



پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله

پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد  
مهندسی عمران - مهندسی زلزله

موضوع

مطالعات آزمایشگاهی بر روی یک میراگر ویسکوز غیرخطی کنترل‌پذیر  
برای سازه‌های جداسازی شده‌ی پایه در حوزه‌ی نزدیک

دانشجو:

حسین پزشکی

استاد راهنما:

دکتر منصور ضیایی‌فر



به نام آنکه جان را فکرت آموخت

چراغ دل به نور جان برافروخت

ز فیض خاک آدم گشت گلشن

ز فضلش هر دو عالم گشت روشن

پیشکش به

پدر و مادرم که همواره پشتیبانم هستند،

برادرانم که یاری رسانم می باشند،

و هر آنکه مرا کلمه ای آموخته است.

سپاس گذارم از دکتر ضیایی‌فر، استاد راهنمای این مطالعه،  
و از راهنمایی‌ها و یاری‌های ایشان که در تمامی مراحل مبین راه بوده است، از زحماتی را که ایشان در مراحل  
مختلف متحمل شده‌اند، قدردانی بی‌حد خویش را ابراز می‌دارم.  
بر خود می‌دانم که تلاش‌های مهندس مرتضایی، مهندس جبارزاده و مجموعه‌ی کارکنان آزمایشگاه سازه  
پژوهشگاه زلزله شناسی و مهندسی زلزله که در بخش مطالعات آزمایشگاهی یاری‌رسان بوده‌اند و همچنین از  
شرکت ارتعاش میلاد بابت ساخت نمونه میراگر قدردان باشم.

## چکیده

در طول چند دهه اخیر تحقیقات بسیاری مرتبط با قطعات مستهلک کننده انرژی انجام شده است که میراگرهای ویسکوز نیز به عنوان بخشی از قطعات مستهلک کننده انرژی کاربرد گسترده‌ای داشته‌اند. ضیایی فر و فروغی کیا ۱۳۸۵، میراگر نوینی را ارائه کرده‌اند که با استفاده از قطعات آکاردئونی و از طریق میرایی ویسکوز قادر به اتلاف انرژی می‌باشد. این میراگر دارای محدودیت ظرفیت نیرویی بوده است و همچنین آزمایش‌های انجام شده بر آن نقص‌هایی را نشان داده‌اند.

در این مطالعه سعی بر ساخت نمونه‌ای جدید بر مبنای مطالعه‌ی ضیایی فر و فروغی کیا ضمن برطرف ساختن معایب آن و ایجاد میرایی غیرخطی بوده است. از این جمله، تغییر شکل قطعات آکاردئونی بوده است که با استفاده از حلقه‌های محیطی کنترل شده است و همچنین با استفاده از این حلقه‌ها ظرفیت میراگر از ۵ تن نیرو در نمونه‌ی قبلی به حدود ۲۵ تن نیرو افزایش یافته است و دامنه‌ی تغییرمکانی میراگر نیز از ۳۰ میلیمتر به ۶۵ میلیمتر ارتقا یافته است. رفتار میراگر تحت آزمایش‌های چرخه‌ای مورد بررسی قرار گرفته است و با استفاده از مدل‌های رفتاری کلوین و ماکسول، مشخصات رفتاری میراگر نمونه استخراج شده است. سعی شده است که با استفاده از شیارهای پله‌ای رفتار میرایی غیرخطی در میراگر ایجاد شود که این امر تا حدودی موفقیت آمیز بوده است، اما با توجه به پله‌ای بودن شیارها، این اثر در دامنه‌های مختلف متفاوت می‌باشد. در دامنه‌های کمتر از ۳۵ میلیمتر توان سرعت برابر ۰/۹۳ و در دامنه‌های بیشتر از ۳۵ میلیمتر در حدود ۰/۷ می‌باشد.

در این مطالعه، کاربرد میراگر ویسکوزی در جداسازی پایه با فرض میراگر ایده‌آلی در سه وضعیت رفتار میرایی خطی، رفتار میرایی غیرخطی و میراگری با رفتار خطی کنترل‌پذیر نیز مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به آنکه در مطالعات محققین مختلفی نظیر هال و همکاران ۱۹۹۵، هیتون و همکاران ۱۹۹۵، رفتار سازه‌ی جداسازی شده در حوزه‌ی نزدیک، به علت وجود پالس سرعت به چالش کشیده شده است، رفتار سازه‌ی جداسازی در سه وضعیت میراگر ایده‌آل که بیان شده‌اند، تحت اثر زمین‌لرزه‌های حوزه‌ی نزدیک و دور نیز به صورت مورد بررسی مختصر قرار گرفته است و اثرات سه وضعیت میراگر ایده‌آل تبیین شده است.

## واژگان کلیدی

میراگر ویسکوز، آزمایش‌های چرخه‌ای، میرایی خطی و غیرخطی، جداسازی پایه، زمین‌لرزه‌ی حوزه نزدیک، جهت‌پذیری، پالس سرعت

## فهرست مطالب

### «پیشگفتار»

۲	مقدمه.....
۴	چالش‌های مطالعه‌ی حاضر.....
۵	فصل‌بندی.....

