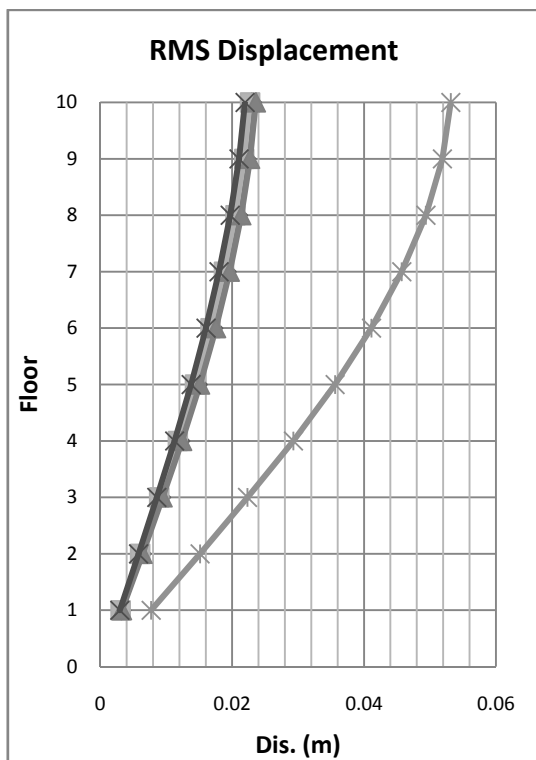
جدول ۴-۷ معیارهای عملکرد میراگرهای جرمی تنظیم شده غیرفعال و نیمه‌فعال با نسبت‌های جرمی ۱۰٪ و ۱۵٪ در زمین‌لرزه‌های Northridge و طیس

		0%					Xld					5%					10%				
		Mu					Mu					Mu					Mu				
		10%		15%			10%		15%			10%		15%			10%		15%		
		TMD	SATMD	TMD	SATMD	TMD	SATMD	TMD	SATMD	TMD	SATMD	TMD	SATMD	TMD	SATMD	TMD	SATMD	TMD	SATMD		
Northridge		J1	1.103	0.936	1.173	0.984	0.899	0.861	0.918	0.866	0.838	0.831	0.831	0.831	0.831	0.831	0.831	0.831	0.831	0.815	
		J2	0.110	0.094	0.114	0.097	0.091	0.087	0.091	0.087	0.085	0.084	0.084	0.084	0.084	0.084	0.084	0.084	0.084	0.082	
		J3	1.406	1.093	1.793	1.367	1.044	0.952	1.239	1.102	0.927	0.902	0.902	0.902	0.902	0.902	0.902	0.902	0.902	0.992	
		J4	0.137	0.106	0.171	0.131	0.102	0.093	0.119	0.106	0.090	0.088	0.088	0.088	0.088	0.088	0.088	0.088	0.100	0.096	
		J5	3.789	2.596	3.700	2.662	2.495	1.936	2.398	1.956	1.935	1.576	1.576	1.576	1.576	1.576	1.576	1.844	1.585		
		J6	0.897	0.896	0.848	0.848	0.885	0.888	0.835	0.837	0.877	0.882	0.882	0.882	0.882	0.882	0.882	0.825	0.828		
		J7	0.088	0.089	0.083	0.084	0.087	0.089	0.082	0.084	0.087	0.089	0.089	0.089	0.089	0.089	0.089	0.082	0.083		
		J8	0.810	0.828	0.873	0.820	0.821	0.838	0.795	0.828	0.831	0.847	0.847	0.847	0.847	0.847	0.847	0.805	0.835		
		J9	0.081	0.083	0.086	0.079	0.082	0.085	0.077	0.080	0.083	0.086	0.086	0.086	0.086	0.086	0.086	0.079	0.082		
		J10	2.535	1.925	1.707	1.584	1.771	1.559	1.411	1.350	1.473	1.321	1.321	1.321	1.321	1.321	1.321	1.252	1.204		
Tabas		J1	0.968	0.661	0.725	0.572	0.575	0.520	0.485	0.512	0.504	0.504	0.504	0.504	0.504	0.504	0.473	0.462			
		J2	0.103	0.070	0.079	0.062	0.060	0.054	0.055	0.051	0.053	0.051	0.051	0.051	0.051	0.051	0.049	0.047			
		J3	0.789	0.529	0.562	0.457	0.459	0.421	0.421	0.401	0.418	0.428	0.428	0.428	0.428	0.428	0.396	0.396			
		J4	0.083	0.054	0.059	0.046	0.046	0.042	0.042	0.039	0.041	0.042	0.042	0.042	0.042	0.042	0.039	0.039			
		J5	2.884	1.887	1.849	1.370	1.531	1.235	1.161	0.992	1.168	1.004	1.004	1.004	1.004	1.004	0.922	0.820			
		J6	0.710	0.600	0.637	0.552	0.567	0.519	0.513	0.483	0.501	0.472	0.472	0.472	0.472	0.472	0.481	0.452			
		J7	0.080	0.067	0.074	0.063	0.061	0.056	0.059	0.055	0.054	0.051	0.051	0.051	0.051	0.051	0.053	0.051			
		J8	0.549	0.395	0.460	0.337	0.347	0.346	0.306	0.304	0.336	0.353	0.353	0.353	0.353	0.353	0.303	0.315			
		J9	0.061	0.045	0.047	0.038	0.038	0.035	0.034	0.032	0.034	0.034	0.035	0.035	0.035	0.035	0.031	0.031			
		J10	2.077	1.500	1.341	1.053	1.113	0.934	0.860	0.792	0.865	0.779	0.779	0.779	0.779	0.779	0.719	0.665			

