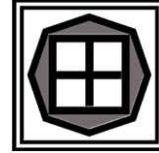


بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی



وزارت راه و شهرسازی

سازمان مجری ساختمان‌ها و تاسیسات دولتی و عمومی

گزارش نهایی

دستورالعمل استفاده از میراگرها در طراحی و مقاوم سازی ساختمانها

کارفرما:

سازمان مجری ساختمان‌ها و تاسیسات دولتی و عمومی

مجری:

مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی

آبان ۹۴



### مدیر پروژه

دکتر نادر خواجه احمد عطاری

### اعضاء کمیته فنی پروژه‌های پژوهشی سازمان مجری ساختمان‌ها و تاسیسات دولتی و عمومی

- ۱- مهندس رضا اخباری
- ۲- مهندس خالد خیری
- ۳- مهندس خسرو شادمهر

### اعضاء کمیته تدوین (کارشناسان مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی)

- ۱- دکتر نادر خواجه احمد عطاری
- ۲- دکتر فیاض رحیم‌زاده رفوئی
- ۳- دکتر مجتبی فرخ
- ۴- مهندس محمدرضا بیات
- ۵- دکتر عاطفه جهان‌محمدی
- ۶- دکتر هیمن حجت‌جلالی
- ۷- مهندس محمدحسین اخوان سیگاری یزد
- ۸- مهندس پریسا تیموری

### هدایت و راهبری پروژه

مهندس رحیم بادامیان

### اعضای کمیته داوری پروژه به ترتیب حروف الفبا:

- ۱- مهندس رحیم بادامیان
- ۲- مهندس محمدرضا بیات
- ۳- دکتر نادر خواجه احمد عطاری
- ۴- دکتر فیاض رحیم‌زاده رفوئی
- ۵- مهندس خسرو شادمهر
- ۶- دکتر مجتبی فرخ
- ۷- دکتر سید علی موید علایی
- ۸- دکتر علی نیکخو



## فهرست مطالب

چکیده .....	۱
فصل اول .....	۱
الزامات طراحی لرزه‌ای سازه‌ها با استفاده از سیستم‌های استهلاک انرژی .....	۱
۱-۱- دامنه کاربرد .....	۱
۲-۱- تعاریف .....	۱
۳-۱- ضوابط عمومی طراحی: .....	۳
۱-۳-۱- طراحی لرزه‌ای .....	۳
۲-۳-۱- ضوابط سیستم .....	۳
۱-۲-۳-۱- سیستم باربر جانبی .....	۳
۲-۲-۳-۱- سیستم میرایی .....	۴
۳-۳-۱- شناخت‌نگاشت .....	۵
۱-۳-۳-۱- طیف طرح .....	۵
۲-۳-۳-۱- روش تحلیل تاریخچه زمانی .....	۵
۴-۳-۱- انتخاب روش تحلیل .....	۶
۱-۴-۳-۱- روش غیرخطی .....	۶
۲-۴-۳-۱- روش طیف پاسخ .....	۶
۳-۴-۳-۱- روش نیروی جانبی معادل .....	۷
۵-۳-۱- سیستم میرایی .....	۷
۱-۵-۳-۱- طراحی میراگر .....	۷
۲-۵-۳-۱- حرکات چند جهته .....	۸
۳-۵-۳-۱- بازرسی و تست‌های دوره‌ای .....	۸
۴-۵-۳-۱- کنترل کیفیت .....	۹
۴-۱- روش غیرخطی .....	۹
۱-۴-۱- روش غیرخطی تاریخچه زمانی (Nonlinear Response-history) .....	۹
۱-۱-۴-۱- مدلسازی میراگر .....	۹
۲-۱-۴-۱- پارامترهای پاسخ .....	۱۰
۲-۴-۱- روش استاتیکی غیرخطی .....	۱۰
۵-۱- روش طیف پاسخ .....	۱۱
۱-۵-۱- مدل‌سازی .....	۱۱
۲-۵-۱- سیستم باربر لرزه‌ای .....	۱۲
۱-۲-۵-۱- برش پایه لرزه‌ای .....	۱۲
۲-۲-۵-۱- برش پایه مودال .....	۱۲
۳-۲-۵-۱- ضریب مشارکت مودی .....	۱۲
۴-۲-۵-۱- ضریب پاسخ لرزه‌ای مد اصلی .....	۱۳



