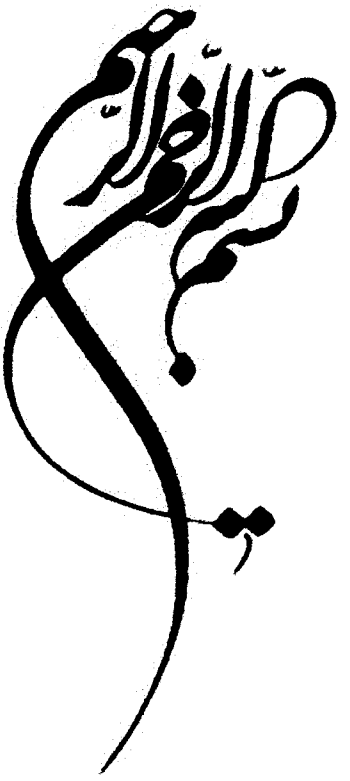

٢٠٢٢٥٠٠ - ١٤٤٩١٠

دانشکدهٔ مهندسی عمران

گروه سازه

پایان نامه برای دریافت درجهٔ کارشناسی ارشد در رشتهٔ مهندسی عمران گرایش مهندسی زلزله

عنوان

کنترل نیمه فعال پاسخ لرزه ای سازه ها با استفاده از میراگرهای MR

استاد راهنما

دکتر بهمن فرهمندآذر

استاد مشاور

دکترحسین غفارزاده

نگارش

نیما مهاجر رهبری

شهریورماه ۱۳۸۹

۱۴۴۹۱۰

نام خانوادگی: مهاجررهبری

نام: نیما

عنوان پایان نامه: کنترل نیمه فعال پاسخ لرزه ای سازه ها با استفاده از میراگرهای MR

استاد راهنما: دکتر بهمن فرهمند آذر

استاد مشاور: دکتر حسین غفارزاده

مقطع تحصیلی: کارشناسی ارشد | **رشته:** مهندسی عمران | **گرایش:** مهندسی زلزله

دانشکده: مهندسی عمران | **دانشگاه:** تبریز | **تعداد صفحه:** ۱۴۶

کلید واژه: کنترل سازه، کنترل نیمه فعال، میراگر MR، سازهٔ هوشمند، مدل باک-ون، الگوریتم کنترل بهینه LQR، الگوریتم Clipped-Optimal، الگوریتم کنترل مستقیم.

چکیده:

کنترل پاسخ سازه های مهندسی عمران در مقابل تحریکات ناشی از بارهای دینامیکی نظیر باد و زلزله، زمینهٔ تحقیق نسبتاً جدیدی می باشد که به سرعت در حال پیشرفت است.

میراگرهای MR، گروه جدیدی از ابزار کنترل مدرن سازه ها به شمار می آیند. مایعات MR در درون این میراگرها حاوی ذرات دو قطبی شونده ای هستند که با قرارگیری در معرض میدان مغناطیسی، قطبش یافته و اتصال زنجیروار آن ها به یکدیگر، سبب می شود که این مایعات در مدت چند میلی ثانیه به حالت نیمه جامد تغییر حالت دهند. به این ترتیب با تغییر ولتاژ اعمال شونده، بزرگی میدان مغناطیسی تغییر نموده و در نتیجه تنش تسلیم مایع و نیروی میرایی تولید شده توسط میراگر MR، تغییر می یابد.