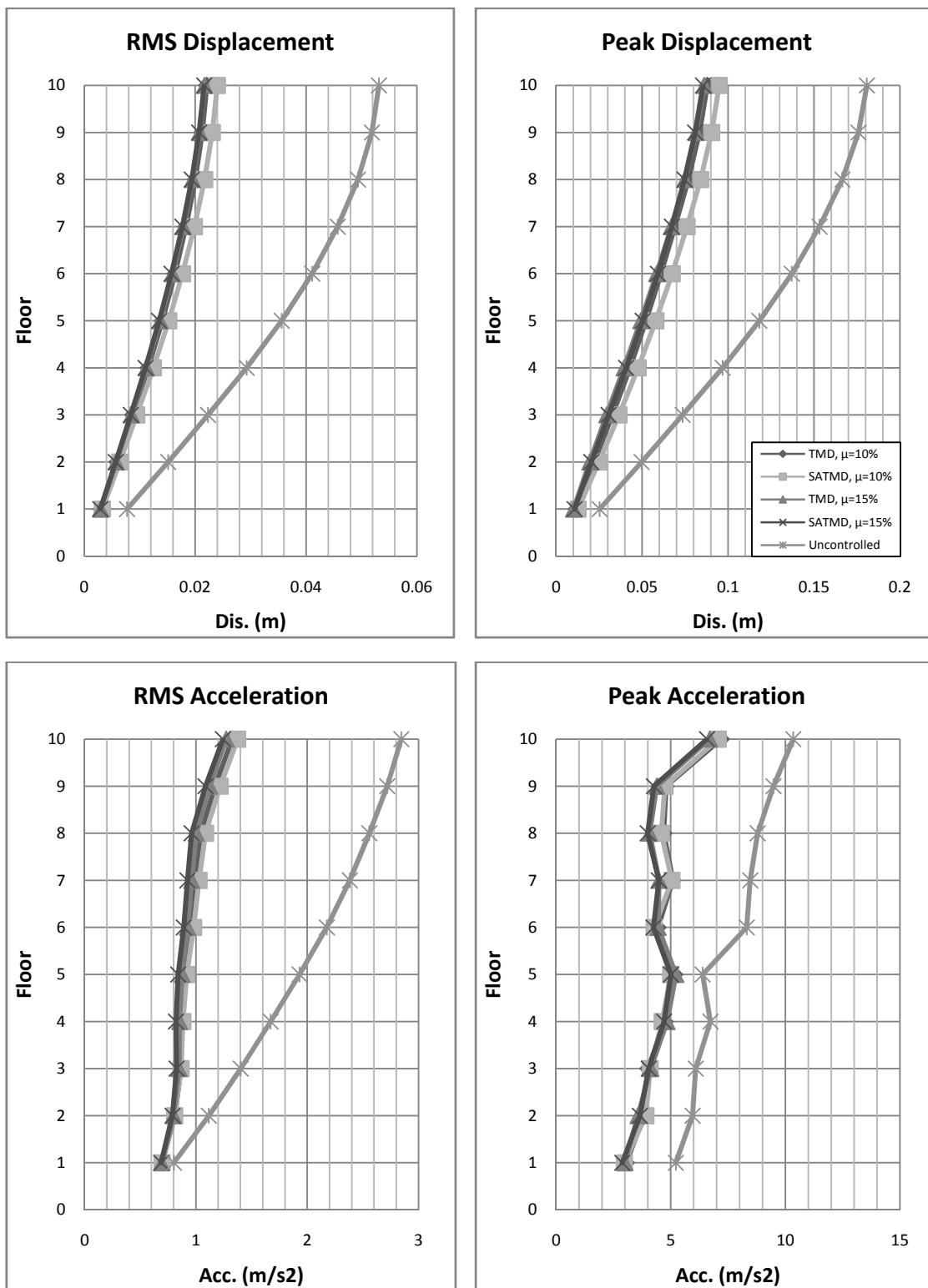
Earthquake Record



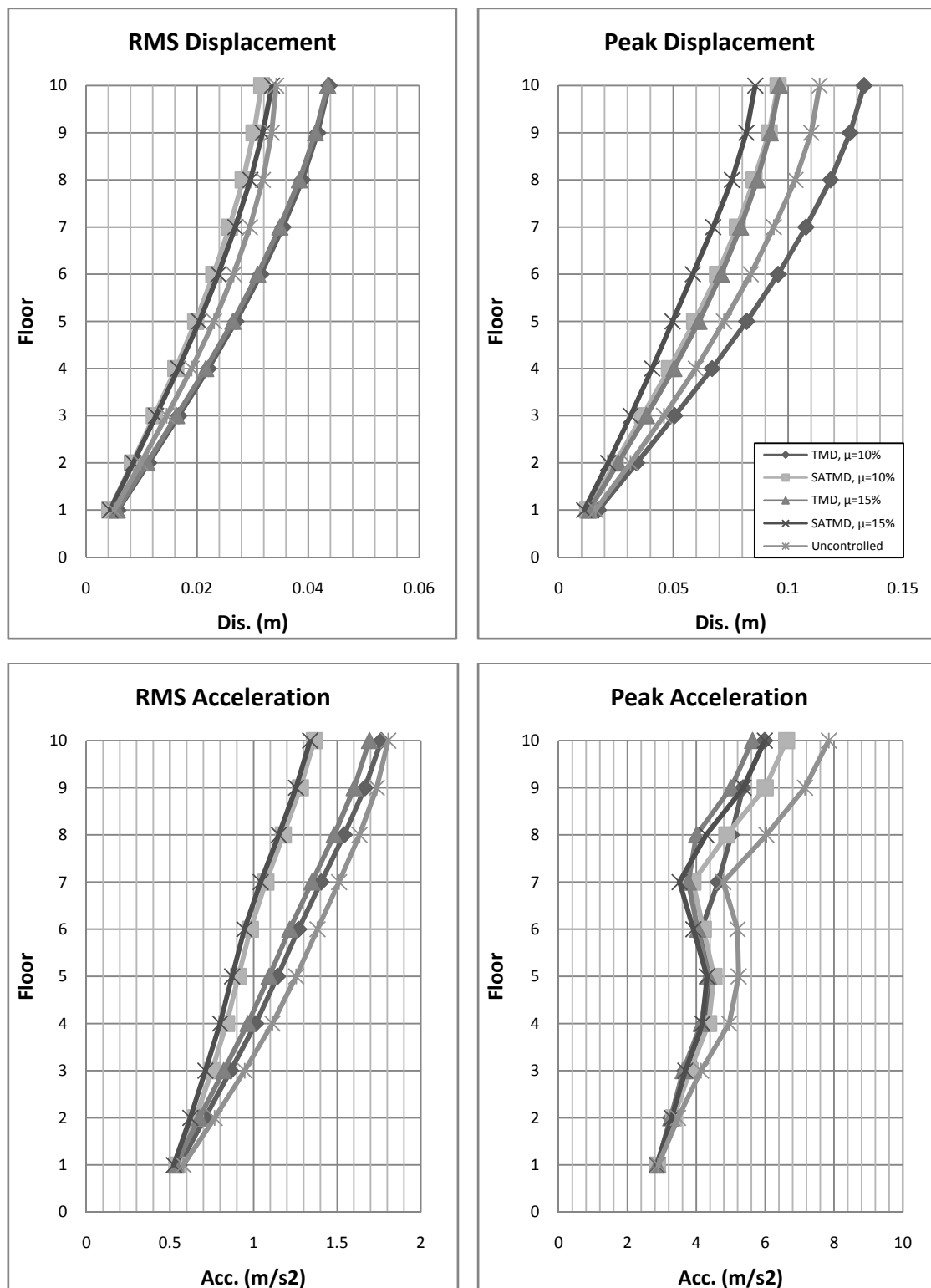
شکل ۷-۳۳ پاسخ‌های جابجایی و شتاب مطلق طبقات سازه کنترل‌نشده و کنترل‌شده توسط میراگرهای جرمی تنظیم شده با نسبت‌های جرمی ۱۰٪ و ۱۵٪ و نسبت میرائی ۰٪، در زمین‌لرزه El Centro



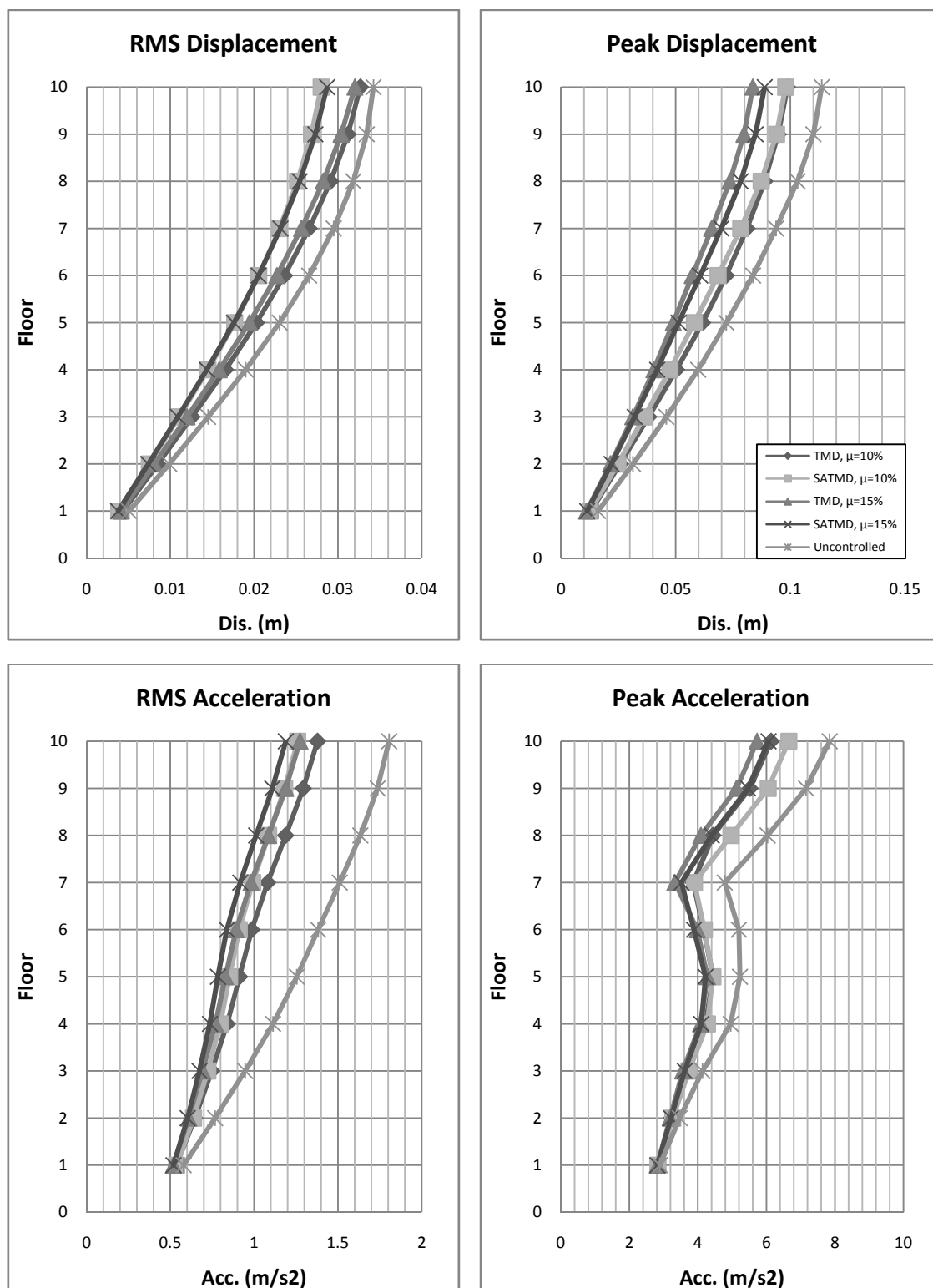
شکل ۷-۳۴ پاسخ‌های جابجایی و شتاب مطلق طبقات سازه کنترل‌نشده و کنترل‌شده توسط میراگرهای جرمی تنظیم شده با نسبت‌های جرمی ۱۰٪ و ۱۵٪ و نسبت میرائی ۵٪، در زمین‌لرزه El Centro



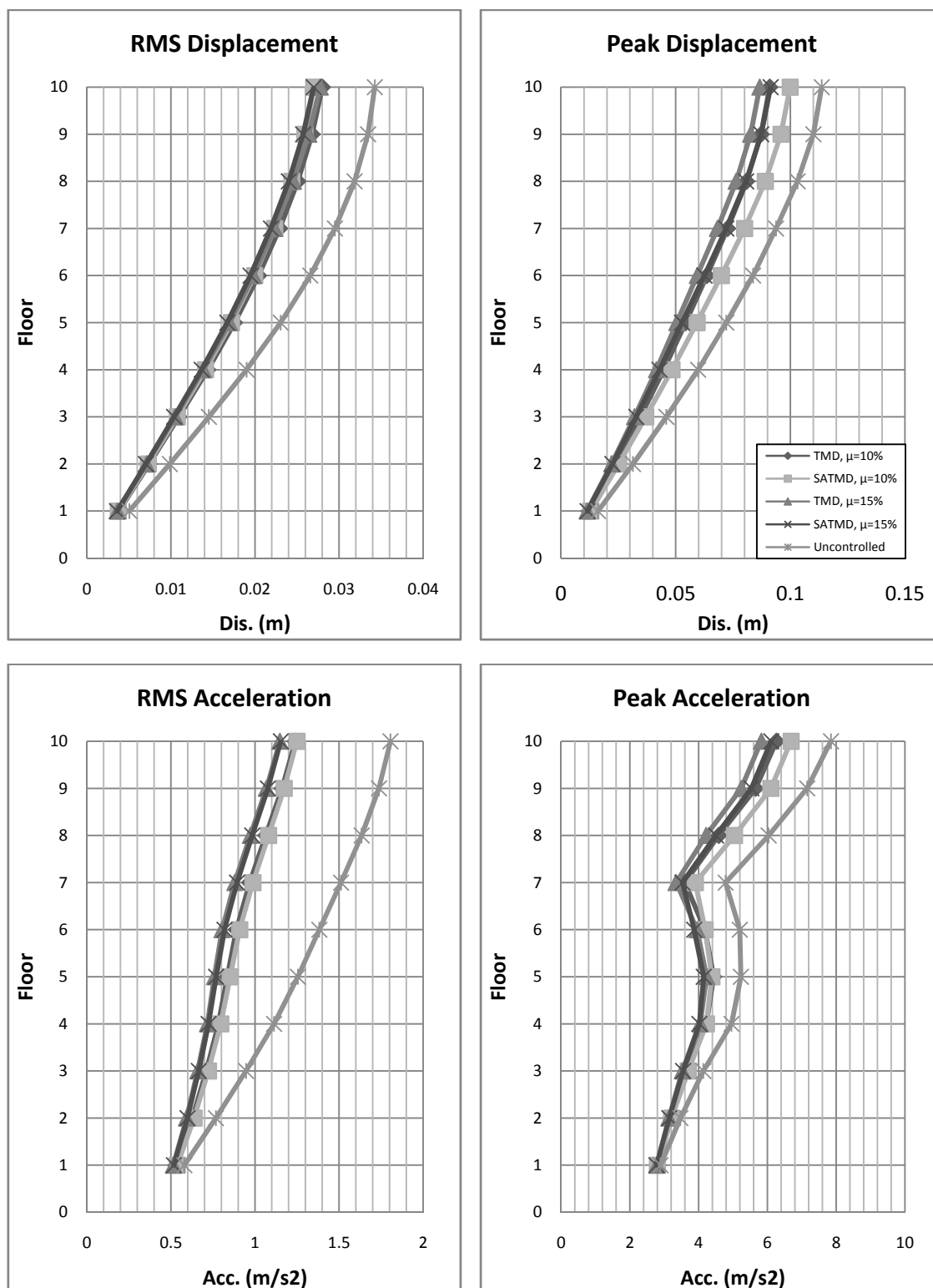
شکل ۷-۳۵ پاسخ‌های جابجایی و شتاب مطلق طبقات سازه کنترل‌نشده و کنترل‌شده توسط میراگرهای جرمی تنظیم شده با نسبت‌های جرمی ۱۰٪ و ۱۵٪ و نسبت میرائی ۱۰٪، در زمین‌لرزه El Centro



