دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

دانشکده مهندسی عمران

پایان نامه دکتری عمران ـ گرایش سازه

# ارزیابی احتمالاتی قاب‌های فلزی مهاربندی شده همگرا با مهاربندهای از جنس آلیاژ حافظه دار شکلی

**استاد راهنما : آقای دکتر بهروز عسگریان**

**دانشجو : علی جلائی فر**

**شماره دانشجویی : ۸۷۰۱۱۰۶**

**شهریورماه ۱۳۹۱**

بسم الله الرحمن الرحيم

**چکیده:**

فلسفه روش‌های طراحی ساختمان‌های مقاوم در برابر زلزله در سال‌های اخیر شاهد تغییرات بسیاری بوده است. امروزه از روش‌های غیرفعال کنترل سازه‌ها در برابر زلزله به عنوان یک جایگزین مناسب برای روش‌های سنتی نام برده می‌شود. آلیاژهای حافظه دار شکلی به عنوان موادی هوشمند در کنترل سازه‌ها می‌توانند تا کرنش‌های حدود ٪۱۰ را بدون برجا گذاشتن کرنش پس ماند و هم‌زمان با رفتار هیسترتیک تحمل کنند که این مساله این مواد را به یک ماده مطلوب برای کاربرد در میراگرها و یا جداگرهای پی تبدیل کرده‌است.

در این پژوهش سعی شده است تا ضمن بررسی آزمایشگاهی رفتار آلیاژ حافظه‌دار نیتینول و خواص مکانیکی آن، مدلی ساده و به دور از پیچیدگی‌های مکانیکی برای یک میراگر ترکیبی جهت استفاده در اعضای مهاربندی سازه‌های خاص ارائه گردد. این میراگر با استفاده از ترکیب موازی فولاد ساختمانی و نیتینول می‌تواند به بهبود رفتار مهاربندها کمک کند. رفتار این میراگر ترکیبی از طریق روش اجزای محدود و نیز با استفاده از آزمایشات برای ترکیب‌های مختلف نیتینول و فولاد بررسی شده است. نتایج حاصل از این اقدامات نشانگر عملکرد ترکیبی مناسب میراگر پیشنهادی از نظر استهلاک انرژی و بازیابی کرنش‌ها به نسبت استفاده از فولاد یا نیتینول به تنهایی می‌باشد. هم‌چنین برخی نقاط ضعف در رفتار هریک از این مصالح در ترکیب موازی توسط ماده دیگر پوشش داده شده است.

**تشکر و قدردانی :**

استاد محترم راهنما، جناب آقای دکتر بهروز عسگریان، خانواده عزیزم، دوستان و همکارانم ...

این یک صفحه کاغذ حقیرتر از آن است که بتواند وسعت حس قدردانی‌ام از شما را در دل خود جا دهد...

## اظهارنامه دانشجو

موضوع پایان نامه:

ارزیابی تحلیلی و آزمایشگاهی میراگر ترکیبی برای استفاده در قاب‌های فلزی مهاربندی شده همگرا

استاد راهنما : دکتر بهروز عسگریان

نام دانشجو: علی جلائی فر

شماره دانشجویی: ۸۷۰۱۱۰۶

اینجانب **علی جلائی فر** دانشجوی دوره دکتری مهندسی عمران گرایش سازه دانشکده عمران دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی گواهی می نمایم که تحقیقات ارائه شده در این پایان نامه توسط شخص اینجانب انجام شده و صحت و اصالت مطالب نگارش شده مورد تائید می‌باشد و در موارد استفاده از کار دیگر محققان به مرجع مورد استفاده اشاره شده است. به علاوه گواهی می نمایم که مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی توسط اینجانب یا فرد دیگری در هیچ جا ارائه نشده است و در تدوین پایان نامه چارچوب (فرمت) مصوب دانشگاه را بطور کامل رعایت کرده‌ام.

امضاء دانشجو

## حق طبع و نشر و مالکیت نتایج

۱- حق چاپ و تکثیر این پایان نامه متعلق به نویسنده آن می باشد. هر گونه کپی برداری بصورت کل پایان نامه یا بخشی از آن تنها با موافقت نویسنده یا کتابخانه دانشکده عمران دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی مجاز می باشد.