- ۱۳-۵-۲-۵-۱- تعیین دوره تناوب موثر مود اصلی ..... ۱۳
- ۱۴-۵-۲-۶-۱- ضریب پاسخ لرزه‌ای مودهای بالاتر ..... ۱۴
- ۱۴-۵-۲-۷-۱- نیروی جانبی طرح ..... ۱۴
- ۱۴-۵-۳- سیستم میرایی ..... ۱۴
- ۱۵-۵-۳-۱- تغییر شکل ناشی از زلزله طرح ..... ۱۵
- ۱۵-۵-۳-۲- تغییر مکان بام ناشی از زلزله طرح ..... ۱۵
- ۱۵-۵-۳-۳- دریافت طبقه ناشی از زلزله طرح ..... ۱۵
- ۱۶-۵-۳-۴- سرعت طبقه ناشی از زلزله طرح ..... ۱۶
- ۱۶-۵-۳-۵- پاسخ بیشترین زلزله مورد نظر (MCE) ..... ۱۶
- ۱۷-۶-۱- روش نیروی جانبی معادل ..... ۱۷
- ۱۷-۶-۱-۱- مدل سازی ..... ۱۷
- ۱۷-۶-۲- سیستم باربر لرزه ای ..... ۱۷
- ۱۷-۶-۲-۱- برش پایه ..... ۱۷
- ۱۸-۶-۲-۲- برش پایه مود اصلی ..... ۱۸
- ۱۸-۶-۲-۳- مشخصات مود اصلی ..... ۱۸
- ۱۹-۶-۲-۴- ضریب پاسخ لرزه‌ای مود اصلی ..... ۱۹
- ۱۹-۶-۲-۵- تعیین دوره تناوب موثر مود اصلی ..... ۱۹
- ۱۹-۶-۲-۶- برش پایه سایر مودها ..... ۱۹
- ۲۰-۶-۲-۷- مشخصات سایر مودها ..... ۲۰
- ۲۰-۶-۲-۸- ضریب پاسخ لرزه‌ای مودهای باقی مانده ..... ۲۰
- ۲۰-۶-۲-۹- نیروی جانبی طرح ..... ۲۰
- ۲۱-۶-۳- سیستم میرایی ..... ۲۱
- ۲۱-۶-۳-۱- تغییر شکل کف ناشی از زلزله طرح ..... ۲۱
- ۲۲-۶-۳-۲- تغییر مکان بام ناشی از زلزله طرح ..... ۲۲
- ۲۲-۶-۳-۳- دریافت طبقات در زلزله طرح ..... ۲۲
- ۲۲-۶-۳-۴- سرعت طبقه در زلزله طرح ..... ۲۲
- ۲۳-۶-۳-۵- پاسخ در بیشترین زلزله محتمل (MCE) ..... ۲۳
- ۲۳-۷-۱- اصلاح پاسخ میرایی ..... ۲۳
- ۲۳-۷-۱-۱- ضریب میرایی ..... ۲۳
- ۲۴-۷-۲- میرایی موثر ..... ۲۴
- ۲۵-۷-۲-۱- میرایی ذاتی ..... ۲۵
- ۲۵-۷-۲-۲- میرایی هیستریزیس ..... ۲۵
- ۲۵-۷-۲-۳- ضریب اصلاح چرخه هیستریزیس ..... ۲۵
- ۲۶-۷-۳- میرایی ویسکوز ..... ۲۶
- ۲۷-۷-۳- شکل پذیری موثر مورد نیاز ..... ۲۷
- ۲۸-۷-۴- بیشینه نیاز شکل پذیری موثر ..... ۲۸
- ۲۸-۸-۱- شرایط بارگذاری لرزه ای و معیارهای پذیرش ..... ۲۸
- ۲۸-۸-۱-۱- روش‌های غیرخطی ..... ۲۸
- ۲۹-۸-۱-۱- سیستم باربر لرزه ای ..... ۲۹