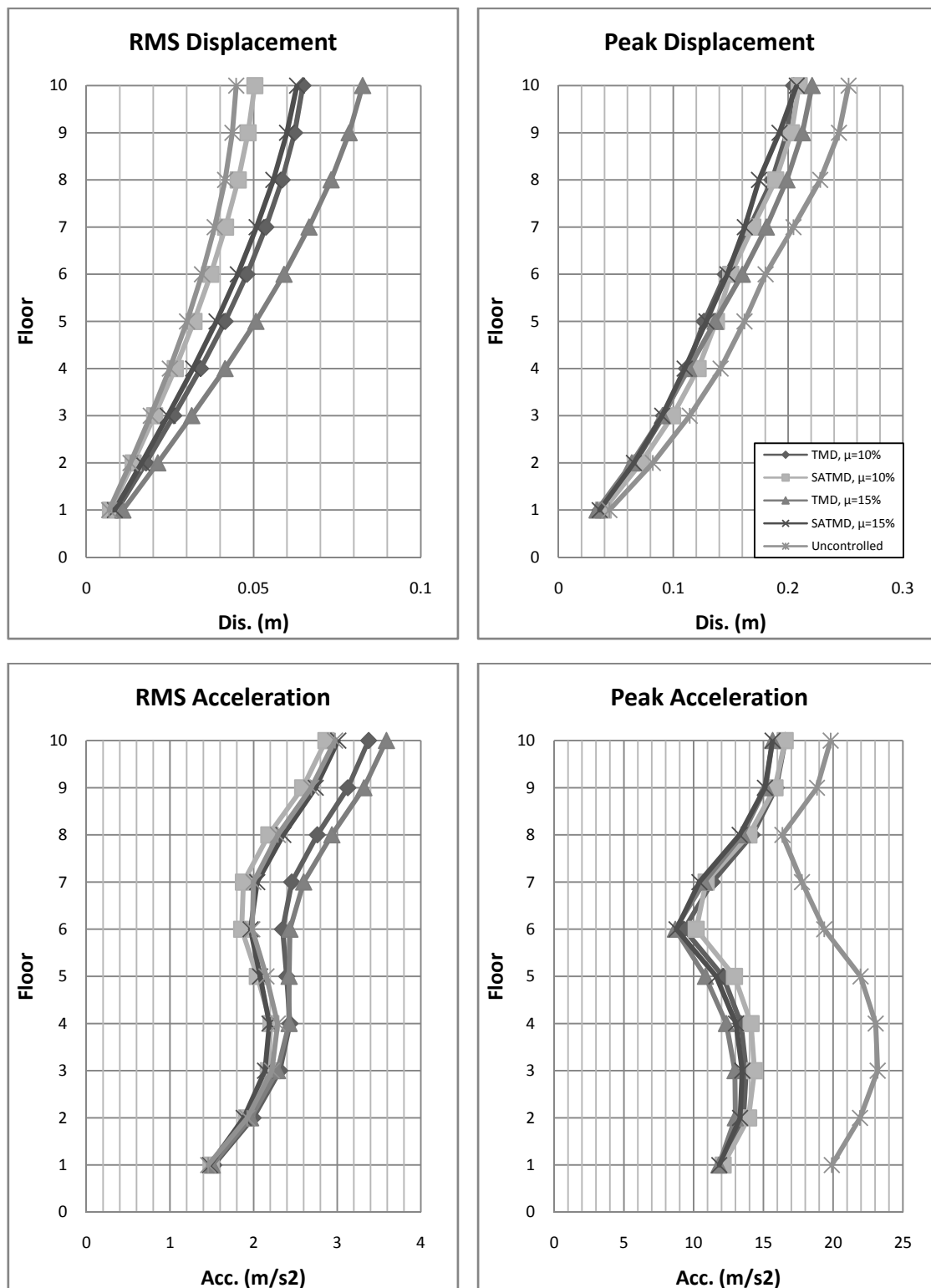
شکل ۳۶-۷ پاسخ‌های جابجایی و شتاب مطلق طبقات سازه کنترل‌نشده و کنترل‌شده توسط میراگرهای جرمی تنظیم شده با نسبت‌های جرمی ۱۰٪ و ۱۵٪ و نسبت میرائی ۰٪، در زمین‌لرزه Hachinohe



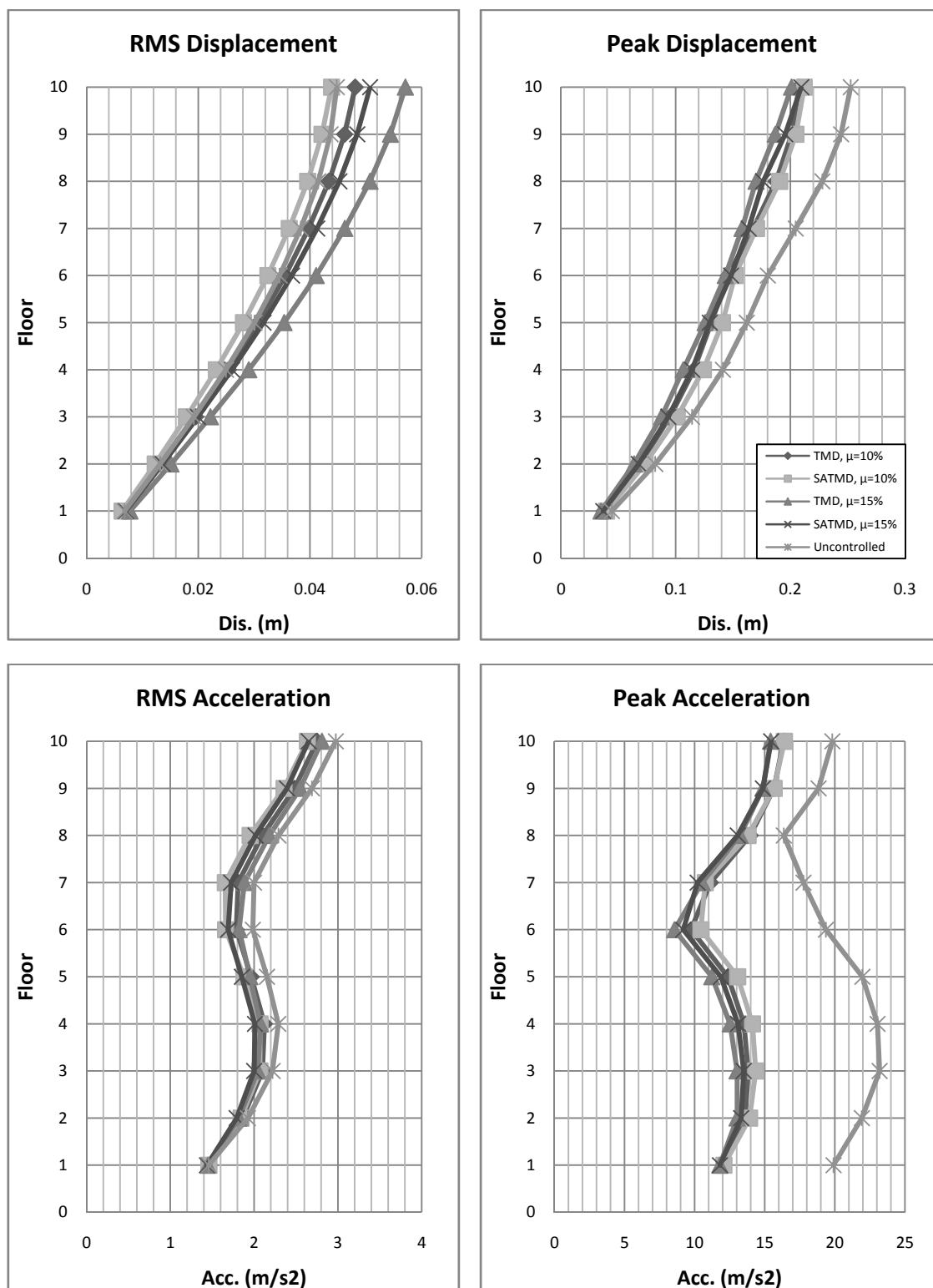
شکل ۷-۳۷ پاسخهای جابجایی و شتاب مطلق طبقات سازه کنترل نشده و کنترل شده توسط میراگرهای جرمی تنظیم شده با نسبت های جرمی ۱۰٪ و ۱۵٪ و نسبت میرائی ۵٪، در زمین لرزه Hachinohe



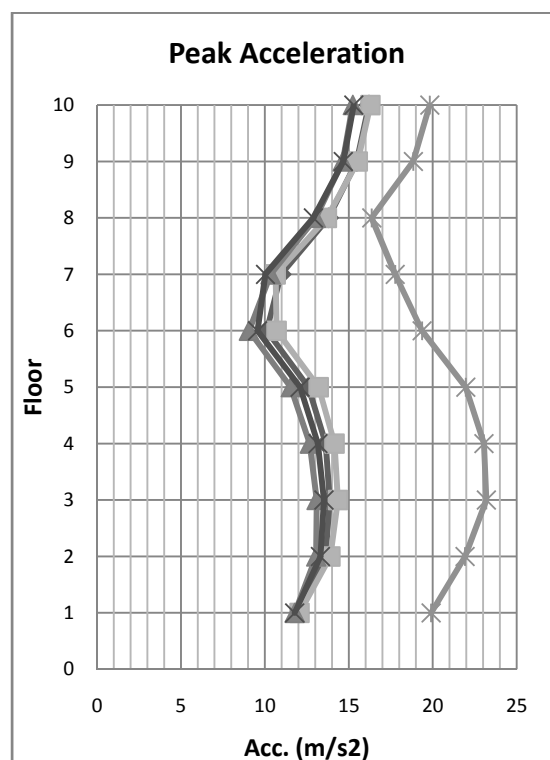
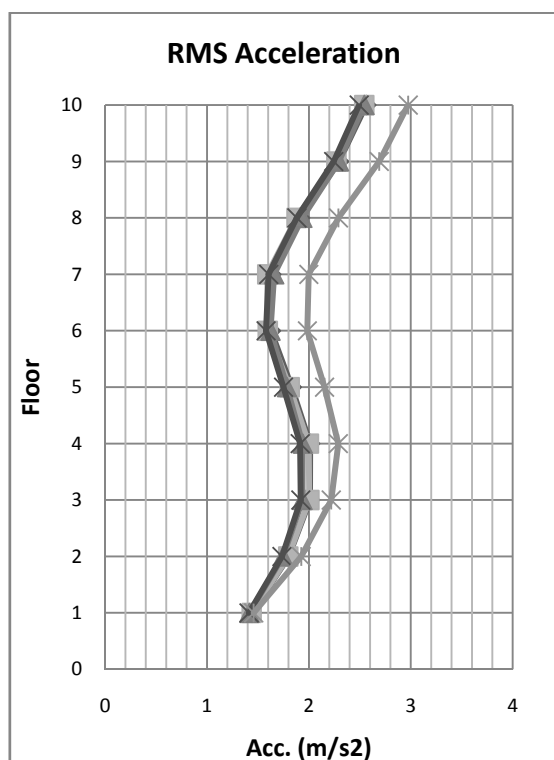
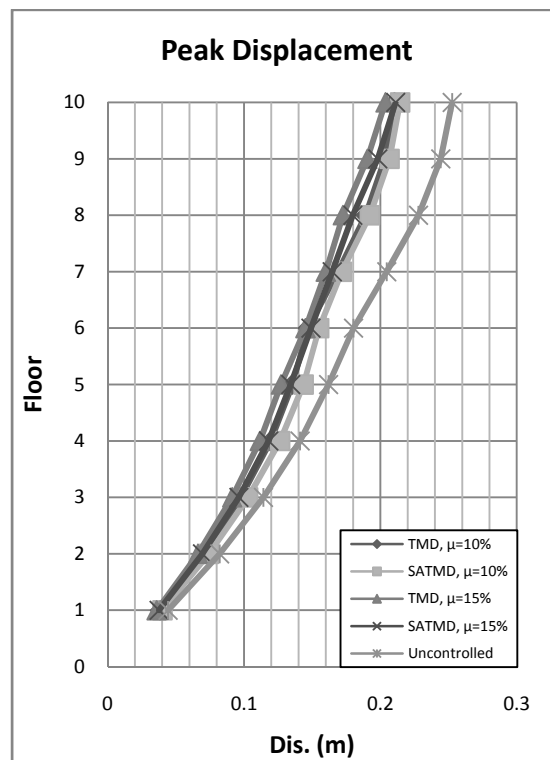
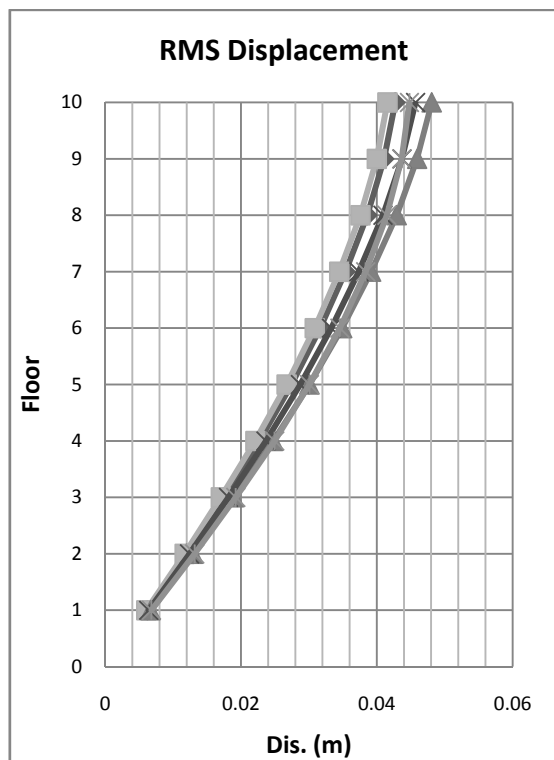
شکل ۷-۳۸ پاسخهای جابجایی و شتاب مطلق طبقات سازه کنترل نشده و کنترل شده توسط میراگرهای جرمی تنظیم شده با نسبت‌های جرمی ۱۰٪ و ۱۵٪ و نسبت میرائی ۱۰٪، در زمین‌لرزه Hachinohe