### فصل اول

#### «مروری بر ادبیات فنی»

۷	۱-۱ مقدمه.....
۷	۲-۱ کنترل سازه‌ها.....
۸	۱-۲-۱ سیستم‌های کنترل غیرفعال.....
۱۰	۱-۲-۱-۱ میراگرهای اصطکاکی.....
۱۱	۲-۱-۲-۱ میراگرهای ویسکوالاستیک.....
۱۲	۳-۱-۲-۱ میراگرهای ویسکوز.....
۱۳	۲-۲-۱ سیستم‌های کنترل فعال و کنترل هیبرید.....
۱۴	۳-۲-۱ سیستم‌های کنترل نیمه‌فعال.....
۱۴	۱-۳-۲-۱ میراگرهای روزنه متغیر.....
۱۵	۲-۳-۲-۱ میراگرهای با سیال کنترل‌پذیر.....
۱۷	۳-۱ جداسازی پایه.....
۱۸	۱-۳-۱ اثرات انعطاف‌پذیری.....
۱۹	۲-۳-۱ تناسبات جداسازی لرزه‌ای.....
۲۰	۳-۳-۱ تجهیزات جداساز لرزه‌ای.....
۲۱	۱-۳-۳-۱ سیستم‌های بر پایه الاستومر.....
۲۳	۲-۳-۳-۱ سیستم‌های جداسازی بر مبنای لغزش.....
۲۴	۴-۱ حوزه‌ی نزدیک.....
۲۶	۱-۴-۱ جهت‌گیری انتشار شکست.....
۲۹	۲-۴-۱ جابجایی ماندگار زمین.....
۳۰	۳-۴-۱ محتوای فرکانس بالا.....
۳۱	۴-۴-۱ استخراج پالس، زمان تناوب پالس.....

## فصل دوم

### «طراحی، ساخت میراگر و پیکربندی آزمایش»

۳۴	۱-۲ مقدمه
۳۴	۲-۲ اجزای میراگرهای ویسکوز معمول
۳۵	۳-۲ اجزای میراگر پیشنهادی
۴۱	۴-۲ مراحل آزمایش اولیه
۴۱	۱-۴-۲ پیکربندی اولیه آزمایش
۴۲	۲-۴-۲ مرحله اول آزمایش مقدماتی
۴۳	۳-۴-۲ مرحله دوم آزمایش مقدماتی
۴۴	۴-۴-۲ مرحله سوم آزمایش مقدماتی
۴۶	۵-۲ مرحله ی آزمایش نهایی
۴۶	۱-۵-۲ پیکربندی نهایی آزمایش
۴۷	۲-۵-۲ آزمایش نهایی
۴۸	۶-۲ جمع بندی

## فصل سوم

### «آزمایش ها و رفتار میراگر»

۵۱	۱-۳ مقدمه
۵۱	۲-۳ آزمایش های انجام شده توسط محققین
۵۳	۳-۳ آزمایش های انجام شده بر روی میراگر
۵۵	۴-۳ معرفی مدل های رفتاری
۵۹	۵-۳ مدل سازی های انجام شده توسط محققین
۶۶	۶-۳ مدل سازی رفتاری میراگر نمونه
۸۷	۷-۳ جمع بندی

## فصل چهارم

### «مدلسازی و تحلیل سازه جداسازی شده»

۹۰	۱-۴ مقدمه
۹۰	۲-۴ مدل سازی سازه ی جداسازی شده
۹۱	۳-۴ معرفی مدل
۹۳	۴-۴ رفتار دینامیکی
۹۴	۵-۴ جداسازی لرزه ای در حوزه ی نزدیک
۹۶	۶-۴ نگاهشتهای مورد استفاده برای تحلیل

۹۷.....۷-۴ تحلیل پاسخ مدل تحت اثر شتاب‌نگاشت‌ها

۹۸.....۱-۷-۴ میراگر با رفتار خطی و غیرخطی

۱۰۶.....۲-۷-۴ میراگر کنترل‌پذیر

۱۱۱.....۸-۴ جمع بندی

## فصل پنجم

### «نتایج و پیشنهادات»

۱۱۳.....۱-۵ نتایج

۱۱۵.....۲-۵ پیشنهادات

۱۱۸.....«مراجع»

۱۲۳.....پیوست یک

### «منحنی‌های نیرو-تغییر مکان آزمایش‌ها»

۱۲۷.....پیوست دو

### «طیف نگاشت‌های مورد استفاده»



## فهرست اشکال

- شکل ۱-۱: طرح کلی سیستم‌های مختلف کنترل (الف) روش معمول، (ب) کنترل غیرفعال، (ج) کنترل فعال، (د) کنترل هیبرید، و (ه) کنترل نیمه فعال [۵]..... ۹
- شکل ۱-۲: نمونه‌ی میراگر اصطکاکی [۱۱]..... ۱۰
- شکل ۱-۳: نمونه‌ی میراگر ویسکوالاستیک [۷]..... ۱۱
- شکل ۱-۴: طرح کلی میراگر ویسکوز [۷]..... ۱۳
- شکل ۱-۵: طرح کلی میراگر ویسکوز روزنه متغیر [۷]..... ۱۴
- شکل ۱-۶: نمای ظاهری میراگر ویسکوز کنترل پذیر [۱۲]..... ۱۵
- شکل ۱-۷: طرح کلی میراگرهای با سیال کنترل پذیر [۸]..... ۱۶
- شکل ۱-۸: اثر زمین لرزه در سازه (الف) سازه‌ی متداول (پایه گیردار)، (ب) سازه‌ی جداسازی شده پایه [۱۶]..... ۱۷
- شکل ۱-۹: مدل برش خورده‌ی نشیمنهای لایه‌ای [۱۷]..... ۲۱
- شکل ۱-۱۰: مدل برش خورده‌ی نشیمنهای با هسته‌ی سربی [۱۴]..... ۲۲
- شکل ۱-۱۱: (الف) مقطعی از آونگ‌های اصطکاکی [۱۷]، (ب) نمونه‌ای از آونگ‌های اصطکاکی [۱۴]..... ۲۳
- شکل ۱-۱۲: اثرات تجمع انرژی لرزه‌ای [۲۸]..... ۲۶
- شکل ۱-۱۳: تعریف ناحیه‌های با جهت‌گیری پیشرونده، پسرونده و خنثی [۲۸]..... ۲۷
- شکل ۱-۱۴: نگاشتهای ثبت شده در سه ناحیه مختلف، در زمین لرزه‌ی لندرز [۳۱]..... ۲۸
- شکل ۱-۱۵: طرح کلی تاریخچه زمانی جابجایی برای دو نوع گسلش امتداد لغز و شیب لغز، که در آن پالس ناشی از جهت‌گیری و جابجایی ماندگار، جداگانه و در ترکیب با هم نمایش داده شده است [۲۹]..... ۲۹
- شکل ۱-۲: طرح کلی میراگر ویسکوز [۷]..... ۳۴
- شکل ۲-۲: برش بلوز، بخشی از اتصال آکاردئونی..... ۳۵
- شکل ۲-۳: (الف) طرح کلی میراگر، (ب) عملکرد میراگر تحت کشش، (ج) عملکرد میراگر تحت فشار..... ۳۶
- شکل ۲-۴: (الف) نمونه‌ای از حلقه‌های محصورکننده‌ی طراحی شده برای بلوزها، (ب) بلوز طراحی شده، (ج) برشی سه‌بعدی از بلوز..... ۳۷
- شکل ۲-۵: نمونه بلوز ساخته شده..... ۳۸
- شکل ۲-۶: قطعات مختلف میراگر..... ۳۸
- شکل ۲-۷: طرح کلی میراگر ساخته شده..... ۳۹
- شکل ۲-۸: قطعات میراگر قبل از نصب نهایی..... ۴۰
- شکل ۲-۹: پیکربندی اولیه طراحی شده..... ۴۱
- شکل ۲-۱۰: پیکربندی نمونه در آزمایشگاه - مرحله مقدماتی..... ۴۱
- شکل ۲-۱۱: پولکی‌های جوش شده به بدنه..... ۴۲
- شکل ۲-۱۲: شیارهای طراحی شده..... ۴۲
- شکل ۲-۱۳: شیار ایجاد شده بر روی میله..... ۴۳
- شکل ۲-۱۴: تغییرشکل موضعی در اثر انحراف محرک..... ۴۴