- ۲۹-۱-۸-۱-۲ سیستم‌های میرایی ..... ۲۹
- ۲۹-۱-۸-۱-۳ ترکیب اثرات بارگذاری ..... ۲۹
- ۲۹-۱-۸-۱-۴ معیارهای پذیرش برای پارامترهای پاسخ مورد نظر ..... ۲۹
- ۲-۸-۱-۲ روش‌های طیف پاسخ و نیروی جانبی معادل ..... ۲۹
- ۱-۲-۸-۱ سیستم باربر لرزه ای ..... ۳۰
- ۲-۲-۸-۱ سیستم میرایی ..... ۳۰
- ۳-۲-۸-۱ ترکیب اثرات بارگذاری ..... ۳۰
- ۱-۳-۲-۸-۱ مقدار نیروی افقی زلزله ( $E_H$ ) ..... ۳۰
- ۲-۳-۲-۸-۱ نیروی قائم زلزله ..... ۳۰
- ۳-۳-۲-۸-۱ ترکیب بارهای لرزه ای ..... ۳۱
- ۴-۲-۸-۱ نیروهای مودال طراحی سیستم میرایی ..... ۳۱
- ۵-۲-۸-۱ شرایط بار لرزه‌ای و ترکیب پاسخ‌های مودال ..... ۳۲
- ۶-۲-۸-۱ حدود پاسخ غیرخطی ..... ۳۴
- ۹- بررسی طراحی ..... ۳۵
- ۱۰-۱ آزمایش سیستم میرایی ..... ۳۵
- ۱-۱۰-۱ آزمایش‌های نمونه شاهد ..... ۳۵
- ۱-۱۰-۱-۱ ثبت اطلاعات ..... ۳۶
- ۲-۱-۱۰-۱ ترتیب و تعداد سیکل‌های آزمایش ..... ۳۶
- ۳-۱-۱۰-۱ آزمایش میراگرهای مشابه ..... ۳۷
- ۴-۱-۱۰-۱ تعیین مشخصات تغییر مکان-سرعت-نیرو ..... ۳۷
- ۵-۱-۱۰-۱ کفایت میراگر ..... ۳۸
- ۱-۵-۱-۱۰-۱ میراگر وابسته به تغییر مکان ..... ۳۸
- ۲-۵-۱-۱۰-۱ میراگر وابسته به سرعت ..... ۳۸
- ۲-۱۰-۱ آزمایش میراگر ..... ۳۹
- ۱۱-۱ فلوچارت طراحی ساختمان‌ها با استفاده از میراگر ..... ۳۹

## فصل دوم ..... ۴۳

### الزامات بهسازی لرزه‌ای سازه‌ها با استفاده از سیستم‌های استهلاک انرژی ..... ۴۳

- ۱-۲ کلیات ..... ۴۳
- ۱-۱-۲ هدف ..... ۴۳
- ۲-۱-۲ محدوده کاربرد ..... ۴۳
- ۲-۲ سطوح خطر لرزه‌ای مورد استفاده در این دستورالعمل ..... ۴۴
- ۳-۲ سطوح عملکرد ..... ۴۴
- ۱-۳-۲ سطوح عملکرد اجزای سازه‌ای ..... ۴۵
- ۲-۳-۲ سطوح عملکرد اجزای غیرسازه‌ای ..... ۴۶
- ۳-۳-۲ سطوح عملکرد کل ساختمان ..... ۴۷
- ۱-۳-۳-۲ سطح عملکرد خدمت‌رسانی بی‌وقفه (A-1) (OP): ..... ۴۷
- ۲-۳-۳-۲ سطح عملکرد قابلیت استفاده بی‌وقفه (B-1) (IO): ..... ۴۷