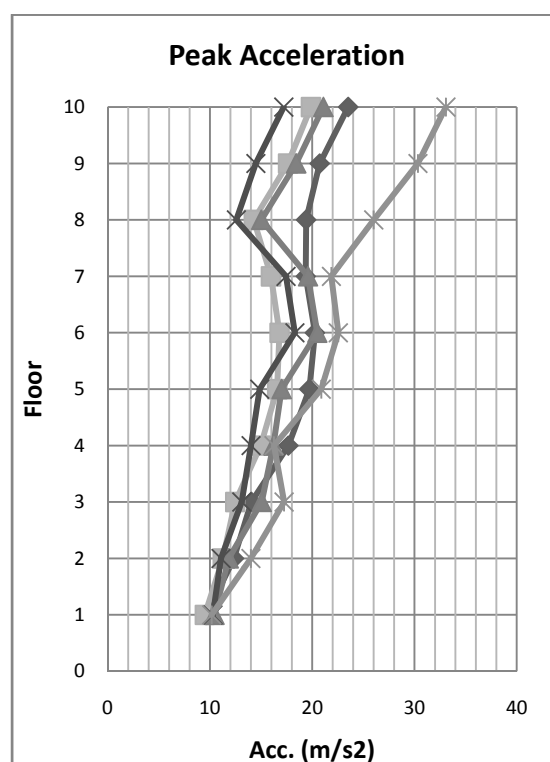
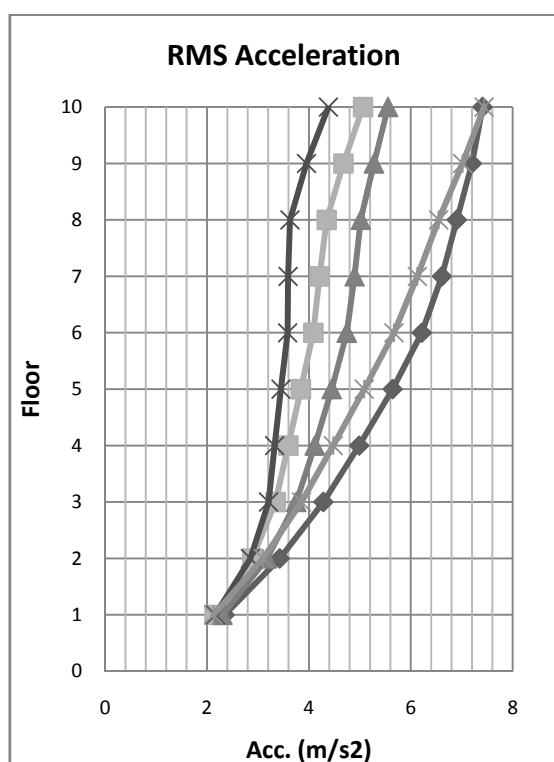
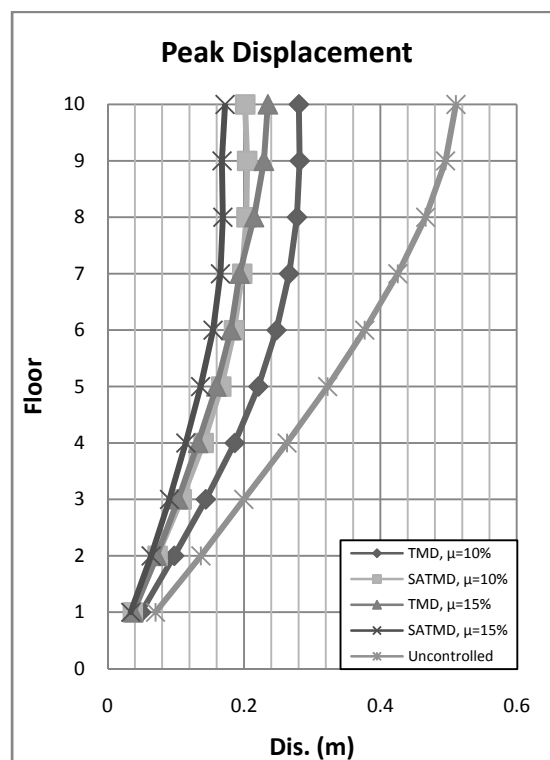
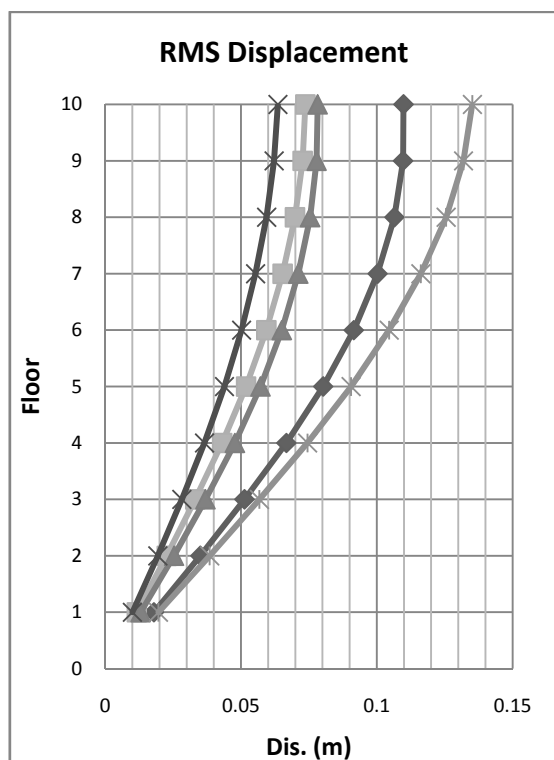
شکل ۷-۳۹ پاسخ‌های جابجایی و شتاب مطلق طبقات سازه کنترل‌نشده و کنترل‌شده توسط میراگرهای جرمی تنظیم شده با نسبت‌های جرمی ۱۰٪ و ۱۵٪ و نسبت میرائی ۰٪، در زمین‌لرزه Northridge



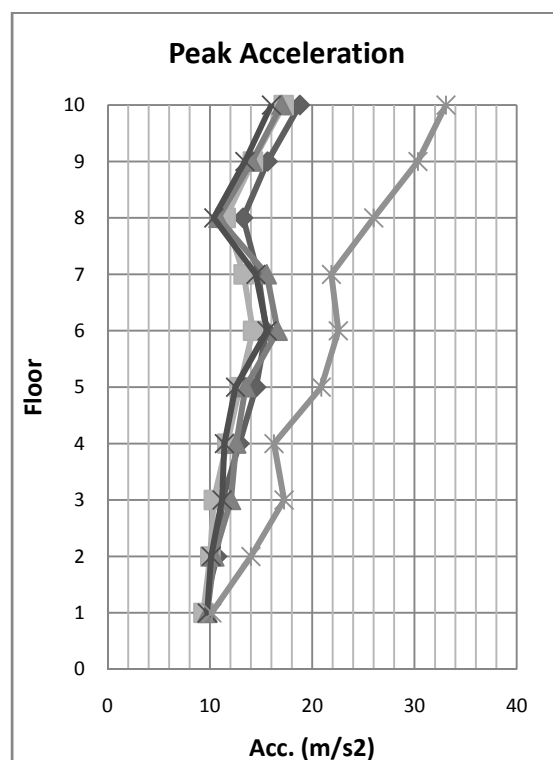
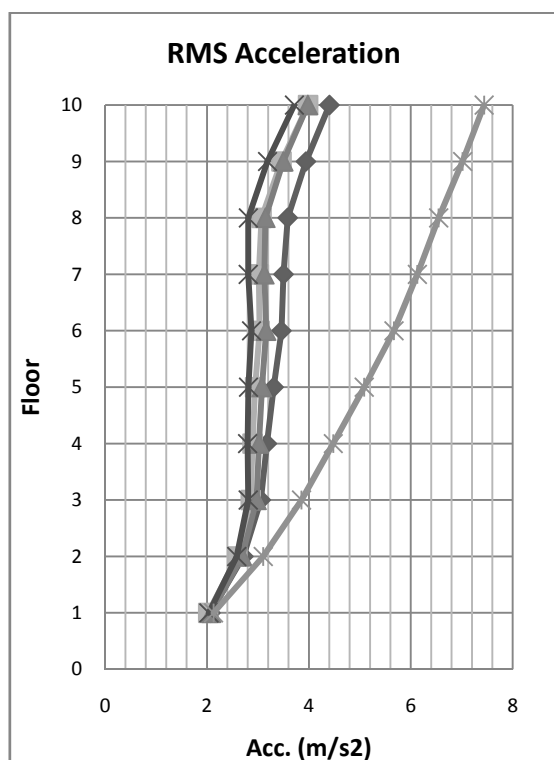
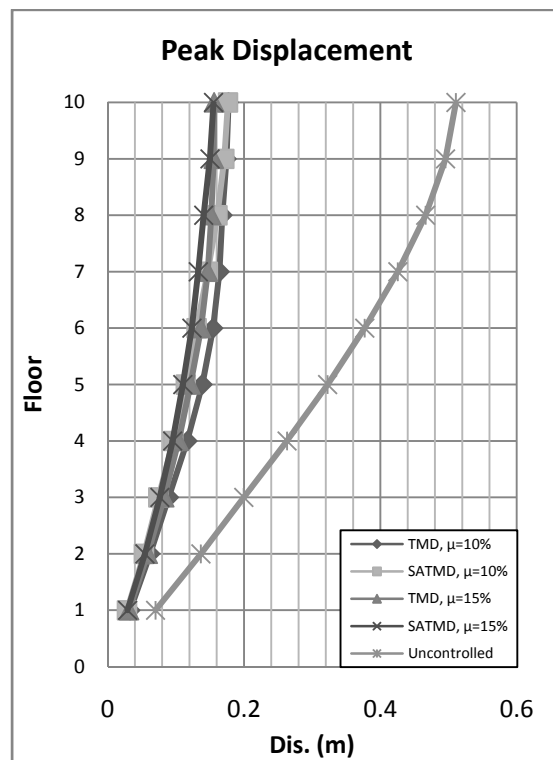
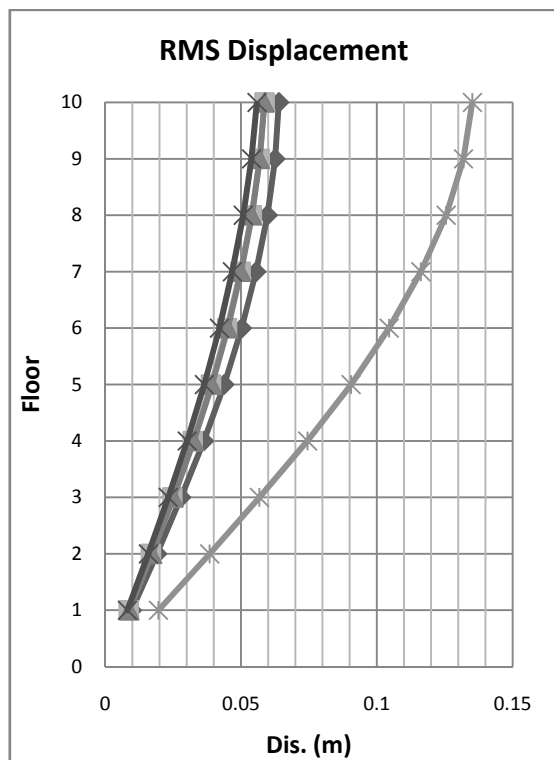
شکل ۷-۴۰ پاسخهای جابجایی و شتاب مطلق طبقات سازه کنترل نشده و کنترل شده توسط میراگرهای جرمی تنظیم شده با نسبت های جرمی ۱۰٪ و ۱۵٪ و نسبت میرائی ۵٪، در زمین لرزه Northridge