در پایان نامهٔ حاضر، عملکرد سیستم های کنترل میراگر MR مورد بررسی قرار می گیرد. شبیه سازی سیستم کنترل در فضای نرم افزار MATLAB انجام شد. از دو مدل هیسترسیزی Bouc-Wen ساده و اصلاح شده (Phenomenological Model) جهت مدل سازی رفتار

غیرخطی میراگرهای MR استفاده شده و عملکرد میراگرها در دو حالت غیرفعال و نیمه فعال مورد ارزیابی قرار می گیرد. برای بررسی عملکرد غیرفعال میراگرها، دو مود Passive-Off به ازای ولتاژ ورودی صفر و Passive-On به ازای ولتاژ ورودی برابر با ولتاژ حداکثر (ولتاژحد اشباع میدان مغناطیسی) در نظر گرفته می شود. هم چنین یک روش کنترل مستقیم نیمه فعال بر پایهٔ مدل سادهٔ Bouc-Wen پیشنهاد می گردد. در این روش سعی می شود تا با استفاده از الگوریتم کنترل بهینهٔ LQR، ولتاژ ورودی بهینه، جهت نزدیک نمودن نیروی میراگر به نیروی کنترل بهینه، در هر لحظه محاسبه گردد. عملکرد نیمه فعال میراگر MR با استفاده از روش پیشنهادی مذکور و الگوریتم شناخته شدهٔ Clipped Optimal که در آن با تنظیم ولتاژ ورودی برابر با دو مقدار صفر یا ولتاژ حداکثر، در هر لحظه نیروی میرایی میراگر به نیروی کنترل بهینهٔ محاسبه شده نزدیک می شود، مورد بررسی قرار می گیرد.

نتایج تحلیل چندین قاب ساختمانی برشی نشان می دهد که به دلیل قابلیت انطباق بر شرایط موجود در هر لحظه، به کارگیری میراگرهای MR در حالت نیمه فعال نسبت به مودهای عملکردی غیر فعال برتری دارد. هم چنین در روش کنترل مستقیم پیشنهاد شده، امکان محاسبهٔ ولتاژ ورودی بهینه در هر گام زمانی وجود داشته و در مواردی که بازهٔ مقادیر نیروهای کنترل بهینه محاسبه شده از ظرفیت تولید میراگر تجاوز نکند، این روش عملکرد مناسب تری نسبت به Clipped Optimal خواهد داشت و در غیر اینصورت شاهد عملکرد مشابهی از دو روش مذکور خواهیم بود. ضمناً مقایسهٔ نتایج عددی نشان می دهد که نصب میراگرهای MR در طبقات بالاتر نسبت به طبقات پایین، عملکرد مؤثرتری در کاهش پاسخ های لرزه ای سازه خواهد داشت.

به پاس گرمای امید بخش حضورشان در این سردترین روزگاران،

به پاس عاطفهٔ سرشار و محبت های بی دریغ شان،

به پاس بزرگی قلب هایشان که فریادرس است

و به پاس تعبیر عظیم و انسانی شان از واژهٔ ایثار

مجموعهٔ حاضر را به مادر و پدر بزرگوارم تقدیم می نمایم.

تقدیر و تشکر

اینجانب در مدت تحصیل در مقطع کارشناسی ارشد همواره از محضر استاد ارجمندم جناب آقای دکتر بهمن فرهمندآذر بهره مند بوده ام و پیشبرد این پایان نامه نیز بدون راهنمایی‌ها و نظریات ارزندهٔ ایشان به عنوان استاد راهنما میسر نبود. بدینوسیله ضمن تشکر و قدردانی، سلامتی و توفیق روزافزون ایشان را از درگاه خداوند متعال خواستارم.

از استاد عزیزم جناب آقای دکتر حسین غفارزاده که به عنوان استاد مشاور از هیچگونه مساعدت و همکاری در راستای انجام تحقیق حاضر دریغ نفرمودند و هم چنین اساتید محترم کمیتهٔ داوری که زحمت مطالعهٔ متن پایان نامه و حضور در جلسهٔ دفاعیه را عهده دار شدند و با ارائهٔ نقطه نظرات ارزشمند، موجبات اصلاح و تکمیل این مجموعه را فراهم آوردند کمال تشکر و قدردانی را دارم.