۴۷	۳-۳-۳-۲ سطح عملکرد ایمنی جانی (C-۳) (LS):
۴۷	۳-۳-۳-۲ سطح عملکرد آستانه فروریزش (E-۵) (CP):
۴۸	۴-۲ انواع میراگرها
۴۹	۵-۲ مدل سازی میراگرها
۴۹	۱-۵-۲ میراگرهای وابسته به تغییر مکان
۵۰	۲-۵-۲ میراگرهای وابسته به سرعت
۵۰	۱-۲-۵-۲ میراگرهای ویسکوالاستیک جامد
۵۱	۲-۲-۵-۲ میراگرهای ویسکو-الاستیک مایع
۵۲	۳-۲-۵-۲ میراگرهای ویسکوز مایع
۵۲	۳-۵-۲ انواع دیگر میراگرها
۵۲	۶-۲ روش های خطی
۵۳	۱-۶-۲ روش استاتیکی خطی
۵۳	۱-۱-۶-۲ میراگرهای وابسته به تغییر مکان
۵۶	۲-۱-۶-۲ میراگرهای وابسته به سرعت
۵۷	۳-۱-۶-۲ نیروهای طراحی
۵۸	۲-۶-۲ روش دینامیکی خطی
۵۸	۱-۲-۶-۲ میراگرهای وابسته به تغییر مکان
۵۹	۲-۲-۶-۲ میراگرهای وابسته به سرعت
۶۰	۷-۲ روش های غیرخطی
۶۰	۱-۷-۲ روش استاتیکی غیرخطی
۶۲	۱-۱-۷-۲ نقطه ی کنترل
۶۲	۲-۱-۷-۲ توزیع بار جانبی
۶۲	۳-۱-۷-۲ مدل رفتار سه خطی نیرو-تغییر مکان سازه
۶۳	۴-۱-۷-۲ تغییر مکان هدف
۶۳	۴-۱-۷-۲ الف ساختمان با دیافراگم صلب
۶۶	۴-۱-۷-۲ ب ساختمان با دیافراگم نیمه صلب
۶۶	۴-۱-۷-۲ ج ساختمان با دیافراگم نرم
۶۶	۵-۱-۷-۲ میراگرهای وابسته به تغییر مکان
۶۷	۶-۱-۷-۲ میراگرهای وابسته به سرعت
۶۸	۲-۷-۲ روش دینامیکی غیرخطی
۶۹	۸-۲ ضوابط تفصیلی سیستم ها
۶۹	۱-۸-۲ کلیات
۶۹	۲-۸-۲ دمای بهره برداری
۷۰	۳-۸-۲ شرایط محیطی
۷۰	۴-۸-۲ نیروی باد
۷۰	۵-۸-۲ بازرسی و جایگزینی
۷۰	۶-۸-۲ کنترل کیفیت ساخت
۷۱	۷-۸-۲ نگهداری
۷۱	۹-۲ بازبینی طرح





۷۱	..... کلیات ۱-۹-۲
۷۲	..... ۱۰-۲ آزمایش های لازم برای میراگرها
۷۲	..... کلیات ۱-۱۰-۲
۷۳	..... ۲-۱۰-۲ آزمایش نمونه ها
۷۳	..... کلیات ۱-۲-۱۰-۲
۷۳	..... ۲-۲-۱۰-۲ ثبت داده ها
۷۳	..... ۳-۲-۱۰-۲ دوره و چرخه های آزمایش
۷۴	..... ۴-۲-۱۰-۲ میراگرهای وابسته به سرعت و یا فرکانس ارتعاش
۷۵	..... ۵-۲-۱۰-۲ میراگرهای در معرض تغییر مکان خارج از صفحه
۷۵	..... ۶-۲-۱۰-۲ آزمایش وسایل مشابه
۷۵	..... ۳-۱۰-۲ تعیین مشخصات منحنی نیرو- تغییر مکان
۷۶	..... ۴-۱۰-۲ کفایت سیستم
۷۸	..... ۱۱-۲ فلوچارت مقاوم سازی ساختمانها با استفاده از میراگر