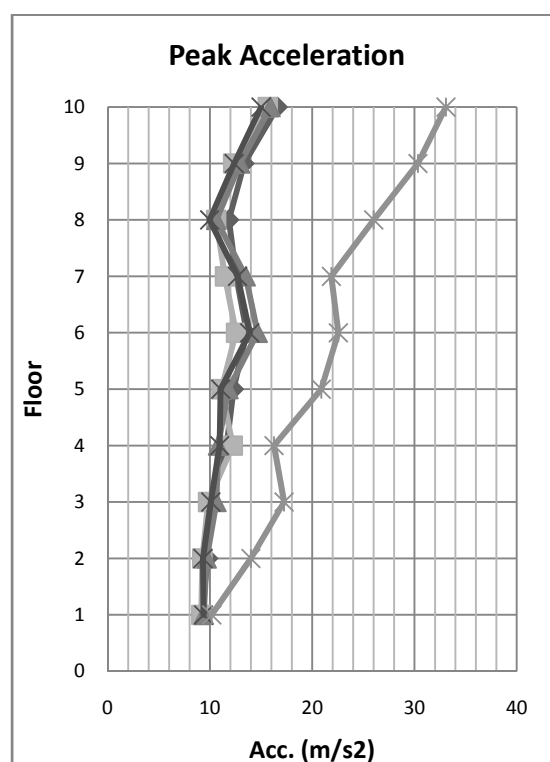
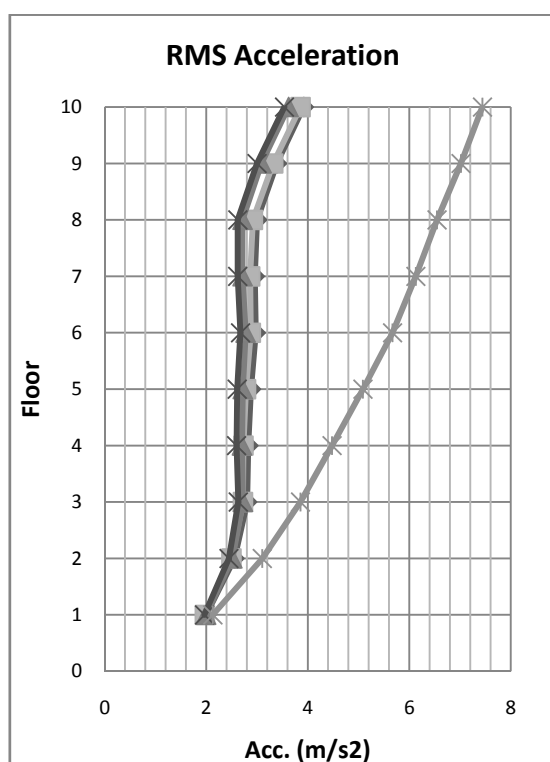
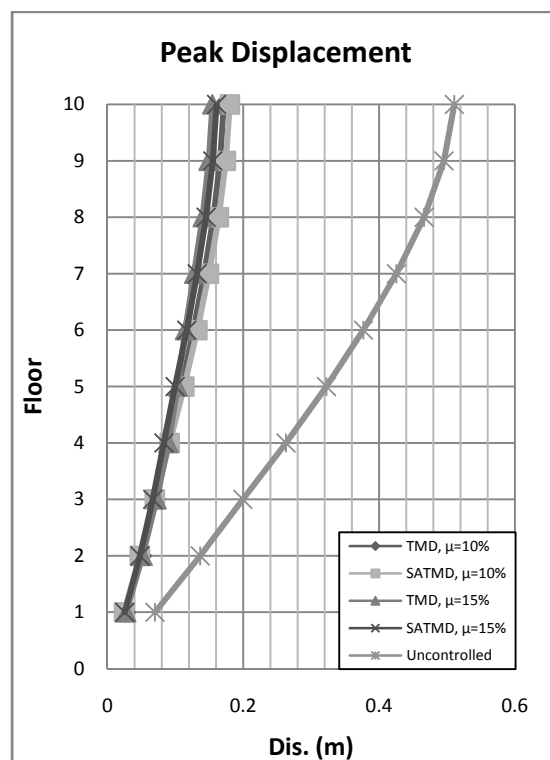
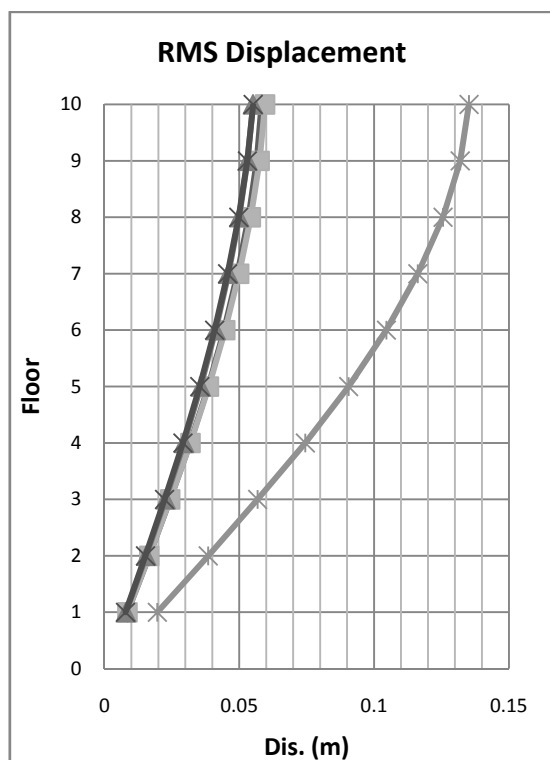
شکل ۷-۴۱ پاسخهای جابجایی و شتاب مطلق طبقات سازه کنترل نشده و کنترل شده توسط میراگرهای جرمی تنظیم شده با نسبت های جرمی ۱۰٪ و ۱۵٪ و نسبت میرائی ۱۰٪، در زمین لرزه Northridge



شکل ۷-۴۲ پاسخ‌های جابجایی و شتاب مطلق طبقات سازه کنترل‌نشده و کنترل‌شده توسط میراگرهای جرمی تنظیم شده با نسبت‌های جرمی ۱۰٪ و ۱۵٪ و نسبت میرائی ۰٪، در زمین‌لرزه طیس



شکل ۷-۴۳ پاسخ‌های جابجایی و شتاب مطلق طبقات سازه کنترل‌نشده و کنترل‌شده توسط میراگرهای جرمی تنظیم شده با نسبت‌های جرمی ۱۰٪ و ۱۵٪ و نسبت میرائی ۵٪، در زمین‌لرزه طیس



شکل ۷-۴۴ پاسخ‌های جابجایی و شتاب مطلق طبقات سازه کنترل‌نشده و کنترل‌شده توسط میراگرهای جرمی تنظیم شده با نسبت‌های جرمی ۱۰٪ و ۱۵٪ و نسبت میرائی ۱۰٪، در زمین‌لرزه طیس

مشاهده شد که با افزایش نسبت میرائی کرائی میراگرهای جرمی غیرفعال و نیمه فعال به هم نزدیک می شود و در نسبت های میرائی بالا، اختلاف عملکرد ناچیزی بین این میراگرهای جرمی وجود دارد. با توجه به اینکه میراگر MR حتی در سطح ولتاژ صفر موجب استهلاک انرژی در سیستم می شود، این استهلاک انرژی در مواردی موجب بهبود عملکرد میراگر جرمی نمی شود. با افزایش نسبت میرائی میراگر جرمی، می توان با کاهش ولتاژ اعمالی به میراگر MR عملکرد آن را نسبت به میراگر جرمی غیرفعال بهبود داد.

با افزایش ولتاژ ورودی، نیروی خروجی میراگر نیمه فعال MR نیز افزایش می یابد. کنترل کننده فازی برای تنظیم ولتاژ اعمالی میراگر نیمه فعال استفاده شده و بازه ولتاژ خروجی کنترل کننده فازی [۲-۱۰] ولت انتخاب شده است. جهت بررسی تغییر ولتاژ ورودی میراگر نیمه فعال بر روی عملکرد میراگر جرمی تنظیم شده نیمه فعال، کران بالای این بازه را تغییر داده و در نسبت های میرائی مختلف درصد کاهش پاسخ سازه را محاسبه و مقایسه می کنیم.