- شکل ۲-۱۵: شیارهای جدید ایجاد شده ..... ۴۴
- شکل ۲-۱۶: (الف) و (ب) تغییرات انجام شده در دو سر میراگر، (ج) قرارگیری در دستگاه رول-امسلر ..... ۴۵
- شکل ۲-۱۷: رفتار میراگر در آزمایش ۶ ثانیه؛ در دستگاه رول-امسلر ..... ۴۵
- شکل ۲-۱۸: پیکربندی نهایی طراحی شده ..... ۴۶
- شکل ۲-۱۹: پیکربندی نمونه در آزمایشگاه- مرحله نهایی ..... ۴۷
- شکل ۲-۲۰: (الف) هسته‌ی میراگر، (ب) نحوه‌ی قراگیری هسته‌ی میراگر حین پر کردن مخازن ..... ۴۹
- شکل ۳-۱: (الف) مدل رفتاری کلومین، (ب) مدل رفتاری ماکسول ..... ۵۶
- شکل ۳-۲: (الف) مدل رفتار کلومین، (ب) مولفه‌ی سختی خطی خالص، (ج) مولفه‌ی میرایی خالص ..... ۵۷
- شکل ۳-۳: مدل رفتاری ماکسول ..... ۵۷
- شکل ۳-۴: طرح کلی مدل‌سازی میراگر، کورینو و همکاران [۱۲] ..... ۶۶
- شکل ۳-۵: تغییر حجم بلوز تحت اثر فشار سیال ..... ۷۰
- شکل ۳-۶: مدل‌سازی اولیه‌ی میراگر نمونه و پیکربندی ..... ۷۰
- شکل ۴-۱: سازه‌ی جداسازی شده با جرم  $M$ ، سختی جداساز  $K_b$  و میرایی ویسکوز  $C_b$  ..... ۹۰
- شکل ۴-۲: مشخصه‌های سازه‌ای مدل دو درجه آزادی سازه‌ی جداسازی شده [۱۴] ..... ۹۱
- شکل ۴-۳: مشخصه‌های سازه‌ای مدل دو درجه آزادی سازه‌ی جداسازی شده مورد نظر ..... ۹۲
- شکل ۴-۴: مدل مکانیکی میراگر نصب شده [۱۲] ..... ۱۰۷
- شکل ۵-۱: ایجاد سوراخ راه به در برای جلوگیری از گیرافتادن هوا در مخزن میراگر ..... ۱۱۵
- شکل ۵-۲: ایجاد اصطکاک بین صفحات دو سر و غلاف ..... ۱۱۶
- شکل ۵-۳: محل قرارگیری شیر کنترلی در درون غلاف میراگر ..... ۱۱۷
- شکل ۵-۴: محل نصب شیرکنترلی بر روی میراگر ..... ۱۱۷