۲- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی می باشد و بدون اجازه کتبی دانشگاه به شخص ثالث قابل واگذاری نیست. همچنین استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

# فهرست مطالب

## فصل اول: معرفی


۱-۱-مقدمه..... ۲

۱-۱-۱-سیستم مقاوم جانبی مهاربندی همگرا..... ۲

۱-۱-۲-مصالح نوین در کنترل سازه‌ها..... ۳

۱-۲-اهداف پایان‌نامه..... ۴

۱-۳-لزوم انجام این پژوهش..... ۶

۱-۴-روش انجام این پژوهش..... ۷

۱-۴-۱- بررسی رفتار مصالح..... ۷

۱-۴-۲- بررسی تحلیلی میراگر پیشنهادی..... ۷

۱-۴-۳- بررسی آزمایشگاهی میراگر پیشنهادی..... ۷

۱-۵- شرح فصول مختلف رساله ..... ۸


## فصل دوم: آلیاژهای حافظه‌دارشکلی، تئوری و کاربرد


۲-۱-مقدمه..... ۱۱

۲-۲-تاریخچه..... ۱۲

۲-۳-ساختار عمومی و تبدیلات فازی..... ۱۴

۲-۳-۱- اثر حافظه‌داری..... ۱۵

۲-۳-۲- اثر فوق الاستیک..... ۱۸
۲-۳-۳- رفتار نیمه فوق الاستیک..... ۲۰
۲-۴- کاربرد آلیاژهای حافظه‌دار شکلی..... ۲۰
۲-۴-۱-کاربرد در صنعت هوا و فضا..... ۲۱
۲-۴-۲-کاربردهای تجاری..... ۲۲
۲-۴-۳- کاربردهای مکانیکی..... ۲۳
۲-۴-۴- کاربرد صنعتی و حمل و نقلی..... ۲۳
۲-۴-۵- کاربردهای پزشکی..... ۲۳
۲-۴-۶- سایر کاربردها..... ۲۴
۲-۴-۷- کاربردها در مهندسی عمران..... ۲۵
۲-۴-۷-۱- استفاده از SMA در کنترل غیرفعال سازه..... ۲۵
۲-۴-۷-۲- بهسازی سازه‌های موجود با استفاده از SMA..... ۲۸
۲-۴-۷-۳- استفاده از آلیاژهای حافظه‌دار شکلی به عنوان قید ، میل مهار و آرماتور..... ۲۹
۲-۵- مدلهای رفتاری موجود..... ۳۱
۲-۵-۱- مدلهای ترمودینامیک میکروسکوپی..... ۳۱
۲-۵-۲- مدلهای ماکروسکوپیک بر اساس میکرومکانیک..... ۳۲
۲-۵-۳- مدلهای پدیده شناختی ماکروسکوپیک..... ۳۲