## ۸۱ فصل سوم

### ۸۱ راهنما و تفسیر

۸۱	..... ۱-۳ ضوابط عمومی
۸۳	..... ۲-۳ مدل سازی میراگرها
۸۵	..... ۱-۲-۳ میراگرهای وابسته به تغییر مکان
۸۵	..... ۲-۲-۳ میراگرهای وابسته به سرعت
۸۹	..... ۳-۲-۳ سایر میراگرها
۹۰	..... ۳-۳ طراحی ساختمان های جدید با استفاده از میراگرها
۹۱	..... ۱-۳-۳ مقادیر طیفی پاسخ و طرح براساس ساختگاه
۹۴	..... ۲-۳-۳ روش های تحلیل
۹۴	..... کلیات ۱-۲-۳-۳
۹۵	..... ۲-۲-۳-۳ تحلیل خطی
۹۹	..... ۳-۲-۳-۳ روش های غیرخطی
۱۰۱	..... ۴-۲-۳-۳ تخمین سرعت و شتاب حداکثر در سیستم های دارای میراگر ویسکوز
۱۰۶	..... ۴-۳ بهسازی لرزه ای ساختمان های موجود با استفاده از میراگرها
۱۰۶	..... ۱-۴-۳ روش های تحلیل خطی
۱۰۷	..... ۱-۱-۴-۳ روش خطی استاتیکی
۱۱۱	..... ۲-۱-۴-۳ روش دینامیکی خطی
۱۱۲	..... ۲-۴-۳ روش های غیرخطی
۱۱۲	..... ۱-۲-۴-۳ روش استاتیکی غیرخطی
۱۱۲	..... ۱-۱-۲-۴-۳ روش تغییر مکان هدف
۱۱۶	..... ۲-۱-۲-۴-۳ روش طیف ظرفیت
۱۲۶	..... ۲-۲-۴-۳ روش دینامیکی غیرخطی
۱۲۷	..... ۳-۴-۳ معیارهای حدی بالا و پائین
۱۲۷	..... ۱-۳-۴-۳ مشخصات اسمی



- ۱۲۸ ..... ۳-۴-۲ رواداری‌های متناظر با مشخصات اسمی
- ۱۲۸ ..... ۳-۴-۳ ضرایب تغییر مشخصات
- ۱۲۹ ..... ۳-۴-۴ حدود بالا و پائین مشخصات تحلیل و طراحی
- پیوست الف..... ۱۳۱**
- انواع و مشخصات سیستم‌های میراگر..... ۱۳۱**
- الف-۱ مقدمه ..... ۱۳۱
- الف-۲ معرفی انواع سیستم‌های کنترل سازه‌ها ..... ۱۳۲
- الف-۲-۱ طبقه‌بندی کلی سیستم‌های کنترل ..... ۱۳۲
- الف-۲-۲ کنترل غیر فعال سازه‌ها ..... ۱۳۴
- الف-۲-۲-۱ سیستم جداسازی پایه ..... ۱۳۵
- الف-۲-۲-۱-۱ الاستومر ..... ۱۳۷
- الف-۲-۲-۲-۱-۲ سیستم جداساز لرزه‌ای سرب-لاستیک (LRB) ..... ۱۳۸
- الف-۲-۲-۲-۱-۳ سیستم جداساز لرزه‌ای لاستیکی با میرایی بالا (HDRB) ..... ۱۳۹
- الف-۲-۲-۲-۱-۴ سیستم آونگی اصطکاکی (FPS) ..... ۱۴۰
- الف-۲-۲-۲-۲ میراگر با جرم متوازن (TMD) ..... ۱۴۶
- الف-۲-۲-۲-۳ میراگر مایع متوازن (TLD) ..... ۱۵۴
- الف-۲-۲-۲-۴ میراگر جاری شونده فلزی ..... ۱۶۰
- الف-۲-۲-۲-۵ میراگر اصطکاکی ..... ۱۶۶
- الف-۲-۲-۲-۶ میراگر ویسکوالاستیک ..... ۱۷۰
- الف-۲-۲-۲-۷ میراگر با سیال ویسکوز ..... ۱۷۱
- الف-۲-۲-۲-۸ انتقال انرژی به صورت هدفمند ..... ۱۷۲
- الف-۲-۲-۳ کنترل فعال سازه‌ها ..... ۱۷۵
- الف-۲-۳-۱ سیستم میراگر با جرم فعال ..... ۱۷۶
- الف-۲-۳-۲ سیستم تاندون فعال ..... ۱۷۹
- الف-۲-۳-۳ سیستم مهاربند فعال ..... ۱۸۰
- الف-۲-۳-۴ سیستم تولید پالس ..... ۱۸۱
- الف-۲-۳-۵ میراگر فعال با سختی متغیر ..... ۱۸۱
- الف-۲-۴ کنترل نیمه‌فعال سازه‌ها ..... ۱۸۱
- الف-۲-۴-۱ میراگر با درجه متغیر ..... ۱۸۳
- الف-۲-۴-۲ میراگر با سختی متغیر ..... ۱۸۵
- الف-۲-۴-۳ میراگر با جرم متوازن نیمه فعال ..... ۱۸۶
- الف-۲-۴-۴ میراگر با ستون مایع کنترل شونده (Semi active TLCD) ..... ۱۸۷
- الف-۲-۴-۵ میراگر با سیال کنترل شونده ..... ۱۸۷
- الف-۳ مقایسه سیستم‌های کنترلی ..... ۱۹۰
- الف-۳-۱ مقایسه سیستم‌های کنترل غیرفعال ..... ۱۹۱
- الف-۳-۱-۱ جداگر لرزه‌ای ..... ۱۹۲
- الف-۳-۱-۲ وسایل استهلاک انرژی ..... ۱۹۳