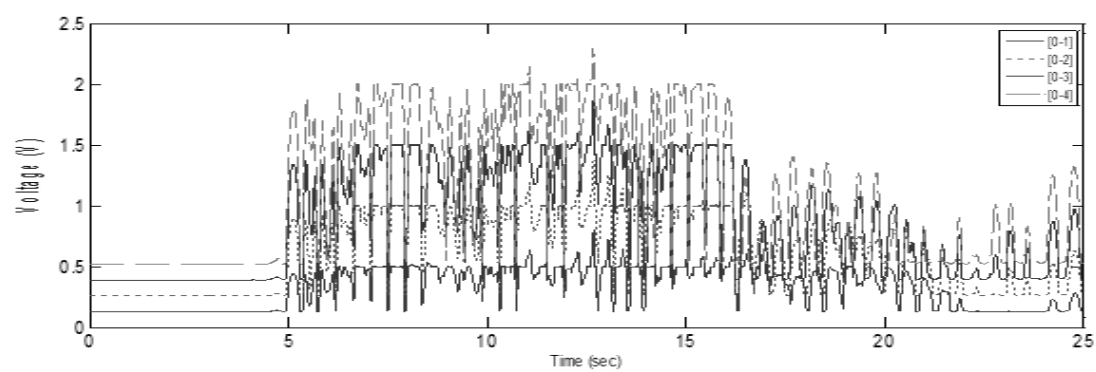
در شکل ۷-۴۵ و شکل ۷-۴۶ به ترتیب خروجی ولتاژ کنترل کننده فازی و نیروی میراگر MR در چهار بازه با کران بالای ۱، ۲، ۳ و ۴ ولت نشان داده شده است. ولتاژ خروجی کنترل کننده فازی می تواند مقادیر بین صفر و ولتاژ اشباع را داشته باشد. در میراگر نیمه فعال MR نمی توان به صورت مستقیم نیروی دلخواه را تغییر داد، و تنها می توان ولتاژ ورودی میراگر را تنظیم نمود. به دلیل اینکه رابطه ولتاژ میراگر و نیروی میراگر غیرخطی می باشد، قانون مستقیمی برای تنظیم ولتاژ وجود ندارد. در کنترل کننده های کلاسیک با محاسبه نیروی دلخواه و سپس استفاده از یک فیلتر، ولتاژ ورودی اشباع را به میراگر اعمال می کنند. در نتیجه ولتاژ ورودی، صفر یا ولتاژ اشباع است. با استفاده از کنترل کننده فازی به وسیله متغیرهای زبانی می توان با توجه به پاسخ سازه ولتاژ مناسب را محاسبه و به میراگر MR اعمال کرد. مقادیر ولتاژ محاسبه شده می تواند بین صفر و ولتاژ اشباع نیز باشد.

در نمودارهای شکل ۷-۴۷ درصد کاهش پاسخ جابجایی سازه کنترل شده توسط میراگر جرمی

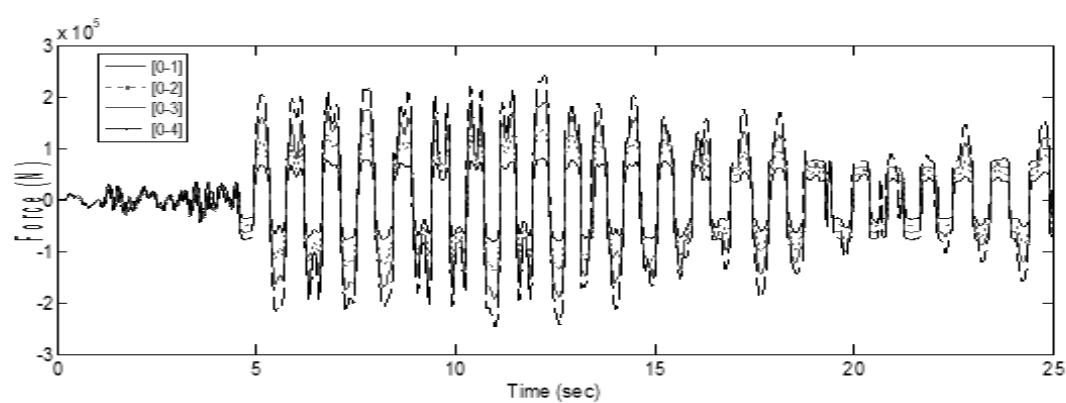
تنظیم شده غیرفعال و نیمه فعال در نسبت های میرائی ۰٪، ۵٪ و ۱۰٪ و نسبت جرمی ۱۰٪ و نسبت فرکانسی ۱/۰ تحت تحریک چهار زمین لرزه و در ولتاژهای ۱، ۲، ۳ و ۴ ولت، نشان داده شده است.

در زمین لرزه El Centro، در ولتاژهای پایین بهترین عملکرد میراگر جرمی در نسبت میرائی ۵٪ و در ولتاژهای بالاتر در نسبت میرائی ۰٪ مشاهده می شود. در ولتاژهای بالا، افزایش نسبت میرائی باعث کاهش در کارائی میراگر جرمی نیمه فعال می شود. در زمین لرزه Hachinohe با افزایش ولتاژ کارائی میراگر جرمی در کاهش پاسخ های اوج کاهش می یابد، اما کارائی آن در کاهش پاسخ های RMS بیشتر شده است. با افزایش سطح ولتاژ ورودی، افزایش نسبت میرائی تأثیر کمتری بر کارائی میراگر جرمی نیمه فعال می گذارد. در زمین لرزه Northridge و نسبت های میرائی یکسان، با افزایش ولتاژ ورودی عملکرد میراگر جرمی در کاهش پاسخ اوج کاهش می یابد، اما عملکرد آن را در کاهش پاسخ RMS افزایش می یابد. با افزایش ولتاژ ورودی، تأثیر افزایش نسبت میرائی بر عملکرد میراگر جرمی نیمه فعال کاهش می دهد. در زمین لرزه طبرس افزایش ولتاژ ورودی عملکرد میراگر جرمی نیمه فعال با نسبت میرائی ۰٪ را در کاهش پاسخ ها افزایش می دهد. در نسبت های میرائی بالاتر تأثیر منفی بر عملکرد میراگر جرمی می گذارد (باعث کاهش کارائی می شود)، اما تأثیر آن محسوس نمی باشد.

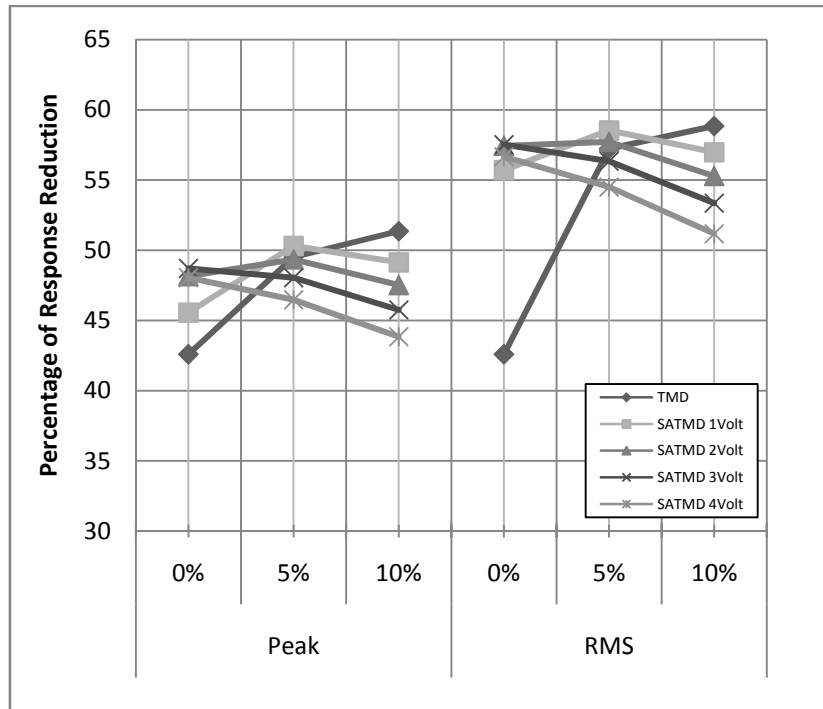
در میراگر جرمی تنظیم شده نیمه فعال، افزایش نسبت میرائی تأثیر زیادی بر کارائی میراگر جرمی در کاهش پاسخ سازه ندارد و با افزایش ولتاژ ورودی به میراگر نیمه فعال MR، تأثیر آن بر عملکرد میراگر جرمی تنظیم شده کاهش می یابد. میراگرهای جرمی تنظیم شده نیمه فعال در هر نسبت میرائی، جرمی و فرکانسی دارای یک نقطه اوج می باشند، که با افزایش ولتاژ ورودی به میراگر این نقطه اوج تغییر پیدا می کند. در حالیکه نتایج به دست آمده برای میراگر جرمی تنظیم شده غیرفعال، حاکی از آن است که نسبت میرائی تأثیر زیادی بر کارائی میراگر، به خصوص در کاهش پاسخ RMS سازه دارد.



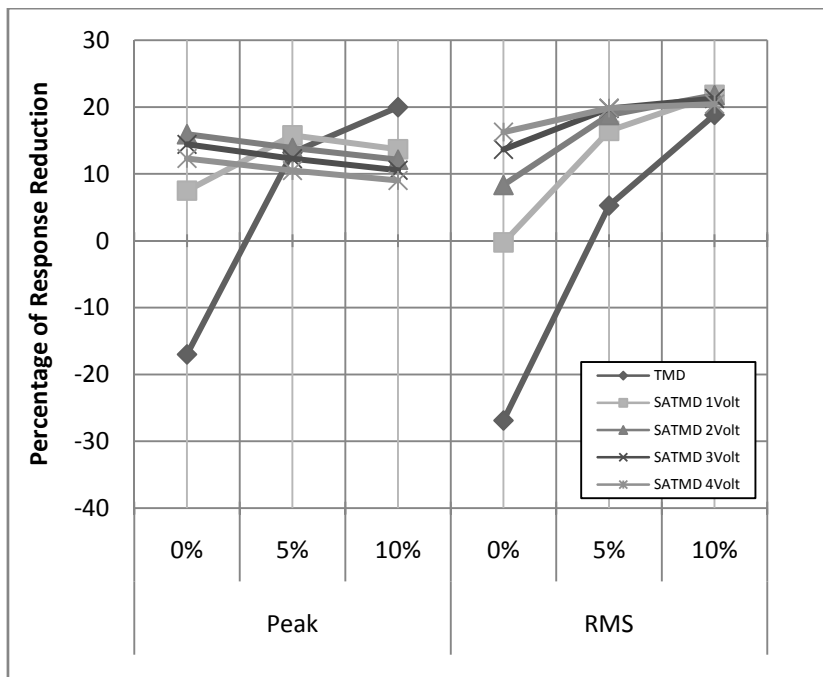
شکل ۴۵-۷ خروجی کنترل کننده فازی (ولتاژ اعمالی به میراگر نیمه فعال)