**فصل سوم: مروری بر تحقیقات گذشته**


۳-۱-مقدمه ..... ۳۳

۳-۲-تحقیقات موجود در زمینه رفتار ماده و مدلسازی آن ..... ۳۴

۳-۳-تحقیقات موجود در زمینه کاربرد در میراگرها، بهسازی، اتصالات و ... ..... ۳۷

۳-۴-تحقیقات موجود در زمینه کاربرد در سازه‌های مهاربندی شده ..... ۴۴

۳-۴-۱-بررسی تحلیلی نمونهای از کاربرد در سازه‌های مهاربندی شده ..... ۴۶

۳-۴-۱-۱- ساختمانهای مورد بررسی و فرضیات تحلیل ..... ۴۷

۳-۴-۱-۲- بررسی موردی قاب سه طبقه ..... ۵۰

۳-۲-۱-۳- بررسی کلی تر قابها ..... ۵۲

۳-۵-تحقیقات موجود در زمینه کاربرد میراگرهای هوشمند در مهاربندها ..... ۵۵


**فصل چهارم: بررسی آزمایشگاهی رفتار آلیاژحافظه‌دار شکلی (نیتینول)**


۴ -۱- مقدمه ..... ۶۰

۴-۲- مصالح مورد استفاده در آزمایش‌ها ..... ۶۱

۴-۲-۱-آلیاژ نیکل - تیتانیوم (نیتینول) ..... ۶۱

۴-۲-۲-فولاد نرمه ساختمانی ..... ۶۳

۴-۳-شرایط آزمایش ..... ۶۳

۴-۴-تست‌های مونوتونیک ..... ۶۵

۴-۴-۱- آزمایش کشش ساده استاندارد..... ۶۵
۴-۴-۲- آزمایش استاندارد برای تعیین تنش‌های تبدیل نیتینول..... ۷۱
۴-۴-۳- آزمایش فشار مونوتونیک استاندارد..... ۷۳
۴-۵- تست‌های سیکلیک..... ۷۷
۴-۵-۱- آزمایش کشش سیکلیک نیتینول..... ۷۸
۴-۵-۲- آزمایش فشار سیکلیک نیتینول..... ۸۰
۴-۵-۳- تست سیکلیک کشش - فشار..... ۸۳
۴-۵-۳-۱- مقایسه رفتار سیکلیک نیتینول در مصالح در کشش و فشار..... ۸۶
۴-۶- تست خستگی..... ۸۷

**فصل پنجم: بررسی مدل میراگر ترکیبی پیشنهادی به روش اجزای محدود**

۵-۱-مقدمه..... ۹۲
۵-۲- بررسی نتایج چند تحقیق مشابه..... ۹۳
۵-۳- جزئیات مدل پیشنهادی..... ۹۸
۵-۳-۱- ترکیب فولاد و نیتینول..... ۹۸
۵-۳-۲- هندسه‌ی فرض شده در بررسی به روش اجرای محدود..... ۱۰۱
۵-۴- فرضیات مدلسازی به روش اجزای محدود..... ۱۰۲
۵-۴-۱- شرایط مدلسازی، بارهای وارده، المان ها، شرایط مرزی و ... ..... ۱۰۲
۵-۴-۲- مشخصات مصالح..... ۱۰۴

۵-۴-۴- بررسی تطبیقی رفتار تحلیلی و آزمایشگاهی مصالح ..... ۱۰۶
۵-۵- نتایج مدلسازی به روش اجزای محدود ..... ۱۰۸
۵-۵-۱- ترکیب‌های مورد بررسی ..... ۱۰۸
۵-۵-۲- بررسی رفتار میراگرهای ۴ میله‌ای SF1، SF5 و SF10 ..... ۱۱۰
۵-۵-۳- بررسی رفتار میراگرهای ۵ میله‌ای SF2، SF4، SF7 و SF9 ..... ۱۱۵
۵-۵-۴- بررسی رفتار میراگرهای ۳ میله‌ای SF3 و SF8 ..... ۱۱۹
۵-۵-۵- بررسی رفتار میراگر ۹ میله‌ای SF6 ..... ۱۲۲
۵-۶- بررسی تغییرات استهلاک انرژی چرخه‌ای در میراگرها ..... ۱۲۴
۵-۷- بررسی تغییرات بازیابی کرنش در میراگرها ..... ۱۲۶
۵-۸- بررسی تغییرات استهلاک انرژی چرخه‌ای در میراگرها ..... ۱۲۷

**فصل ششم: بررسی آزمایشگاهی میراگر ترکیبی پیشنهادی**

۶-۱-مقدمه ..... ۱۳۰
۶-۲- هندسه‌ی میراگرها ..... ۱۳۱
۶-۳- مصالح مورد استفاده در آزمایش ها ..... ۱۳۶
۶-۳-۱-آلیاژ نیکل - تیتانیوم ..... ۱۳۶
۶-۳-۲-فولاد نرمه ساختمانی ..... ۱۳۷
۶-۴-شرایط آزمایش ..... ۱۳۷

۶-۵- پروتکل بارگذاری میراگرها ..... ۱۳۹
۶-۶- بررسی آزمایشگاهی میراگرها ..... ۱۳۹
۶-۶-۱- میراگرهای تیپ : SE1 ..... ۱۴۰
۶-۶-۲- میراگر : SE4 ..... ۱۴۶
۶-۶-۳- میراگر : SE5 ..... ۱۴۸
۶-۶-۴- میراگر : SE7 ..... ۱۵۱
۶-۶-۵- میراگر : SE8 ..... ۱۵۲
۶-۷- مود خرابی در میراگرها ..... ۱۵۶
۶-۸- بررسی تغییرات استهلاک انرژی چرخه‌ای در میراگرها ..... ۱۵۶
۶-۹- بررسی تغییرات بازیابی کرنش در میراگرها ..... ۱۵۸
۶-۱۰- بررسی تغییرات استهلاک انرژی چرخه‌ای در میراگرها ..... ۱۵۹