## فهرست نمودارها

- نمودار ۱-۱: منحنی رفتار ایده‌آل میراگر اصطکاکی [۸]..... ۱۱
- نمودار ۱-۲: منحنی رفتار ایده‌آل میراگر ویسکوالاستیک [۸]..... ۱۲
- نمودار ۱-۳: منحنی رفتار ایده‌آل میراگر ویسکوز [۸]..... ۱۳
- نمودار ۱-۴: اثر انعطاف‌پذیری بر سازه (الف) افزایش زمان تناوب و میرایی باعث کاهش شتاب سازه می‌شود، (ب) افزایش میرایی در مورد جابجایی نیز اثر کاهنده دارد [۱۳]..... ۱۸
- نمودار ۱-۵: تاریخچه زمانی سرعت مولفه‌های موازی و عمود بر گسل، در ایستگاه نزدیک گسل با جهت‌گیری پیشرونده ملواند اُورپس، در زمین‌لرزه‌ی امپریال ولی [۳۰]..... ۲۸
- نمودار ۱-۶: طیف فوریه نگاشت سه ایستگاه زمین‌لرزه‌ی مورگان هیل ۱۹۸۴ [۳۳]..... ۳۰
- نمودار ۱-۷: نگاشتهای سرعت اصلی، پالس و زمینه، زمین‌لرزه‌ی امپریال ولی ۱۹۷۹، نگاشت السترو [۳۵]..... ۳۲
- نمودار ۱-۳: منحنی نیرو-جابجایی حاصل از آزمایش در فرکانس ۱/۱۱۱ هرتز..... ۵۵
- نمودار ۲-۳: اثر تغییر توان سرعت بر منحنی نیرو-جابجایی [۳۹]..... ۵۶
- نمودار ۳-۳: میرایی و سختی در برابر فرکانس در مدل ماکسول [۴۳]..... ۵۸
- نمودار ۳-۴: منحنی نیرو-سرعت آزمایش‌های تیلور و کانستانتینو [۴۰]..... ۵۹
- نمودار ۳-۵: منحنی نیرو-سرعت آزمایش‌های اسلیما و کانستانتینو، میراگرهای خطی و غیرخطی [۳۸]..... ۶۲
- نمودار ۳-۶: مقایسه بین نتایج تحلیلی و آزمایشگاهی در موارد سختی ذخیره، ضریب میرایی و اختلاف فاز برای میراگر خطی [۳۸]..... ۶۳
- نمودار ۳-۷: نیروهای حداکثر آزمایش‌ها و سرعت متناظر و خط برازش شده بر آنها [۳۹]..... ۶۴
- نمودار ۳-۸: نتیجه‌ی آزمایش (—) و تحلیل (— —) برای آزمایش انتخاب شده [۳۹]..... ۶۴
- نمودار ۳-۹: مقدار میرایی در برابر فرکانس بارگذاری، نتایج آزمایش‌های ضیایی فر و همکاران [۴۸]..... ۶۵
- نمودار ۳-۱۰: منحنی لگاریتم نیرو بر حسب سرعت-فرکانس ۰/۵ هرتز، ضیایی فر و همکاران [۴۸]..... ۶۵
- نمودار ۳-۱۱: منحنی نیرو-تغییر مکان میراگر، فرکانس ۰/۲۵ هرتز..... ۶۷
- نمودار ۳-۱۲: منحنی نیرو-تغییر مکان میراگر، فرکانس ۰/۰۱ هرتز-آزمایش اصطکاکی..... ۶۸
- نمودار ۳-۱۳: مقایسه نتایج آزمایش و تحلیل، منحنی نیرو-تغییر مکان میراگر، فرکانس ۰/۰۱ هرتز-آزمایش اصطکاکی..... ۶۸
- نمودار ۳-۱۴: نتیجه‌ی آزمایش، منحنی نیرو-تغییر مکان میراگر، فرکانس ۰/۳۳۳ هرتز..... ۶۹
- نمودار ۳-۱۵: منحنی نیرو-تغییر مکان آزمایش ۱ هرتز، دامنه ۱۰ میلی‌متر..... ۷۱
- نمودار ۳-۱۶: منحنی نیرو-تغییر مکان چرخه‌ی دوم آزمایش ۱ هرتز، دامنه ۱۰ میلی‌متر..... ۷۱
- نمودار ۳-۱۷: مجموع نیروی اصطکاک و فنریت بلوزها، آزمایش ۱ هرتز، دامنه ۱۰ میلی‌متر..... ۷۲
- نمودار ۳-۱۸: منحنی نیرو-تغییر مکان اصلاح شده، آزمایش ۱ هرتز، دامنه ۱۰ میلی‌متر..... ۷۲
- نمودار ۳-۱۹: منحنی نماینده‌ی تغییر حجم..... ۷۳
- نمودار ۳-۲۰: منحنی ایده‌آل در ۰/۸ هرتز، دامنه‌ی کاهش یافته..... ۷۳
- نمودار ۳-۲۱: منحنی ایده‌آل در ۰/۸ هرتز، دامنه‌ی اصلاح شده..... ۷۴
- نمودار ۳-۲۲: منحنی ایده‌آل و آزمایش در ۰/۸ هرتز، دامنه‌ی اصلاح شده..... ۷۴