از دوست عزیزم، جناب آقای مهندس هادی صفری که در مدت اقامت در شهر تبریز و هم چنین تدوین پایان نامهٔ حاضر همواره از لطف و کمک های بی دریغ ایشان برخوردار بوده ام، صمیمانه قدردانی می نمایم.

هم چنین در زمینهٔ کدنویسی کامپیوتری و تهیهٔ رسالهٔ حاضر از رهنمودها و مساعدت های سودمند دوست و برادر گرامیم، جناب آقای مهندس نادر امیرامرخانی برخوردار بوده ام که بدینوسیله مراتب سپاس و قدردانی خویش را از ایشان ابراز می دارم.

در انتها بر خود می دانم تا از زحمات و پشتیبانی پدر، مادر و به ویژه خواهر عزیزم که در تمام دوران تحصیل همواره مشوق اینجانب بوده اند کمال تشکر و قدردانی را بنمایم.

فهرست مندرجات

فصل اول: معرفی سیستم های مختلف کنترل سازه ها

۱-۱- مقدمه ۲

۱-۲- سیستم های کنترل غیرفعال ۳

۱-۲-۱- جداگر پایه ۵

۱-۲-۲- میراگرجرم تنظیم شده (TMD) ۷

۱-۲-۳- میراگر مایع تنظیم شده (TLD) ۸

۱-۲-۴- میراگر اصطکاکی ۹

۱-۲-۵- میراگر فلزی جاری شونده ۱۰

۱-۲-۶- میراگر ویسکوالاستیک(VE) ۱۱

۱-۲-۷- میراگرویسکوزمایع ۱۲

۱-۳- سیستم های کنترل فعال ۱۳

۱-۳-۱- میراگر جرم فعال(AMD) ۱۶

۱-۳-۲- سیستم کابل فعال ۱۸

۱-۳-۳- سیستم مهاربند فعال ۱۸

۱-۴- سیستم های کنترل نیمه فعال ۱۹

۱-۴-۱- سیستم میراگرجرم تنظیم شده نیمه فعال ۲۱

۱-۴-۲- سیستم میراگرمایع تنظیم شده نیمه فعال ۲۳

۱-۴-۳- سیستم میراگر اصطکاکی نیمه فعال ۲۴

۱-۴-۴- میراگر هیدرولیکی نیمه فعال (SAHD) ۲۶

۱-۴-۵- سیستم سختی متغیر نیمه فعال(SAVS) ۲۶

۱-۴-۶- میراگر ER ۲۷

۱-۴-۷- میراگر MR ۲۹

۱-۵- سیستم های کنترل ترکیبی ۳۲

۱-۵-۱- سیستم جداگر پایه ترکیبی ۳۳

۱-۵-۲- میراگر جرم ترکیبی (HMD) ۳۴

فصل دوم: مدل های رفتاری میراگرهایMR و الگوریتم های کنترل نیمه فعال

۲-۱- مقدمه ۳۸

۲-۲- مشخصات مایعات MR ۳۹

۲-۳- میراگر های MR و مدل های رفتاری ۴۱

۲-۳-۱- مدل Bingham ۴۶

۲-۳-۲- مدل Bouc-Wen ۴۹

۲-۳-۳- مدل دو ویسکوز هیسترسیزی غیرخطی ۶۴

۲-۳-۴- مدل چندجمله ای ۶۷

۲-۳-۵- مدل Kwok ۶۸

۲-۴- معادلهٔ فضای حالت ۶۹

۲-۵- الگوریتم های کنترل نیمه فعال ۷۳

۲-۵-۱- الگوریتم کنترل بر مبنای تئوری پایداری لیاپانوف ۷۳

۲-۵-۲- الگوریتم کنترل Bang-Bang غیرمتمرکز ۷۵

۲-۵-۳- الگوریتم کنترل حداکثر استهلاک انرژی ۷۶

۲-۵-۴- الگوریتم کنترل Modulated Homogeneous Friction ۷۷