**فصل هفتم: جمع‌بندی و نتیجه‌گیری**

۷-۱- جمع‌بندی ..... ۱۶۱
۷-۲-نتایج حاصل از این پژوهش ..... ۱۶۱
۷-۳-پیشنهادات برای تحقیقات آتی ..... ۱۶۳

# فهرست اشکال ونمودارها


شکل ۲-۱ : نمایش شماتیک کریستالهای مواد حافظه‌دار شکلی در فازها مختلف..... ۱۵

شکل ۲-۲ : تبدیل فازی ماده در حالت بدون تنش و دماهای تبدیل..... ۱۶

شکل ۲-۳ : تغییر واریانت‌های ماده در حالت مارتنزیت با اعمال تنش..... ۱۶

شکل ۲-۳ : تبدیل فاز معکوس با اعمال حرارت..... ۱۷

شکل ۲-۴ : پروسه کامل اثر حافظه‌داری (SME) برای آلیاژ نیتینول..... ۱۷

شکل ۲-۵ : تبدیل فاز در اثر تغییر دما در حضور تنش..... ۱۸

شکل ۲-۶ : مسیر تبدیل در اثر فوق‌الاستیک..... ۱۹

شکل ۲-۷ : منحنی تیپ تنش-کرنش برای آلیاژ نیتینول در حالت فوق‌الاستیک..... ۱۹

شکل ۲-۸ : منحنی تیپ تنش-کرنش برای آلیاژ نیتینول در حالت نیمه فوق‌الاستیک..... ۲۰

شکل۲-۹ : کاربرد آلیاژ حافظه‌دار شکلی در کاهش صدای موتور بوئینگ..... ۲۲

شکل۲-۱۰ : کاربرد آلیاژ حافظه‌دار شکلی در عینک‌های طبی..... ۲۲

شکل ۲-۱۱ : نمونه ای از سیمهای ارتودونسی و استنت شریاینی از جنس SMA..... ۲۴

شکل ۲-۱۲ : شکل شماتیک استفاده از SMA در عایق لرزه‌ای تراز پایه..... ۲۵

شکل ۲-۱۳ : نمونه ای از دمپر از جنس آلیاژ حافظه‌دار شکلی Ti-Ni..... ۲۶

شکل ۲-۱۴ : ترکیب عملکرد دو سیستم موازی در دمپر فوق..... ۲۷

شکل ۲-۱۵ : مقایسه عملکرد سه دمپر..... ۲۷

شکل ۲-۱۶ : آزمایش اتصال نیمه صلب تیر به ستون تقویت شده با SMA..... ۲۸

شکل ۲-۱۷: نمای پل بهسازی شده با قیودی از جنس SMA..... ۲۹

شکل ۲-۱۸: مهار از جنس SMA در تقویت و بهسازی پل..... ۲۹

شکل ۲-۱۹: مهار از جنس SMA در تقویت اتصال صلب..... ۳۰
شکل ۲-۲۰: مهار از جنس SMA در صفحات زیر ستون..... ۳۰
شکل ۲-۲۱: استفاده از آلیاژ حافظه‌دار به عنوان آرماتور..... ۳۱