- نمودار ۳-۲۳: منحنی آزمایش‌های هشتم و سیزدهم در ۱/۱۱۱ هرتز..... ۷۵
- نمودار ۳-۲۴: منحنی سرعت و نیرو، آزمایش ۰/۸ هرتز..... ۷۶
- نمودار ۳-۲۵: منحنی لگاریتم سرعت-لگاریتم نیرو..... ۷۶
- نمودار ۳-۲۶: منحنی نیرو-تغییر مکان ایده‌آل در برابر آزمایش، آزمایش ۰/۸ هرتز، با توان سرعت ۰/۵۴..... ۷۷
- نمودار ۳-۲۷: منحنی نیرو-تغییر مکان ایده‌آل در برابر آزمایش، آزمایش ۰/۸ هرتز، با توان سرعت ۰/۶۱..... ۷۷
- نمودار ۳-۲۸: منحنی لگاریتم سرعت-لگاریتم نیرو، آزمایش ۰/۸ هرتز..... ۷۸
- نمودار ۳-۲۹: محاسبه‌ی میرایی با استفاده از نتایج تاریخچه زمانی، مدل ماکسول..... ۷۹
- نمودار ۳-۳۰: محاسبه‌ی میرایی با استفاده از نتایج تاریخچه زمانی، مدل کلوین..... ۷۹
- نمودار ۳-۳۱: محاسبه‌ی میرایی با استفاده از نتایج تاریخچه زمانی، میرایی خطی..... ۸۰
- نمودار ۳-۳۲: میرایی و سختی مدل ماکسول در برابر فرکانس بارگذاری..... ۸۱
- نمودار ۳-۳۳: نمودار نیرو-جابجایی و نمودار نیرو-سرعت، آزمایش ۰/۳۳۳ هرتز..... ۸۱
- نمودار ۳-۳۴: نمودار نیرو-جابجایی و نمودار نیرو-سرعت، آزمایش ۰/۵ هرتز..... ۸۱
- نمودار ۳-۳۵: نمودار نیرو-جابجایی و نمودار نیرو-سرعت، آزمایش ۰/۸ هرتز..... ۸۲
- نمودار ۳-۳۶: نمودار نیرو-جابجایی و نمودار نیرو-سرعت، آزمایش ۱ هرتز، دامنه‌ی ۳۰/۲۵ میلی‌متر..... ۸۲
- نمودار ۳-۳۷: نمودار نیرو-جابجایی و نمودار نیرو-سرعت، آزمایش ۱ هرتز، دامنه‌ی ۲۷/۹۳ میلی‌متر..... ۸۲
- نمودار ۳-۳۸: نمودار نیرو-جابجایی و نمودار نیرو-سرعت، آزمایش ۱/۱۱۱ هرتز..... ۸۳
- نمودار ۳-۳۹: نمودار نیرو-جابجایی و نمودار نیرو-سرعت، آزمایش ۱/۳۳۳ هرتز..... ۸۳
- نمودار ۳-۴۰: میرایی و سختی مدل کلوین در برابر فرکانس بارگذاری..... ۸۴
- نمودار ۳-۴۱: نمودار نیرو-جابجایی و نمودار نیرو-سرعت، آزمایش ۱/۰۰ هرتز، دامنه‌ی ۲۵/۲۰ میلی‌متر، مقایسه‌ی بین مدل کلوین و مدل ماکسول..... ۸۵
- نمودار ۳-۴۲: نمودار نیرو-جابجایی و نمودار نیرو-سرعت، آزمایش ۰/۳۳۳ هرتز، مدلسازی با استفاده از مدل کلوین غیرخطی..... ۸۵
- نمودار ۳-۴۳: نمودار نیرو-جابجایی و نمودار نیرو-سرعت، آزمایش ۰/۵ هرتز، مدلسازی با استفاده از مدل کلوین غیرخطی..... ۸۶
- نمودار ۳-۴۴: مقایسه‌ی منحنی آزمایش و منحنی ایده‌آل میرایی خطی و ضریب میرایی معادل..... ۸۷
- نمودار ۳-۴۵: مقایسه‌ی منحنی آزمایش و منحنی ایده‌آل میرایی خطی و ضریب میرایی معادل..... ۸۷
- نمودار ۴-۱: تغییر بیشینه‌ی متوسط تغییر مکان لایه‌ی جداساز و شتاب روسازه در برابر نسبت میرایی جداساز  $\zeta_b$ ، برای  $\gamma = 0.5$  و  $\zeta_s = 0.02$  [۴]..... ۹۶
- نمودار ۴-۲: نیروی میراگر در زمین‌لرزه‌های دارای پالس و فاقد پالس در میرایی خطی..... ۹۸
- نمودار ۴-۳: دریفت در زمین‌لرزه‌های دارای پالس و فاقد پالس در میرایی خطی..... ۹۹
- نمودار ۴-۴: تغییر مکان پایه در زمین‌لرزه‌های دارای پالس و فاقد پالس در میرایی خطی..... ۹۹
- نمودار ۴-۵: شتاب روسازه در زمین‌لرزه‌های دارای پالس و فاقد پالس در میرایی خطی..... ۹۹
- نمودار ۴-۶: نیروی میراگر در زمین‌لرزه‌های دارای پالس و فاقد پالس در میرایی غیرخطی..... ۱۰۰
- نمودار ۴-۷: دریفت روسازه در زمین‌لرزه‌های دارای پالس و فاقد پالس در میرایی غیرخطی..... ۱۰۰

- نمودار ۴-۸: تغییر مکان پایه در زمین لرزه‌های دارای پالس و فاقد پالس در میرایی غیرخطی ..... ۱۰۰
- نمودار ۴-۹: شتاب روسازه در زمین لرزه‌های دارای پالس و فاقد پالس در میرایی غیرخطی ..... ۱۰۱
- نمودار ۴-۱۰: نیروی میراگر در زمین لرزه‌های دارای پالس و فاقد پالس در دو حالت میرایی خطی و غیرخطی، فراتر از میرایی بحرانی سازه‌ی خطی ..... ۱۰۲
- نمودار ۴-۱۱: نیروی میراگر در زمین لرزه‌های دارای پالس و فاقد پالس در دو حالت میرایی خطی و غیرخطی، محدوده‌ی زیر میرایی بحرانی سازه‌ی خطی ..... ۱۰۳
- نمودار ۴-۱۲: نیروی میراگر، مقیاس شده بر مبنای زمین لرزه‌های فاقد پالس و ۲۵٪ میرایی بحرانی ..... ۱۰۳
- نمودار ۴-۱۳: نیروی میراگر، مقیاس شده بر مبنای زمین لرزه‌های دارای پالس و ۲۵٪ میرایی بحرانی ..... ۱۰۴
- نمودار ۴-۱۴: دررفت روسازه، مقیاس شده بر مبنای زمین لرزه‌های دارای پالس و ۲۵٪ میرایی بحرانی ..... ۱۰۴
- نمودار ۴-۱۵: تغییر مکان پایه، مقیاس شده بر مبنای زمین لرزه‌های دارای پالس و ۲۵٪ میرایی بحرانی ..... ۱۰۵
- نمودار ۴-۱۶: شتاب روسازه، مقیاس شده بر مبنای زمین لرزه‌های دارای پالس و ۲۵٪ میرایی بحرانی ..... ۱۰۵
- نمودار ۴-۱۷: پاسخ میراگر در دو حالت نیمه‌فعال و غیرفعال در برابر بارگذاری هارمونیک [۱۲] ..... ۱۰۷
- نمودار ۴-۱۸: نیروی میراگر در دو حالت نیمه‌فعال و غیرفعال ..... ۱۰۹
- نمودار ۴-۱۹: تغییر مکان پایه در دو حالت نیمه‌فعال و غیرفعال ..... ۱۰۹
- نمودار ۴-۲۰: دررفت روسازه در دو حالت نیمه‌فعال و غیرفعال ..... ۱۰۹
- نمودار ۴-۲۱: شتاب روسازه در دو حالت نیمه‌فعال و غیرفعال ..... ۱۱۰