۲-۵-۵- الگوریتم های کنترل نیمه فعال بر مبنای محاسبهٔ نیروهای کنترل بهینه ۷۹

۲-۵-۵-۱- الگوریتم کنترل بهینهٔ LQR ۸۰

۲-۵-۵-۲- الگوریتم کنترل قطع و وصل بهینهٔ ولتاژ ۸۶

۲-۵-۵-۳- الگوریتم کنترل مستقیم پیشنهادی بر مبنای مدل سادهٔ Bouc-Wen . ۹۰

۲-۶- معیارهای ارزیابی ۹۵

فصل سوم: تحلیل و بررسی عددی عملکرد سازه های مجهز به میراگر MR

۳-۱- مقدمه ۹۸

۳-۲- مشخصات زلزله های مورد استفاده ۹۹

۳-۳- مثال های عددی ۱۰۱

۳-۳-۱- مثال اول ۱۰۱

۳-۳-۱-۱- مقایسهٔ الگوریتم Clipped Optimal و روش کنترل مستقیم ۱۰۹

۳-۳-۲- مثال دوم ۱۱۳

۳-۳-۲-۱- مقایسهٔ کنترل نیمه فعال و غیر فعال ۱۲۰

۳-۳-۲-۲- مقایسهٔ الگوریتم Clipped Optimal و روش کنترل مستقیم ۱۲۱

۳-۳-۳- مثال سوم ۱۳۱

فصل چهارم: جمع بندی نتایج و پیشنهاد برای کارهای آینده

۴-۱- جمع بندی نتایج یدست آمده و نتیجه گیری ۱۴۳

۴-۲- پیشنهاد برای کارهای آینده ۱۴۵

فهرست جداول

فصل اول: معرفی سیستم های مختلف کنترل سازه ها

جدول۱-۱) ساختمان های مجهز به سیستم کنترل HMD تا سال۲۰۰۳ ..... ۳۶

فصل دوم: مدل های رفتاری میراگرهایMR و الگوریتم های کنترل نیمه فعال

جدول۲-۱) مقادیر پارامترهای مدل Bouc-Wen ساده برای میراگر MR ۳کیلونیوتنی ۵۵

جدول۲-۲) مقادیر پارامترهای مدل Bouc-Wen اصلاح شده برای میراگر MR ۳ کیلونیوتنی ۵۶

جدول۲-۳) مقادیر بهینهٔ پارامترهای مدل Bouc-Wen اصلاح شده برای میراگر MR ۲۰۰کیلونیوتنی ۵۸

جدول۲-۴) مقادیر بهینهٔ پارامترهای مدل Bouc-Wen ساده برای میراگر MR ۱۰۰۰کیلونیوتنی ۶۰

جدول۲-۵) مقادیر بهینهٔ پارامترهای مدل Bouc-Wen اصلاح شده برای میراگر MR ۱۰۰۰کیلونیوتنی ۶۱

فصل سوم: تحلیل و بررسی عددی عملکرد سازه های مجهز به میراگر MR

جدول۳-۱) مشخصات لرزه ای و سایت وقوع رکورد زلزله های انتخاب شده ۹۹

جدول۳-۲) مقایسهٔ نتایج حداکثر پاسخ های تحلیل ساختمان سه طبقهٔ مقیاس شده به وسیلهٔ برنامهٔ تهیه شده با نتایج تحقیق Dyke و Spencer تحت زلزلهٔ EL Centro ۱۰۵

جدول۳-۳) مقادیر معیارهای پذیرش برای دو حالت کنترل توسط الگوریتم قطع و وصل بهینه و روش کنترل مستقیم پیشنهاد شده ۱۰۹

جدول۳-۴) نتایج محاسبات ساختمان در حالات کنترل نیمه فعال توسط دو کنترلر A و B و بدون کنترل تحت تأثیر رکورد زلزلهٔ El Centro ۱۱۶