شکل ۳-۱ : نمونه منحنی تنش-کرنش بدست آمده از مدل رفتاری پیشنهادی آریچیو..... ۳۵
شکل ۳-۲ : مقایسه نتایج بدست آمده از مدل رفتاری مطهری با نتایج آزمایشگاهی..... ۳۶
شکل ۳-۳ : مدل رفتاری پیشنهادی هانگ برای رفتار ماده در دمای بالا (اثر فوق‌الاستیک) ۳۷
شکل ۳-۴ : مقایسه نتایج بدست آمده از مدل رفتاری صدرنژاد با نتایج آزمایشگاهی..... ۳۸
شکل ۳-۵ : مدلهای رفتاری تحلیلی و آزمایشگاهی برای قیود استفاده شده در بهسازی پل ۴۰
شکل ۳-۶ : نمونه ای از منحنی های مقایسه رفتار پل بهسازی شده..... ۴۱
شکل ۳-۷: پل مورد بررسی..... ۴۱
شکل ۳-۸: مقایسه شتاب و تغییر مکان در دو حالت بهسازی با فولاد و آلیاژ حافظه دار..... ۴۲
شکل ۳-۹: مقایسه شتاب و تغییر مکان در دو حالت بهسازی با فولاد و آلیاژ حافظه دار..... ۴۳
شکل ۳-۱۰: نحوه تقویت اتصال گیردار تیر به ستون در تحقیق اوسل و همکاران..... ۴۳
شکل ۳-۱۱: منحنی های تنش – کرنش آلیاژ حافظه‌دار برای دماهای نورد متفاوت..... ۴۴
شکل ۳-۱۲: مدل استفاده شده در جداگرهای پی در تحقیق ویلده و همکاران..... ۴۵
شکل ۳-۱۳: نمونه ای از سازه های مورد بررسی توسط مطهری و قاسمیه..... ۴۶
شکل ۳-۱۴: مقایسه تغییرمکانهای باقیمانده در سقف قاب مورد بررسی تحت زلزله.....۴۷
شکل ۳-۱۵ : پلان و نمای ساختمان ۳ طبقه مورد بررسی ..... ۴۸
شکل ۳-۱۶ : پلان و نمای ساختمان ۶ طبقه مورد بررسی..... ۴۹

شکل ۳-۱۷ : نحوه کاربرد آلیاژ حافظه دار در عضو مهاربندی..... ۵۰
شکل ۳-۱۸ : رفتار اعضای مهاربندی فولادی..... ۵۱
شکل ۳-۱۹: رفتار اعضای مهاربندی از جنس SMA..... ۵۱
شکل ۳-۲۰: نقاط تسلیم قاب سه طبقه..... ۵۲
شکل ۳-۲۱: مقایسه تاریخچه زمانی تغییرمکان بام دو قاب سه طبقه..... ۵۳
شکل ۳-۲۲ : رفتار سیکلیلک محوری دو نوع عضو مهاربندی..... ۵۳
شکل ۳-۲۳ : دریفت حداکثر طبقات برای ساختمانهای مورد بررسی..... ۵۴
شکل ۳-۲۴ : تغییر مکان پسماند بام برای ساختمانهای مورد بررسی..... ۵۴
شکل ۳-۲۵: مقایسه عملکرد طبقه به طبقه برای ساختمان ۶ طبقه..... ۵۶
شکل ۳-۲۶: استفاده از میراگر در مهاربند Cehvron..... ۵۷
شکل ۳-۲۷: جزئیات میراگر معرفی شده توسط یانگ فنگ ژانگ..... ۵۷
شکل ۳-۲۸: جزئیات میراگر معرفی شده توسط اوزبولوت..... ۵۷
شکل ۳-۲۹: نمای سه بعدی میراگر معرفی شده توسط اوزبولوت..... ۵۸
شکل ۳-۳۰: نصب میراگرمعرفی شده توسط چاونگ شنگ در قاب..... ۵۸
شکل ۳-۳۱: جزئیات میراگر ترکیبی معرفی شده توسط چاونگ شنگ..... ۵۸
شکل ۳-۲۵: جزئیات میراگر ترکیبی معرفی شده توسط یانگ‌فنگ ژانگ..... ۵۹
شکل ۳-۲۶: عملکرد میراگر ترکیبی معرفی شده توسط یانگ‌فنگ ژانگ..... ۶۰

شکل شماره ۴-۱: نمونه میله‌های نیتینول مورد استفاده..... ۶۲
شکل شماره ۴-۲: شمای کلی دستگاه مورد استفاده در تست‌ها بزرگنمایی فک‌ها..... ۶۵