## فهرست جداول

- جدول ۱-۲: خلاصه نتایج مراحل مختلف آزمایش ..... ۴۸
- جدول ۱-۳: آزمایش‌های انجام شده توسط محققین ..... ۵۳
- جدول ۲-۳: آزمایش‌های مد نظر برای انجام ..... ۵۴
- جدول ۳-۳: مقایسه‌ی آزمایش‌های انجام شده و نتیجه‌ی آزمایش‌ها در دامنه و سرعت تحریک ..... ۵۵
- جدول ۳-۴: آزمایش‌های انتخاب شده برای بررسی رفتاری میراگر نمونه ..... ۷۵
- جدول ۳-۵: نتایج مدلسازی ماکسول ..... ۸۰
- جدول ۳-۶: مقایسه حداکثرهای نیرو، سرعت و جابجایی بین مدل ماکسول و حاصل از آزمایش ..... ۸۳
- جدول ۳-۷: نتایج مدلسازی ماکسول در مقایسه با مدلسازی کلونین ..... ۸۴
- جدول ۳-۸: محاسبه‌ی ضریب میرایی معادل ..... ۸۶
- جدول ۳-۹: نتایج کلی روشهای مختلف مدلسازی ..... ۸۸
- جدول ۱-۴: مشخصه‌های سازه‌ای سیستم‌های مورد نظر ..... ۹۳
- جدول ۲-۴: مقادیر  $I$  و  $\varepsilon$  ..... ۹۳
- جدول ۳-۴: نگاهت‌های دارای پالس ..... ۹۷
- جدول ۴-۴: نگاهت‌های فاقد پالس ..... ۹۷
- جدول ۴-۵: متوسط نسبت مقادیر پاسخ‌ها در برابر نگاهت‌های دارای پالس به مقدار مشابه آن در برابر نگاهت‌های فاقد پالس، در محدوده‌ی کمتر از میرایی ۵۰٪ میرایی بحرانی ..... ۱۰۱
- جدول ۴-۶: متوسط نسبت پاسخ‌ها تحت اثر نگاهت‌های دارای پالس به نگاهت‌های فاقد پالس ..... ۱۰۲
- جدول ۴-۷: اختلاف میان پاسخ‌های ناشی از زمین‌لرزه‌های دارای پالس، سازه‌ی با زمان تناوب گیرداری ۰/۷۵۴ ثانیه ..... ۱۰۵
- جدول ۴-۸: اختلاف میان پاسخ‌های ناشی از زمین‌لرزه‌های فاقد پالس، سازه‌ی با زمان تناوب گیرداری ۰/۷۵۴ ثانیه ..... ۱۰۶
- جدول ۴-۹: اختلاف میان پاسخ‌های ناشی از زمین‌لرزه‌های دارای پالس، سازه‌ی با زمان تناوب گیرداری ۰/۴ ثانیه ..... ۱۰۶
- جدول ۴-۱۰: اختلاف میان پاسخ‌های ناشی از زمین‌لرزه‌های فاقد پالس، سازه‌ی با زمان تناوب گیرداری ۰/۴ ثانیه ..... ۱۰۶
- جدول ۴-۱۱: میانگین پاسخ‌های سازه‌ها ..... ۱۰۶
- جدول ۱-۵: نتایج کلی مدلسازی‌های مختلف ..... ۱۱۴
- جدول ۲-۵: متوسط نسبت پاسخ‌ها تحت اثر نگاهت‌های دارای پالس به نگاهت‌های فاقد پالس ..... ۱۱۴

# پیشگفتار

## مقدمه

برای ایجاد مقاومت مناسب در برابر زمین‌لرزه‌ها، به طور کلی دو روش وجود دارد. روش اول، طراحی سازه با مقاومت کافی، سختی و ظرفیت تغییرشکل پلاستیک مناسب، به نحوی که قادر به مقاومت در برابر زمین‌لرزه‌های ضعیف و متوسط باشد، و در حد امکان نیز در برابر زمین‌لرزه‌های قوی فرو نریزد و روش دوم، استفاده از روشهای مختلف کنترل پاسخ لرزه‌ای سازه به منظور کاهش نیروی وارده به سازه می‌باشد.

مساله کنترل در زمینه‌های خاصی از مهندسی عمران، نظیر محافظت سازه در برابر بارهای ناشی از زمین‌لرزه و باد وارد شد. پس از مطالعه‌ی انجام شده توسط یاو<sup>۱</sup> ۱۹۷۲، مفهوم کنترل سازه رشد بسیاری یافت. در نهمین کنفرانس جهانی مهندسی زلزله ۱۹۸۸، در ژاپن، بخش خاصی تحت عنوان «کنترل پاسخ لرزه‌ای سازه‌ها» برگزار شد و بعد از آن نیز اولین کنفرانس جهانی کنترل سازه‌ای، در سال ۱۹۹۴ در ایالات متحده برگزار گردید.

کنترل پاسخ لرزه‌ای سازه‌ای از روشهای مختلفی نظیر اصلاح سختی، جرم‌ها، میرایی یا شکل سازه، و یا ایجاد نیروهای غیرفعال و یا فعال، قابل اجرا است. سیستم‌های کنترل سازه‌ای را می‌توان به دسته‌های کلی، کنترل غیرفعال، کنترل فعال، کنترل هیبرید و کنترل نیمه‌فعال تقسیم نمود. تفاوت‌های عمده‌ای بین این دسته‌ها وجود دارد، نظیر تفاوت در نحوه‌ی تامین انرژی عملکرد و حتی نحوه‌ی تاثیر آنها بر سازه.