جدول۳-۵) نتایج محاسبات ساختمان در حالات کنترل نیمه فعال توسط دو کنترلر A و B و بدون کنترل تحت تأثیر رکورد زلزلهٔ Northridge ۱۱۷

جدول۳-۶) نتایج محاسبات ساختمان در حالات کنترل نیمه فعال توسط دو کنترلر A و B و بدون کنترل تحت تأثیر رکورد زلزلهٔ Cape Mendocino ۱۱۸

جدول۳-۷) مقایسهٔ حداکثر پاسخ ها در حالت قرارگیری دو میراگر در طبقهٔ دوم، در چهار وضعیت کنترل نشده، Passive-Off، Passive-On و Clipped Optimal تحت اثر زلزلهٔ El Centro ۱۲۱

جدول۳-۸) مقادیر معیارهای پذیرش برای دو حالت کنترل توسط الگوریتم قطع و وصل بهینه و روش کنترل مستقیم پیشنهاد شده بااستفاده ازکنترلر A، تحت رکوردزلزلهٔ El Centro ۱۲۲

جدول۳-۹) مقادیر معیارهای پذیرش برای دو حالت کنترل توسط الگوریتم قطع و وصل بهینه و روش کنترل مستقیم پیشنهاد شده بااستفاده ازکنترلر B، تحت رکوردزلزلهٔ El Centro ۱۲۳

جدول۳-۱۰) مقادیر معیارهای پذیرش برای دو حالت کنترل توسط الگوریتم قطع و وصل بهینه و روش کنترل مستقیم پیشنهاد شده بااستفاده ازکنترلر A، تحت رکوردزلزلهٔ Northridge .. ۱۲۴

جدول۳-۱۱) مقادیر معیارهای پذیرش برای دو حالت کنترل توسط الگوریتم قطع و وصل بهینه و روش کنترل مستقیم پیشنهاد شده بااستفاده ازکنترلر B، تحت رکوردزلزلهٔ Northridge .. ۱۲۵

جدول۳-۱۲) مقادیر معیارهای پذیرش برای دو حالت کنترل توسط الگوریتم قطع و وصل بهینه و روش کنترل مستقیم پیشنهاد شده با استفاده از کنترلر A، تحت رکورد زلزلهٔ Cape Mendocino ۱۲۶

جدول۳-۱۳) مقادیر معیارهای پذیرش برای دو حالت کنترل توسط الگوریتم قطع و وصل بهینه و روش کنترل مستقیم پیشنهاد شده با استفاده از کنترلر B، تحت رکورد زلزلهٔ Cape Mendocino ۱۲۷

جدول۳-۱۴) مقادیر جرم و سختی طبقات ساختمان ۱۱ طبقه واقع در شهر رشت ۱۳۲

جدول۳-۱۵) مقایسهٔ مقادیر معیار های ارزیابی برای دو الگوریتم Clipped Optimal و کنترل مستقیم تحت زلزلهٔ El Centro ۱۳۴

جدول۳-۱۶) مقایسهٔ مقادیر معیار های ارزیابی برای دو الگوریتم Clipped Optimal و کنترل مستقیم تحت زلزلهٔ Northridge ۱۳۵

جدول۳-۱۷) مقایسهٔ مقادیر معیار های ارزیابی برای دو الگوریتم Clipped Optimal و کنترل مستقیم تحت زلزلهٔ Cape Mendocino ۱۳۶

فهرست اشکال

فصل اول: معرفی سیستم های مختلف کنترل سازه ها

شکل۱-۱) الف: دیاگرام بلوکی سازه با طراحی سنتی، ب: دیاگرام بلوکی سازه مجهز به سیستم مدرن کنترل غیر فعال ۵

شکل۱-۲) عملکرد سیستم جداگر پایه در هنگام زلزله ۵

شکل۱-۳) نمایش یک جداگر الاستومریک با هسته سربی به صورت شماتیک ۶

شکل۱-۴) سیستم جرم تنظیم شده نصب شده برروی ساختمان ۷

شکل۱-۵) الف: میراگرمایع لزج در تانکر به همراه شبکه (Sloshing Damper)، ب: میراگر ستونی دهانه تنگ ۸