شکل شماره ۴-۳: اکستنسومتر مورد استفاده در برخی از تست‌ها..... ۶۵
شکل شماره ۴-۴: ابعاد استاندارد نمونه‌های تست کشش مطابق استاندارد آمریکا..... ۶۶
شکل شماره ۴-۵: هندسه نمونه‌های استفاده شده در تست کشش مونوتونیک استاندارد.... ۶۷
شکل شماره ۴-۶: چگونگی قرارگیری نمونه‌های کششی در دستگاه و نصب اکستنسومتر.... ۶۷
شکل شماره ۴-۷: منحنی‌های تنش-کرنش حاصل از تست کشش مونوتونیک فولاد AIII ۶۸
شکل شماره ۴-۸: منحنی‌های تنش-کرنش حاصل از تست کشش مونوتونیک نیتینول..... ۶۸
شکل شماره ۴-۹: منحنی تنش-کرنش میانگین حاصل از تست‌های کشش فولاد..... ۶۹
شکل شماره ۴-۱۰: منحنی تنش-کرنش میانگین حاصل از تست‌های کشش نیتینول..... ۶۹
شکل شماره ۴-۱۱: بقایای نمونه گسیخته شده کششی فولاد (چپ) و نیتینول (راست).... ۷۱
شکل شماره ۴-۱۲: تفاوت نوع شکست کششی فولاد (چپ) و نیتینول (راست)..... ۷۱
شکل شماره ۴-۱۳: نمودار تنش-کرنش نیتینول برای تعیین تنش‌های تبدیل..... ۷۳
شکل شماره ۴-۱۴: تعیین تنش‌های تبدیل نیتینول..... ۷۳
شکل شماره ۴-۱۵: هندسه نمونه‌های تست فشار مونوتونیک..... ۷۴
شکل شماره ۴-۱۶: قرارگیری نمونه فشاری مونوتونیک در دستگاه..... ۷۵
شکل شماره ۴-۱۷: منحنی تنش-کرنش متوسط برای تست فشار مونوتونیک فولاد..... ۷۵
شکل شماره ۴-۱۸: منحنی تنش-کرنش متوسط برای تست فشار مونوتونیک نیتینول..... ۷۶
شکل شماره ۴-۱۹: مقایسه نمونه‌های فشار مونوتونیک فولاد قبل و بعد از بارگذاری..... ۷۷
شکل شماره ۴-۲۰: مقایسه نمونه‌های فشار مونوتونیک نیتینول قبل و بعد از بارگذاری..... ۷۷
شکل شماره ۴-۲۱: هندسه نمونه‌های تست سیکلیک با عملکرد کششی و فشاری..... ۷۸
شکل شماره ۴-۲۲: پروتکل بارگذاری نمونه‌های سیکلیک کششی..... ۷۹

شکل شماره ۴-۲۳: منحنی تنش-کرنش میانگین نمونه‌های سیکلیک کششی نیتینول..... ۸۰
شکل شماره ۴-۲۴: پروتکل بارگذاری نمونه‌های سیکلیک فشاری..... ۸۲
شکل شماره ۴-۲۵: منحنی تنش-کرنش میانگین نمونه‌های سیکلیک فشاری نیتینول..... ۸۲
شکل شماره ۴-۲۶: پروتکل بارگذاری نمونه‌های سیکلیک کشش-فشار..... ۸۴
شکل شماره ۴-۲۷: منحنی تنش-کرنش نمونه‌های سیکلیک کششی- فشاری نیتینول..... ۸۴
شکل شماره ۴-۲۸: منحنی تنش-کرنش نمونه‌های سیکلیک کششی- فشاری فولاد..... ۸۶
شکل شماره ۴-۲۹: مقایسه منحنی تنش-کرنش نیتینول در بارگذاری کششی و فشاری.....۸۷
شکل شماره ۴-۳۰: منحنی خستگی فولاد..... ۹۰
شکل شماره ۴-۳۱: منحنی خستگی نیتینول..... ۹۰
شکل شماره ۴-۳۲: مقایسه منحنی خستگی نیتینول وفولاد..... ۹۰