۱۹۷.....	الف-۴ مطالعات آزمایشگاهی در مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی
۱۹۷.....	الف-۴-۱ میراگرهای اصطکاکی سیلندری
۲۰۱.....	الف-۴-۲ میراگرهای TADAS
۲۰۵.....	الف-۵ شرکت های فعال در ایران
۲۰۵.....	الف-۵-۱ شرکت ارتعاشات صنعتی ایران
۲۰۵.....	الف-۵-۱-۱ انواع جداگرهای لرزه ای ارائه شده
۲۰۶.....	الف-۵-۱-۲ مزایای جداگرهای لرزه ای تولیدی
۲۰۶.....	الف-۵-۱-۳ انواع میراگرهای لرزه ای تولیدی
۲۰۶.....	الف-۵-۱-۴ میراگرهای لرزه ای LED
۲۰۸.....	الف-۵-۱-۵ میراگرهای لرزه ای PVD
۲۰۹.....	الف-۵-۱-۶ میراگرهای لرزه ای RVD
۲۱۰.....	الف-۵-۱-۷ مزایای میراگرهای لرزه ای تولیدی
۲۱۱.....	الف-۵-۲ شرکت بهساز اندیشان تهران
۲۱۱.....	الف-۵-۲-۱ میراگرهای اصطکاکی
۲۱۷.....	الف-۵-۳ شرکت رادیاب
۲۱۷.....	الف-۵-۳-۱ مطالعه موردی پروژه هتل آزادی تهران

۲۲۳.....	پیوست ب
۲۲۳.....	مقایسه ساختمان های دارای سیستم های استهلاک انرژی
۲۲۳.....	ب-۱-۱ مقدمه
۲۲۴.....	ب-۲-۱ معرفی ساختمان های مینا
۲۲۵.....	ب-۳-۱ مشخصات دینامیکی سازه های مینا
۲۲۵.....	ب-۳-۱-۱ ساختمان ۴ طبقه
۲۲۷.....	ب-۳-۱-۲ ساختمان ۸ طبقه
۲۲۹.....	ب-۳-۱-۳ ساختمان ۱۲ طبقه
۲۳۱.....	ب-۴-۱ مدل سازی ساختمان های مینا با استفاده از سیستم های استهلاک انرژی
۲۳۲.....	ب-۴-۱-۱ پلان
۲۳۳.....	ب-۴-۱-۲ اصول مدلسازی و ضوابط آئین نامه ای
۲۳۴.....	ب-۴-۱-۳ مشخصات میراگرهای استفاده شده
۲۳۴.....	ب-۴-۱-۳-۱ میراگر اصطکاکی
۲۳۶.....	ب-۴-۱-۳-۲ میراگر ویسکوالاستیک
۲۳۷.....	ب-۴-۱-۳-۳ میراگر ویسکوز
۲۳۷.....	ب-۵-۱ ارزیابی رفتار ساختمان های دارای میراگر اصطکاکی
۲۳۷.....	ب-۵-۱-۱ محاسبات میرائی موثر
۲۳۹.....	ب-۵-۱-۲ کنترل تغییر مکان
۲۴۲.....	ب-۵-۱-۳ ارزیابی رفتار ساختمان های دارای میراگر ویسکوالاستیک
۲۴۲.....	ب-۵-۱-۳-۱ محاسبات میرائی موثر
۲۴۴.....	ب-۵-۱-۳-۲ کنترل تغییر مکان