شکل۱-۶) میراگر اصطکاکی X نصب شده روی مهاربند ضربدری ۹

شکل۱-۷) میراگر ADAS ۱۰

شکل۱-۸) الف: میراگرویسکوالاستیک، ب: میراگر ویسکوالاستیک برروی مهاربند قطری ۱۱

شکل۱-۹) میراگر ویسکوزمایع و قاب ساختمانی مجهز به آن ۱۲

شکل۱-۱۰) میراگر ویسکوزدیواری (VDW) ۱۲

شکل۱-۱۱) دیاگرام بلوکی سیستم های کنترل حلقه بستهٔ فعال ۱۴

شکل۱-۱۲) دیاگرام بلوکی سیستم های کنترل حلقه باز-بستهٔ فعال ۱۴

شکل۱-۱۳) مقایسه بین دو سیستم TMD و AMD به صورت شماتیک ۱۷

شکل۱-۱۴) ساختمان Kyobashi Seiwa مجهز به سیستم AMD در ژاپن ۱۷

شکل۱-۱۵) نمایش سیستم کابل فعال به صورت شماتیک ۱۸

شکل۱-۱۶) سیستم مهاربند فعال با محرک هیدرولیکی به صورت شماتیک ۱۹

شکل۱-۱۷) دیاگرام بلوکی یک سیستم حلقه بستهٔ نیمه فعال ۲۰

شکل۱-۱۸) سیستم میراگرجرم تنظیم شده نیمه فعال ۲۱

شکل۱-۱۹) الف: شکل میراگر اصطکاکی پیزوالکتریک، ب: نمایش یک میراگر اصطکاکی پیزوالکتریک به صورت شماتیک ۲۵

شکل۱-۲۰) نمایش یک میراگر دهانه متغیر به صورت شماتیک ۲۶

شکل۱-۲۱) ساختمان Kijima Technical Research Institute مجهز به سیستم SAVS در ژاپن ۲۷

شکل۱-۲۲) نمایش میراگر ER به صورت شماتیک ۲۸

شکل۱-۲۳) نمایش میراگر MR به صورت شماتیک ۳۰

شکل۱-۲۴) الف: ساختمان Nihon-Kagaku-Miraikan مجهز به میراگر MR در ژاپن، ب: میراگر MR نصب شده در ساختمان ۳۰

شکل۱-۲۵) الف: پل کابلی دریاچهٔ Dongting درچین مجهز به میراگر MR شرکت LORD، ب: میراگرهای MR نصب شده برروی پل، ج: جزئیات اتصال میراگر به کابل های پل ۳۱

شکل۱-۲۶) دیاگرام بلوکی یک سیستم حلقه بستهٔ ترکیبی ۳۳

شکل۱-۲۷) مطالعهٔ آزمایشگاهی سیستم جداگر پایهٔ هوشمند با استفاده از میراگر MR ۳۴

شکل۱-۲۸) نمایش سیستم HMD به صورت شماتیک ۳۵

فصل دوم: مدل های رفتاری میراگرهایMR و الگوریتم های کنترل نیمه فعال

شکل۲-۱) رفتار مایعات MR ۴۰

شکل۲-۲) مقایسهٔ مدل Bingham برای یک مایع MR و یک مایع نیوتنی ۴۱

شکل۲-۳) عملکرد مایعات MR ۴۲

شکل۲-۴) نمایش میراگر MR مقیاس بزرگ ۲۰تنی به صورت شماتیک ۴۳

شکل۲-۵) منحنی های پاسخ میراگر MR ۳ کیلو نیوتنی به تحریک سینوسی ۴۵

شکل۲-۶) مدل Bingham برای یک میراگر مایع کنترل پذیر به صورت شماتیک ۴۷

شکل۲-۷) مقایسهٔ پیش بینی پاسخ میراگر ۳KN با مدل Bingham و نتایج آزمایشگاهی .. ۴۷

شکل۲-۸) مدل Bingham تعمیم یافته به صورت شماتیک ۴۸

شکل۲-۹) مقایسهٔ شبیه سازی رفتار میراگر ۳KN با مدل Gamota و Filisko با نتایج آزمایشگاهی در ولتاژ ثابت 1.5V ۴۹