یکی از مفاهیمی که سالها قبل از آنکه مفهوم کنترل سازه مورد استفاده قرار گیرد، جداسازی لرزه‌ای می‌باشد که کاربرد در کنترل پاسخ لرزه‌ای داشته است و در سالیان اخیر و با پیشرفت تکنولوژی کاربرد آن گسترش پیدا کرده است. ایده‌ی اصلی در جداسازی لرزه‌ای، تفکیک سازه از لرزش زمین می‌باشد و هدف کاهش انتقال انرژی و نیروهای زمین‌لرزه به سازه می‌باشد که بوسیله‌ی قرار گرفتن سازه بر روی سیستم جداساز، که دارای انعطاف پذیری قابل توجهی می‌باشند و امکان لغزش سازه را فراهم می‌کنند، این هدف در دسترس قرار می‌گیرد. همچنین برای محدود کردن نیروهای انتقال یافته و دامنه‌ی حرکت می‌توان از تجهیزات میرایی استفاده نمود. در این حالت، با توجه به آنکه مکانیسم در زیر سازه قرار می‌گیرد، بدان «جداسازی پایه» نیز اطلاق می‌شود.

مهمترین ویژگی جداسازی لرزه‌ای، ایجاد انعطاف پذیری است که باعث افزایش زمان تناوب طبیعی سازه می‌شود. افزایش زمان تناوب طبیعی، باعث می‌شود که سازه در طیف از ناحیه‌ی دارای مقادیر بالا فاصله بگیرد، و همچنین باعث کاهش شتاب در سازه می‌گردد و این امر بر روی جابجایی‌های افقی نیز تاثیرگذار می‌باشد.

اجزای مورد نیاز در سیستم‌های جداسازی عبارتند از لایه‌ی انعطاف‌پذیر؛ تجهیزات جهت ایجاد توانایی اتلاف انرژی، و ابزاری برای ایجاد صلبیت کافی در برابر زمین‌لرزه‌های ضعیف و یا بار باد. لایه‌ی انعطاف پذیر، شامل نشیمن‌هایی نظیر نشیمن‌های الاستومری و یا لغزشی می‌باشد که وظیفه‌ی تفکیک لرزه‌ای را بر عهده دارند. تجهیزات اتلاف انرژی نظیر میراگرهای ویسکوز و یا ویسکوالاستیک می‌باشد، البته ممکن است میرایی لازم در جداسازی لرزه‌ای توسط نشیمن‌ها نیز

---

<sup>1</sup> Yao



تامین شود و نیازی به استفاده از تجهیزات جداگانه نباشد. همچنین سازه‌ی جداسازی شده در برابر زمین‌لرزه‌های خفیف به صورت صلب زیرا در برابر بارهای ضعیف، نیازی به استفاده از مفهوم جداسازی نمی‌باشد و سازه می‌تواند بدون تحمل خسارت اینگونه بارها را تجربه کند.

پس از وقوع زمین‌لرزه‌ی لندرز<sup>۱</sup> ۱۹۹۲، نورثریج<sup>۲</sup> ۱۹۹۴ و کوبه<sup>۳</sup> ۱۹۹۵، با توجه به خسارات و تلفات ایجاد شده در مناطق شهری که سازه‌های آنها بر اساس آیین‌نامه‌های لرزه‌ای مدرن طراحی شده بودند، بار دیگر مساله‌ی زمین‌لرزه‌های نزدیک گسل مورد توجه قرار گرفت و مطالعات در این زمینه وسعت بیشتری یافت.

زمین‌لرزه‌های حوزه‌ی نزدیک در طیف خود در زمان تناوب‌های بالا، دارای مقادیر بیشتری می‌باشند و این امر بخصوص بروی سازه‌های جداسازی شده تاثیر بسزایی دارد. این مساله باعث شد در آیین‌نامه‌های مختلف از جمله UBC 97، ضوابط سخت‌گیرانه‌ای در مورد سازه‌هایی که در حوزه‌ی نزدیک گسل قرار دارند اعمال شود. در عمل، این ضوابط باعث شد که مزیت اصلی سازه‌ی جداسازی شده، که الاستیک عمل کردن در برابر زمین‌لرزه‌های متوسط بواسطه تفکیک لرزه‌ای می‌باشد، از بین برود و این سازه‌ها در برابر زمین‌لرزه‌های متوسط نیز مشابه پایه‌گیری عمل کنند و دچار خسارات سازه‌ای شوند. بررسی‌های مختلف باعث شد که در ویرایش‌های بعدی آیین‌نامه‌ها، نظیر آیین‌نامه‌ی IBC 2000 که ویرایش بعدی آیین‌نامه‌ی UBC 97 می‌باشد، تغییری در نحوه‌ی تاثیرپذیری از حوزه‌ی نزدیک گسل ایجاد شود.

در زمین‌لرزه‌های حوزه‌ی نزدیک، بحث جهت‌پذیری مهم می‌باشد و یکی از علل داشتن مقادیر طیفی زیاد در زمان تناوب‌های بالا، وجود پالس در مولفه‌ی عمود بر گسل در جهت‌گیری پیشرونده می‌باشد. این پالس در تاریخچه زمانی سرعت به وضوح قابل مشاهده می‌باشد. عموم این پالس‌ها، دارای مدت زمان تناوبی در حدود ۱ تا ۳ ثانیه می‌باشند، گرچه مدت زمان‌های بالاتری نظیر ۷ ثانیه نیز مشاهده شده است. این محدوده، شامل زمان تناوب طبیعی عموم سازه‌های جداسازی شده پایه می‌شود و نشان دهنده‌ی آن است که این پالس بر روی این نوع سازه‌ها اثر بسزایی دارند. مطالعات محققین مختلف نیز این مساله را تایید می‌کند و اثر افزاینده‌ی آن در پاسخ‌های سازه، نظیر تغییر مکان پایه و شتاب روسازه را نشان می‌دهد.