شکل ۵-۱: روش تقویت مهاربندها با آلیاژ نیتینول در تحقیق فوگازا و همکاران..... ۹۵
شکل ۵-۲: مقایسه تغییرمکان نسبی حداکثر طبقات قاب های ۶ طبقه..... ۹۶
شکل ۵-۳: مقایسه تغییرمکان نسبی پسماند طبقات قاب های ۶ طبقه..... ۹۶
شکل ۵-۴: مقایسه تغییرمکان نسبی حداکثر طبقات قاب های ۶ طبقه..... ۹۷
شکل ۵-۵: مقایسه تغییرمکان نسبی پسماند طبقات قاب های ۶ طبقه..... ۹۷
شکل ۵-۶: میراگر اصطکاکی تقویت شده با سیم های حافظه دار شکلی..... ۹۸
شکل ۵-۷: رفتار هیسرزیس میراگر در سه سطح مختلف از اصطکاک بین بلوک ها.....۹۸
شکل ۵-۸: رفتار سیکلیک مهاربند کمانش تاب ، میراگر اصطکاکی و بدون اصطکاک..... ۹۹
شکل ۵-۹: میراگر ترکیبی با فولاد و حافظه دار شکلی..... ۹۹

شکل ۵-۱۰: منحنی شماتیک رفتاری آلیاژ حافظه دار ، فولاد و ترکیب هر دو مصالح..... ۱۰۲
شکل ۵-۱۱: هندسه مدل فرض شده در مدلسازی به روش اجزای محدود..... ۱۰۳
شکل شماره ۵-۱۲: پروتکل بارگذاری نمونه‌های سیکلیک کشش-فشار..... ۱۰۵
شکل شماره ۵-۱۳: منحنی رفتاری فولاد ساختمانی در مدلسازی اجزای محدود..... ۱۰۶
شکل شماره ۵-۱۴: منحنی رفتاری نیتینول در مدلسازی به روش اجزای محدود..... ۱۰۷
شکل شماره ۵-۱۵: بررسی تطابق رفتار مصالح فولادی در مدل و آزمایش..... ۱۰۸
شکل شماره ۵-۱۶: بررسی تطابق رفتار نیتینول در مدل و آزمایش کشش استاندارد..... ۱۰۹
شکل شماره ۵-۱۷: بررسی تطابق رفتار نیتینول در مدل و آزمایش سیکلیک.....۱۰۹
شکل شماره ۵-۱۸: هندسه مدل اجزای محدود نمونه (مدل SF7) ..... ۱۱۱
شکل شماره ۵-۱۹: تغییرمکان اعمال شده در کرنش حداکثر در مدل SF7 ..... ۱۱۱
شکل شماره ۵-۲۰: تنش در راستای اعمال نیرو در کرنش حداکثر در مدل SF7 .....۱۱۲
شکل شماره ۵-۲۱: آرایش میله ها در میراگر های ۴ میله ای..... ۱۱۲
شکل شماره ۵-۲۲: منحنی نیرو-تغییرمکان میراگر SF1..... ۱۱۳
شکل شماره ۵-۲۳: منحنی تنش-کرنش میراگر SF1..... ۱۱۳
شکل شماره ۵-۲۴: منحنی نیرو-تغییرمکان میراگر SF10..... ۱۱۴
شکل شماره ۵-۲۵: منحنی تنش-کرنش میراگر SF10 .....۱۱۴
شکل شماره ۵-۲۶: منحنی نیرو-تغییرمکان میراگر SF5..... ۱۱۴
شکل شماره ۵-۲۷: منحنی تنش-کرنش میراگر SF5 .....۱۱۵
شکل شماره ۵-۲۸: آرایش میله ها در میراگر های ۵ میله ای..... ۱۱۷
شکل شماره ۵-۲۹: منحنی نیرو-تغییرمکان میراگر SF2..... ۱۱۷