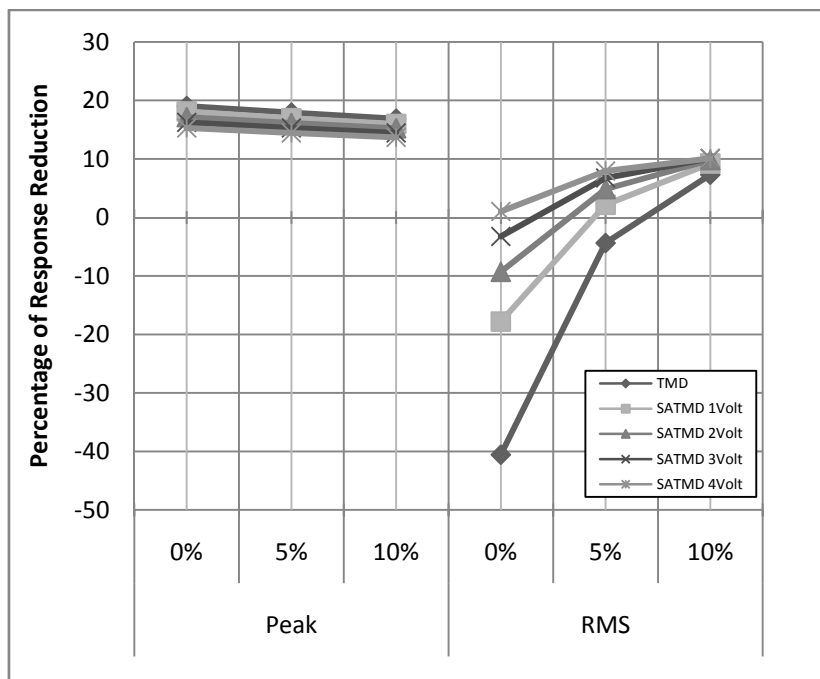
شکل ۴۶-۷ نیروی خروجی میراگر MR



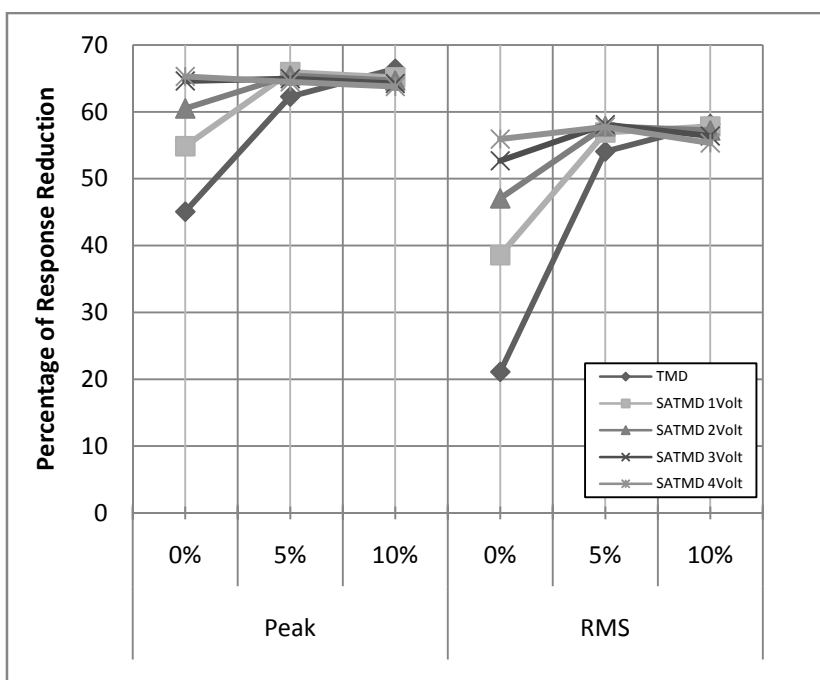
(الف)



(ب)



(ج)



(د)

شکل ۷-۴۷ درصد کاهش پاسخ میراگر در نسبت جرمی ۱۰٪ و نسبت فرکانسی ۱/۰ در زمین‌لرزه‌های: (الف) El Centro، (ب) Hachinohe، (ج) Northridge و (د) طیس

فصل هشتم

نتیجه‌گیری و پیشنهادات

در این مطالعه، رفتار سازه کنترل شده توسط میراگرهای جرمی نیمه فعال همراه با کنترل کننده فازی بررسی گردید. میراگر نیمه فعال MR به همراه میراگر جرمی استفاده شده و کنترل کننده فازی دارای دو ورودی (پاسخ سازه) و یک خروجی (ولتاژ اعمالی به میراگر نیمه فعال MR) می باشد. ابتدا تأثیر پارامترهای میراگر جرمی غیرفعال و نیمه فعال (نسبت های جرمی، میرائی و فرکانسی) بر روی عملکرد آنها در کاهش پاسخ های سازه به تحریک زمین لرزه بررسی و سپس در نسبت فرکانسی یکسان عملکرد این میراگرها با یکدیگر مقایسه شد. همچنین اثر تغییرات کران بالای ولتاژ ورودی میراگر نیمه فعال MR، بر عملکرد میراگر جرمی نیمه فعال بررسی شد. نتایج این مطالعه به شرح زیر است:

(۱) در نسبت میرائی و فرکانسی یکسان معمولاً با افزایش نسبت جرمی عملکرد میراگر جرمی افزایش می یابد، اما در مواردی افزایش نسبت جرمی تأثیر نامطلوب بر عملکرد میراگر جرمی دارد (مانند پاسخ های RMS در زمین لرزه Northridge). در نتیجه با قطعیت نمی توان گفت همواره افزایش نسبت جرمی موجب افزایش عملکرد میراگر جرمی در تحریک زمین لرزه خواهد شد.

(۲) با افزایش نسبت میرائی، تغییر در نسبت فرکانسی تأثیر کمتری بر عملکرد میراگر جرمی (به خصوص در نسبت های جرمی بالا) خواهد داشت. در عین حال افزایش نسبت میرائی می تواند موجب کاهش عملکرد میراگر جرمی در نسبت فرکانسی بهینه گردد. این امر در مورد میراگرهای جرمی نیمه فعال بارزتر است.

(۳) در نسبت میرائی ۰٪، عملکرد میراگرهای جرمی نیمه فعال در کاهش پاسخ های سازه، نسبت به میراگرهای جرمی غیرفعال بالاتر است. با افزایش میرائی در نسبت های جرمی و فرکانسی یکسان، معمولاً عملکرد میراگرهای جرمی غیرفعال افزایش و میراگرهای جرمی نیمه فعال کاهش یافته، در نتیجه عملکرد این میراگرهای جرمی در نسبت های میرائی بالا، به یکدیگر نزدیک می شود.

۴) در میراگرهای جرمی تنظیم شده غیرفعال، جرم اضافه شده جابجایی بزرگی دارد و این در برخی موارد موجب مشکلاتی در تأمین فضای مورد نیاز می‌شود. در میراگرهای جرمی نیمه‌فعال جابجایی جرم اضافه شده، کاهش پیدا می‌کند و این یکی از مزیت‌های این میراگرها می‌باشد.

۵) به دلیل اینکه رابطه ولتاژ میراگر MR و نیروی میراگر غیرخطی می‌باشد، قانون مستقیمی برای تنظیم ولتاژ وجود ندارد. با استفاده از کنترل‌کننده فازی این رابطه به وسیله متغیرهای زبانی برقرار شد. به این ترتیب علاوه بر مقدار صفر و ولتاژ اشباع، مقادیر ولتاژ بین صفر و ولتاژ اشباع نیز می‌تواند به میراگر MR اعمال شود.

۶) افزایش کران بالای ولتاژ ورودی میراگر نیمه‌فعال تا حد معینی، می‌تواند عملکرد آن را افزایش دهد. این افزایش، در نسبت‌های میرائی پایین محسوس است. افزایش نسبت میرائی ممکن است، باعث کاهش عملکرد میراگر جرمی تنظیم شده نیمه‌فعال در ولتاژهای ورودی یکسان شود.

۷) میراگرهای تنظیم شده نیمه‌فعال در نسبت جرمی یکسان دارای نسبت میرائی بهینه می‌باشند. با افزایش ولتاژ ورودی میراگر جرمی نیمه‌فعال این نسبت میرائی بهینه تغییر پیدا کرده و به صفر نزدیک می‌شود.

در پایان پیشنهادات زیر برای مطالعات آینده در این زمینه ارائه می‌گردند:

- استفاده از سایر روش‌های کنترلی برای محاسبه ولتاژ ورودی میراگر MR و مقایسه آن با نتایج به دست آمده برای کنترل‌کننده فازی
- بررسی تأثیر میراگر جرمی تنظیم شده نیمه‌فعال با سختی متغیر بر روی پاسخ سازه با کنترل‌کننده فازی
- بررسی اثرات میراگرهای نیمه‌فعال بر سازه‌های دیگری نظیر پل‌ها

پیوست ۱

مشخصات سازه

ماتریس‌های جرم و سختی سازه ده طبقه بررسی شده در این پایان‌نامه، به صورت زیر است:

$$M = \begin{bmatrix} 215000 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 201000 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 201000 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 200000 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 201000 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 201000 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 201000 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 203000 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 203000 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 203000 \end{bmatrix}$$

ماتریس سختی سازه به صورت زیر است:

$$K = \begin{bmatrix} 9.44 & -4.76 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -4.76 & 9.44 & -4.68 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -4.68 & 9.18 & -4.5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -4.5 & 9 & -4.5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -4.5 & 9 & -4.5 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -4.5 & 9 & -4.5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -4.5 & 8.87 & -4.37 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -4.37 & 8.74 & -4.37 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -4.37 & 8.74 & -4.37 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -4.37 & 4.37 \end{bmatrix} \times 10^8$$

کد نوشته شده در نرم افزار Matlab جهت محاسبه ماتریس های فضای حالت مدل سازه ای:

```
%Program needs mass and stiffness matrixes. Enter the modal damping ratio of structure (xi).
```

```
xi=0.03;
```

```
N=length(M);  
invM=inv(M);
```

```
[v,d]=eig(K,M);  
wi=sqrt(d);  
C=M*v*2*xi*wi*inv(v);
```

```
As=[zeros(N) eye(N);-inv(M)*K -inv(M)*C];  
Bs=[zeros(N);eye(N)];  
Cs=[eye(N) zeros(N);zeros(N) eye(N);-inv(M)*K -inv(M)*C];  
Ds=[zeros(N);zeros(N);eye(N)];
```

```
lambda=ones(N,1);  
gamma=[zeros(N-1,1);ones(1)];
```

```
phil=v(:,1);
```

```
mle=(phil'*M*phil)/phil(N,1)^2;  
cle=(phil'*C*phil)/phil(N,1)^2;  
kle=(phil'*K*phil)/phil(N,1)^2;
```

```
%Enter the tuned mass damper parameters.
```

```
mo=0.02;  
f=0.8;  
XIdamper=0;
```

```
Mdamper=mle*mo;  
Kdamper=Mdamper*(f*wi(1,1))^2;  
Cdamper=2*XIdamper*Mdamper*(f*wi(1,1));
```

```
Ad=[0 1;-Kdamper/Mdamper -Cdamper/Mdamper];  
Bd=[0;1];  
Cd=[1 0;0 1;-Kdamper/Mdamper -Cdamper/Mdamper];  
Dd=[0;0;1];
```