---

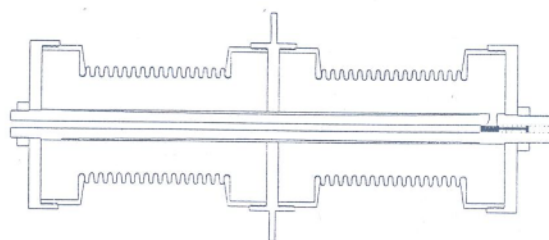
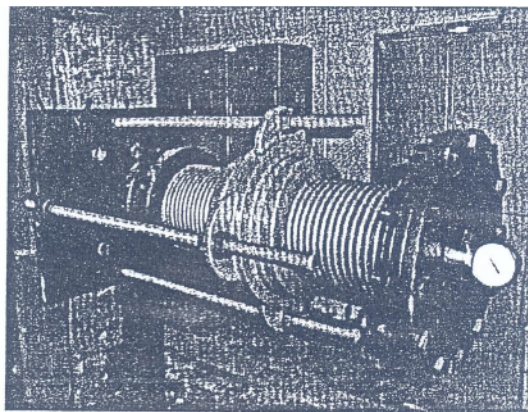
<sup>1</sup> Landers

<sup>2</sup> Northridge

<sup>3</sup> Kobe

## چالش‌های مطالعه‌ی حاضر

طی مطالعه‌ی فروغی‌کیا و ضیایی‌فر [۱] میراگر ویسکوزی با استفاده از بلوزها ساخته شده است. بلوزها فاقد حلقه‌های محیطی بوده‌اند و همچنین هسته‌ی میراگر، بوسیله‌ی چهار میله به تکیه‌گاهها متصل شده است. آزمایش‌های انجام شده بر روی میراگر، باعث آن شده است که بلوزها دچار تغییرشکل شوند. همچنین به دلیل عدم وجود حلقه‌های محیطی، نمونه توانایی تحمل فشارهای بالا را نداشته است و ظرفیت نیرویی آن به حدود ۵۰ کیلونیوتن محدود شده است. آنها، پیشنهاد استفاده از حلقه‌های محیطی دور بلوزها و قرارگیری هسته‌ی میراگر در درون غلاف را دادند، تا ضمن افزایش ظرفیت میراگر، حلقه‌های محیطی در درون غلاف مانع از تغییرشکل بلوزها شوند و باعث حرکت کردن بلوزها در راستای محور مرکزی لوله و عدم انحراف آن شوند. همچنین، آنها دامنه‌ی حرکتی را در آزمایش‌های مختلف به ۳۰ میلی‌متر محدود ساخته بودند. در شکل ۱، نمونه‌ی ساخته شده و طرح کلی آن قابل مشاهده می‌باشد.



شکل ۱: نمونه‌ی ساخته شده و طرح کلی میراگر ویسکوز ساخته شده در مطالعه‌ی فروغی‌کیا و ضیایی‌فر [۱]

بر مبنای این تجربیات، ساخت نمونه‌ی دیگری با استفاده از بلوزها و اجرای پیشنهادهای مطرح شده، ایجاد ظرفیت نیرویی بالا در حدود ۲۵۰ کیلونیوتن، دامنه‌ی حرکتی بالاتر و همچنین ایجاد رفتار میرایی غیرخطی به عنوان چالشی در مطالعه‌ی حاضر مدنظر قرار داده شده است.

در مطالعات مختلفی، نظیر مطالعات هال و همکاران [۲]، هیتون و همکاران [۳]، و جانگید و کلی [۴] بحث اثر نامطلوب زمین‌لرزه‌های حوزه‌ی نزدیک بر روی سازه‌های جداسازی شده مطرح شده است. بررسی استفاده از میراگری ویسکوز، مشابه با آنچه به عنوان چالش اول مدنظر قرار دارد، در سازه‌ی جداسازی پایه شده، مورد نظر قرار گرفته است. در این بخش بررسی

اثر زمین‌لرزه‌ی حوزه نزدیک بر روی پاسخ‌های سازه و اثرات میرایی غیرخطی در مقایسه با میرایی خطی در برابر زمین‌لرزه‌های حوزه نزدیک و حوزه دور به عنوان چالش دیگری در این مطالعه مطرح شده است. همچنین سعی بر آن شده است که کاربرد میراگری کنترل‌پذیر در سازه‌ی جداسازی شده نیز مورد بررسی قرار گیرد که به صورت مختصر انجام شده است.

## فصل بندی

در فصل اول مطالعه‌ی حاضر، سعی بر ارزیابی مختصر ادبیات فنی موجود در زمینه‌های کنترل سازه‌ها، جداسازی پایه و مفهوم حوزه‌ی نزدیک شده است. به هر کدام از این مباحث به اختصار و به تفکیک پرداخته شده است.

در فصل دوم، روند طراحی میراگر نمونه به اختصار ارائه شده است و سپس مراحل مختلف طی شده برای آزمایش میراگر، و مشکلات پیش‌آمده در مراحل مختلف اشاره شده است.

در فصل سوم، ابتدا به آزمایش‌های انجام شده توسط محققیت مختلف بر روی میراگر ویسکوز اشاره می‌شود. پس از ارزیابی مدل‌های رفتاری مختلف که برای مدلسازی رفتار مکانیکی میراگرهای ویسکوز مورد استفاده بوده‌اند، نتایج آزمایش‌های انجام شده بر روی میراگر مورد تحلیل واقع شده‌اند و سعی شده است که رفتار مکانیکی آن، مدلسازی شود.

در فصل چهارم نیز، ابتدا مدلسازی سازه‌ی جداسازی شده و نداشت‌های مورد استفاده برای آن ارائه شده‌اند و سپس نتایج حاصل در اثر زمین‌لرزه‌های دارای پالس و فاقد پالس مقایسه شده‌اند و پس از آن اثر میرایی غیرخطی و خطی مورد بحث واقع شده است و سپس به صورت مختصر نتایج کاربرد میراگر کنترل‌پذیر ارائه شده است.

## فصل اول