شکل شماره ۵-۳۰: منحنی تنش-کرنش میراگر SF2 ..... ۱۱۸
شکل شماره ۵-۳۱: منحنی نیرو-تغییرمکان میراگر SF4..... ۱۱۸
شکل شماره ۵-۳۲: منحنی تنش-کرنش میراگر SF4 ..... ۱۱۸
شکل شماره ۵-۳۳: منحنی نیرو-تغییرمکان میراگر SF7..... ۱۱۹
شکل شماره ۵-۳۴: منحنی تنش-کرنش میراگر SF7..... ۱۱۹
شکل شماره ۵-۳۵: منحنی نیرو-تغییرمکان میراگر SF9..... ۱۱۹
شکل شماره ۵-۳۶: منحنی تنش-کرنش میراگر SF9 ..... ۱۲۰
شکل شماره ۵-۳۷: آرایش میله ها در میراگر های ۳ میله ای..... ۱۲۱
شکل شماره ۵-۳۸: منحنی نیرو-تغییرمکان میراگر SF3..... ۱۲۲
شکل شماره ۵-۳۹: منحنی تنش-کرنش میراگر SF3..... ۱۲۲
شکل شماره ۵-۴۰: منحنی نیرو-تغییرمکان میراگر SF8..... ۱۲۲
شکل شماره ۵-۴۱: منحنی تنش-کرنش میراگر SF8..... ۱۲۳
شکل شماره ۵-۴۲: آرایش میله ها در میراگر های ۹ میله ای..... ۱۲۴
شکل شماره ۵-۴۳: منحنی نیرو-تغییرمکان میراگر SF6..... ۱۲۵
شکل شماره ۵-۴۴: منحنی تنش-کرنش میراگر SF6..... ۱۲۵
شکل شماره ۵-۴۵: استهلاک انرژی چرخه‌ای کل نرمالیزه شده میراگرها..... ۱۲۷
شکل شماره ۵-۴۶: مقادیر نرمالیزه شده بازیابی کرنش ها در هر سیکل برای هر میراگر..... ۱۲۸
شکل شماره ۵-۴۷: شکل ۵-۴۷: بررسی روند استهلاک انرژی و بازیابی کرنش‌ها..... ۱۲۹

شکل ۶-۱: هندسه میراگر در آزمایشات..... ۱۳۳

شکل ۶-۲: صفحات انتهایی (نمای بالا و پایین صفحه) ..... ۱۳۴

شکل ۶-۳: هندسه میله‌های باربر اصلی.....۱۳۴

شکل ۶-۴: نحوه اتصال میله‌ها با دو مهره در بالا و پایین به صفحات انتهایی.....۱۳۵

شکل ۶-۵: میراگر پیش از ریختن گروت، اندود میله‌ها با یک لایه قیر.....۱۳۵

شکل ۶-۶: نمونه کامل شده از یک میراگر..... .....۱۳۶

شکل ۶-۷: فاصله موجود بین صفحه فوقانی و سطح گروت.....۱۳۷

شکل شماره ۶-۸: شمای کلی دستگاه مورد استفاده در تست‌ها و بزرگنمایی فک‌ها.....۱۳۹

شکل شماره ۶-۹: پروتکل بارگذاری میراگرها..... ..... ۱۴۰

شکل شماره ۶-۱۰: جزئیات قرارگیری میراگرها در دستگاه.....۱۴۲

شکل شماره ۶-۱۱: منحنی نیرو-تغییرمکان میراگر SE1 – نمونه اول.....۱۴۲

شکل شماره ۶-۱۲: منحنی تنش-کرنش میراگر SE1 – نمونه اول.....۱۴۳

شکل شماره ۶-۱۳: منحنی نیرو-تغییرمکان میراگر SE1 – نمونه دوم.....۱۴۳

شکل شماره ۶-۱۴: منحنی تنش-کرنش میراگر SE1 – نمونه دوم.....۱۴۳

شکل شماره ۶-۱۵: مقایسه منحنی‌های تنش-کرنش میراگرهای تیپ SE1.....۱۴۴

شکل شماره ۶-۱۶: مقایسه منحنی‌های تنش-کرنش میراگر SE1 و تست سیکلیک فولاد ۱۴۴

شکل شماره ۶-۱۷: جزئیات محل قرارگیری میله‌های در گروت و سطح صیقلی سوراخ.....۱۴۵

شکل شماره ۶-۱۸: مقایسه تطابق منحنی‌های تنش-کرنش میراگرهای SF1 و SE1.....۱۴۶

شکل شماره ۶-۱۹: منحنی نیرو-تغییرمکان میراگر SE4.....۱۴۸

شکل شماره ۶-۲۰: منحنی تنش-کرنش میراگر SE4.....۱۴۸

شکل شماره ۶-۲۱: مقایسه تطابق منحنی‌های تنش-کرنش میراگرهای SF4 و SE4.....۱۴۸