شکل۲-۱۰) نمایش مدل سادهٔ Bouc-Wen برای میراگر MR به صورت شماتیک ۵۰

شکل۲-۱۱) مقایسهٔ منحنی های پاسخ پیش بینی شده توسط مدل سادهٔ Bouc-Wen و نتایج آزمایشگاهی میراگر MR ۳ کیلو نیوتنی تحت تحریک سینوسی در ولتاژ ثابت 1.5V ۵۲

شکل۲-۱۲) نمایش مدل اصلاح شدهٔ Bouc-Wen (Phenomenological Model) برای میراگر MR به صورت شماتیک ۵۲

شکل۲-۱۳) مقایسهٔ منحنی های پاسخ پیش بینی شده توسط مدل Bouc-Wen اصلاح شده و نتایج آزمایشگاهی میراگر MR ۳ کیلو نیوتنی تحت تحریک سینوسی در ولتاژ ثابت 1.5V .. ۵۴

شکل۲-۱۴) شبیه سازی تغییرمکان و ولتاژ مؤثر بر یک میراگر MR ۳ کیلو نیوتنی در یک سیستم کنترل نیمه فعال ۵۷

شکل۲-۱۵) مقایسهٔ منحنی های پاسخ پیش بینی شده توسط مدل Bouc-Wen اصلاح شده و نتایج آزمایشگاهی میراگرMR ۳کیلو نیوتنی دریک سیستم کنترل نیمه فعال شبیه سازی ۵۷

شکل۲-۱۶) مقایسهٔ پاسخ پیش بینی شده توسط مدل Bouc-Wen اصلاح شده و نتایج آزمایشگاهی میراگرMR ۲۰۰کیلو نیوتنی تحت تحریک سینوسی با شدت جریان ثابت 2A .. ۵۹

شکل۲-۱۷) مقایسهٔ منحنی پاسخ نیرو-سرعت پیش بینی شده توسط سه مدل Bingham، Bouc-Wen و Bouc-Wen اصلاح شده و نتایج آزمایشگاهی میراگر MR ۱۰۰۰ کیلونیوتنی ۶۰

شکل۲-۱۸) نمایش شماتیک مدل Yang برای میراگر MR ۶۲

شکل۲-۱۹) نمایش شماتیک مدل Bouc-Wen اصلاح شده به اضافه یک جرم ۶۳

شکل۲-۲۰) الف: مقایسهٔ پاسخ پیش بینی شده توسط مدل Yangو ب: مدلBouc-Wen اصلاح شده به اضافهٔ یک جرم، با نتایج آزمایشگاهی میراگرMR ۲۰۰کیلو نیوتنی تحت تحریک سینوسی با شدت جریان ثابت 2A ۶۳

شکل۲-۲۱) نمایش مدل دو ویسکوز هیسترسیزی غیرخطی Wereley به صورت شماتیک .. ۶۴

شکل۲-۲۲) نمایش مدل ویسکوالاستوپلاستیک Li به صورت شماتیک ۶۵

شکل۲-۲۳) مقایسهٔ مدل ویسکو الاستو پلاستیک Li و نتایج آزمایشگاهی تحت تحریک سینوسی ۶۶

شکل۲-۲۴) مقایسهٔ مدل چند جمله ای Choi و نتایج آزمایشگاهی ۶۸

شکل۲-۲۵) نمایش مدل Kwok به صورت شماتیک ۶۸