1. Soong T.T. and Dargush G.F. (1997), "*Passive energy dissipation systems in structural engineering*", Wiley Press, London.
2. Connor J.J. (2003), "*Introduction to structural motion control*", Pearson Education, Inc., New Jersey.
3. Spencer Jr.B.F. and Soong T.T. (1999), "New Applications and Development of Active, Semi active and Hybrid Control Techniques for Seismic and Non-Seismic Vibration in the USA", Proceedings of International Post-SMiRT Conference Seminar on Seismic Isolation, Passive Energy Dissipation and Active Control of Vibration of Structures, Cheju, Korea.
4. ATC 17-1. (1993), Proceedings on seismic isolation, passive energy dissipation, and active control. Redwood City (CA): Appl. Tech. Council.
5. Barrosa L.R., (1999), "Performance evaluation of vibration controlled steel structures under seismic loading", Ph.D. thesis of Stanford University.
6. Spencer Jr. B.F. and T.T. Soong, (2002), "Supplemental energy dissipation: state-of-the-art and state-of-the-practice", *J. Engineering Structures* 24, pp243
7. Naeim F. and Kelly J. M., (1999), "*Design of Seismic Isolated Structures: From Theory to Practice*", JohnWiley & Sons Press, New York.
8. Symans M.D. & Cofer W.F. and Fridley K.J., (2002), "Base isolation and supplemental damping systems for seismic protection of wood structures: literature review", *EERI Earthquake Spectra*, 18, 549.
9. Soong T.T. and Constantinou M.C., (1994), "*Passive and Active Structural Vibration Control in Civil Engineering*", Springer Press, New York.
10. ATC, (1994), Guidelines and commentary for the seismic rehabilitation of buildings. Report No. 33-02, Applied Technology Council, Redwood City, CA.
11. ATC, (1993), Proceedings of seminar on seismic isolation, passive energy dissipation, and active control. Report No. ATC-17-1, Applied Technology Council, San Francisco, CA.
12. EERI, (1993), Theme Issue: Passive energy dissipation. *Earthquake Spectra*; 9(3).
13. Constantinou M.C. & Soong T.T. and Dargush G.F., (1996), "Passive energy dissipation systems for structural design and retrofit", NCEER Monograph, National Center for Earthquake Engineering Research, Buffalo, NY.
14. Constantinou M.C. & Symans M.D., (1993), "Seismic response of buildings with supplemental damping", *Journal of Structural Design of Tall Buildings*, 2, p77.
15. 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.*, 21(6), p469.
16. Aiken I.D. and Kelly J.M., (1992), "Comparative study of four passive energy dissipation systems", *Bull NZ Nat Soc Earthquake Engng*, 25(3), p92.
17. Pall A.S. and Marsh C., (1982), "Response of friction damped braced frames", *ASCE, J Struct Div*, 1208(ST6), pp1313.
18. Constantinou M.C. and Symans M.D., (1993), "Experimental study of seismic response of buildings with supplemental fluid dampers", *J Struct Design Tall Buildings*, 2(2), p93–132.
19. Cheng F.Y. & Jiang H. and Lou K., (2008), "*Smart Structures, Innovative Systems*

- for *Seismic Response Control*", CRC Press, USA .1, pp1-50.
20. Bauer H.F., (1984), "Oscillations of inviscible liquids in a rectangular container: a new damper for excited structures", *Journal of Sound and Vibration*, 93, p117.
 21. Kobori T. & Takahashi M. & Nasu T. & Niwa N. and Ogasawara K., (1993), "Seismic response controlled structure with active variable stiffness system", *Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 22, p925-41.
 22. Nagarajaiah S., (1997), "Semi-active control of structures", Proceedings of Structures Congress XV, ASCE, Portland, OR, p1574-8.
 23. Shames I.H. and Cozzarelli F.A., (1992), "*Elastic and Inelastic Stress Analysis*", Prentice-Hall Press, Englewood Cliffs, NJ.
 24. Carlson J.D. and K. D. Weiss, (1994), "A Growing Attraction To Magnetic Fluids", *Machine Design*, 8, p61-66.
 25. Hrovat D. & Barak P. and Rabins M., (1983), "Semi-active versus passive or active tuned mass dampers for structural control", *ASCE Journal of Engineering Mechanics*, 109, p691.
 26. Nagarajaiah S. and Varadarajan N., (2000), "*Novel semiactive variable stiffness tuned mass damper with real time tuning capability*", Proc.,13th Engineering Mechanics Conf., Riston, Va.
 27. Abe M. and Igusa T., (1996). "Semi-active dynamic vibration absorbers for controlling transient response", *J. Sound Vib.*, 5, p547-569.
 28. Frahm U., (1911), "Device for damping of bodies", US Patent No. 989, p958.
 29. Ormondroyd J. and Den Hartog J.P., (1928), "The theory of the dynamic vibration absorber", *Journal of Applied Mechanics*, 50, pp9-22.
 30. Den hartog J.P., (1956), "*Mechanical Vibration*", fourth edition, McGraw-Hill, New York.
 31. Randall S.E. & Halsted D.M. and Taylor D.L., (1981), "Optimum vibration absorbers for linear damped systems", *Journal of Mechanical Design*, 103, pp908-913.
 32. Warburton G.B., (1981), "Optimum absorber parameters for minimizing vibration response", *Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 9, pp251-262.
 33. Ayorinde E.O. and Warburton G.B., (1980), "Minimizing Structural Vibrations with Absorbers", *Earthquake Engineering Struct*, 8, pp219-236.
 34. Tsai H.C. and Lin G.C., (1993), "Optimum tuned mass dampers for minimizing steady-state response of support-excited and damped systems", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 22, pp957-973.
 35. Pinkaew T. and Fujino Y., (2001), "Effectiveness of semi-active tuned mass dampers under harmonic excitation", *Eng Struct* 23(7): p850-856.
 36. Koo J.H., (2003), "Using magneto-rheological dampers in semi-active tuned vibration absorbers to control structural vibrations", Doctoral thesis, Virginia tech.
 37. Lienes T., (2009), academic dissertation, "Improving the performance of the semi-active tuned mass damper", Mechanical Eng depart., Oulu University.
 38. MATLAB R2007b The Math Works, Inc., Natick, Massachusetts.
 39. Jolly M.R. & Bender J.W. and Carlson J.D., (1996), "Properties and Applications of Magnetorheological Fluids", *T. Lord Research Center, Lord Corporation, 110 Lord Drive, Cary, NC 27511*.
 40. Spencer Jr.B.F. & Dyke S.J. & Sain M.K. and Carlson J.D., (1996) "Phenomenological Model of a Magnetorheological Damper", *J. Engrg. Mech.*,

123(3), pp230-238.

41. Dyke S.J. & Yi F. and Carlson J.D., (1999), "Application of magnetorheological dampers to seismically excited structures", Proceedings of the International Modal Analysis Conference, Kissimmee, FL, U.S.A., p8-11.
42. Yi F. & Dyke S.J. & Caicedo J.M. and Carlson J.D., (2001), "Experimental verification of multi-input seismic control strategies for smart dampers", *Journal of Engineering Mechanics (ASCE)* 2001; 127:1152-1164.
43. Ping Tan and Anil K. Agrawal, (2009), "Benchmark structural control problem for seismically excited highway bridge-Part II: Phase I Sample control designs", *Stuct. Control Health Monit.*; 16:p530-548.
44. Zadeh L., (1965), "Fuzzy sets", *J. Inf. Control* 8, p338-353.
45. Chang S.S.L. and Zadeh L.A., (1972), "On fuzzy mapping and control," *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, SMC-2, 30-34.
46. Kovacic Z. and Bogdan S., (2006), "Fuzzy controller design: Theory and Applications", CRC Press Teylor & Francis Group, USA.
47. Procyk T.J. and Mamdani E.H. (1979), 'A Linguistic Self-organising Process Controller.' *Automatica*, 15 (1), pp. 15-30.
48. Chuen Chien Lee, (1990), "Fuzzy Logic In Control Systems: Fuzzy Logic Controller - Part1", *IEEE Trans. Syst. Man Cybern.*, vol. 20, No. 2.
49. J.S.R. Jang and C.T. Sun, (1995), "Neuro-Fuzzy Modeling and Control", The Proceedings of the IEEE, vol. 83, pp. 378-406.
50. Valasek M & Novak M & Sika Z and Vaculin O, (1997), "Extended groundhook – new concept of semi-active control of truck's suspension". *Vehicle Syst Dyn* 27(5-6): p289-303.
51. Ji H. & Moon Y. & Kim C. and Lee I., (2005), "Structural vibration control using semi-active tuned mass damper", Proc Eighteenth KKCNN Symposium on Civil Engineering-KAIST6 December 18-20, Taiwan.
52. Setareh M., (2001), "Application of semi-active tuned mass dampers to base-excited systems", *Eartquake Eng & Struct Dyn* 30(3): p449-462.
53. Yi K. adn Song B.S., (1999), "A new adaptive sky-hook control of vehicle semi-active suspensions", *Proc Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering. Professional Engineering Publishing*, 213, pp293-303.
54. Hyvärinen J.P., (2004), "The improvement of full vehicle semi-active suspension through kinematic model", Doctoral thesis, University of Oulu.
55. Pourzeynali S. & Lavasani H.H. and Modarayi A.H., (2007), "Active control of high rise building structures using fuzzy logic and genetic algorithms", *Engineering Structures* 29 346-357.

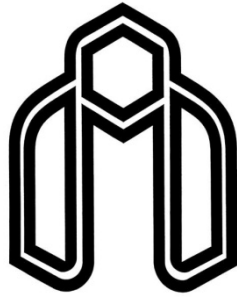
۵۶. گرامی م.، واثقی ا.، عبدالله زاده د.، ۱۳۸۷، "بررسی رفتار سازه‌ها تحت زلزله‌های حوزه نزدیک"، چهارمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه تهران.

Abstract

Protection of a structure, the human occupants and its material content, against damage induced by large environmental loads, e.g., earthquake, is without doubt, a serious challenge in the civil engineering. Inelastic deformation based design methods have become a thing of the past and the focus is now on structural control. Classical control algorithms need an exact mathematical model for an actual structure to minimize its vibration. Today, structures that are built are more slender and flexible and contain complex features. Therefore, obtaining a reduced order model becomes erroneous and control mechanism based on this approach never becomes optimal. Fuzzy logic based control neither needs an accurate mathematical model nor does it depend on a reduced order model.

In this study, fuzzy logic controller (FLC) designed for a multi-degree of freedom structure with a semi-active tuned mass damper (SATMD) to suppress earthquake-induced vibrations. SATMD uses a small amount of external power to modulate the damping. FLC is preferred because of its robust character and superior use effectively and easily in semi-active control. A ten degree of freedom model with a SATMD on the top floor of structure has been used. Semi-active MR damper used as an actuator. At the end of study responses of displacements, accelerations, SATMD displacements are presented. Performance of the designed FLC has been shown for the El Centro, Hachinohe, Northridge and Tabas earthquakes. Simulation results for SATMDs and its equivalent TMDs are compared.

Key words: Vibration Control, Tuned Mass Damper, Semi-active Control, Fuzzy Logic Controller



Shahrood University of Technology
Architecture and Civil Engineering Faculty

Vibration Control of Structures with Semi-active Tuned Mass Dampers using Fuzzy Logic Controller

By: Saeed Pirgholizadeh

Supervisor:

Dr A. Keyhani

Advisor:

Dr M. M. Fateh

Thesis submitted for the degree of Master of Science

June 2010