۲۴۷	ب-۷ ارزیابی رفتار ساختمان‌های دارای میراگر ویسکوز.....
۲۴۷	ب-۷-۱ محاسبات میرائی موثر.....
۲۴۸	ب-۷-۲ کنترل تغییرمکان.....
۲۵۱	ب-۸ مقایسه تغییر رفتار سازه‌های دارای میراگر.....
۲۵۱	ب-۸-۱ مقایسه تغییرمکان نسبی طبقات.....
۲۵۲	ب-۸-۲ مقایسه برش و نیروی جانبی طبقات.....
۲۵۴	ب-۹ مقایسه وزن اسکلت.....
۲۵۵	ب-۱۰ جمع بندی نتایج.....
۲۵۷	<b>مراجع</b> .....

## فهرست شکلها

- چکیده ..... ۱
- فصل اول ..... ۱
- الزامات طراحی لرزه‌ای سازه‌ها با استفاده از سیستم‌های استهلاک انرژی ..... ۱
- فصل دوم ..... ۴۳
- الزامات بهسازی لرزه‌ای سازه‌ها با استفاده از سیستم‌های استهلاک انرژی ..... ۴۳
- شکل (۱-۲) : منحنی ساده شده نیرو - تغییر مکان ..... ۶۳
- شکل (۲-۲) منحنی ساده شده نیرو-تغییر مکان ..... ۶۷
- شکل (۳-۲) منحنی نیرو-تغییر مکان خطی، معادل و غیرخطی ..... ۶۸
- فصل سوم ..... ۸۱
- راه‌نما و تفسیر ..... ۸۱
- شکل (۱-۳) اجزای در ترکیب با ابزارهای اتلاف انرژی ..... ۸۲
- شکل (۲-۳) تاثیر انواع میراگرها بر پاسخ نیرو-تغییر مکان سازه ..... ۸۳
- شکل (۳-۳) نمودار چرخه‌ای ایده‌آل بار-تغییر مکان برای میراگرهای وابسته به تغییر مکان ..... ۸۴
- شکل (۴-۳) نمودار چرخه‌ای ایده‌آل بار-تغییر مکان برای میراگرهای وابسته به سرعت ..... ۸۴
- شکل (۵-۳) نمودار چرخه‌ای ایده‌آل بار-تغییر مکان برای میراگرهای دارای قابلیت Recentering ..... ۸۴
- شکل (۶-۳) رابطه ایده‌آل بار-تغییر مکان برای میراگر Viscoelastic solid ..... ۸۶
- شکل (۷-۳) سختی موثر نرمال شده ( $G'$ ) و ضریب میرایی ( $G''/\omega$ ) برای میراگر ویسکوالاستیک جامد ..... ۸۷
- شکل (۸-۳) مدل ویسکوالاستیک برای میراگر ..... ۸۷
- شکل (۹-۳) مشخصات میراگر Viscoelastic جامد تخمین زده شده براساس مدل خطی ..... ۸۸
- شکل (۱۰-۳) مدل ماکسول برای میراگرهای دارای سیال ویسکوالاستیک ..... ۸۸
- شکل (۱۱-۳) سیستم میراگر و قاب نگهدارنده آن به همراه قاب باربر جانبی سازه ..... ۹۱
- شکل (۱۲-۳) منحنی Pushover و ظرفیت ..... ۹۶
- شکل (۱۳-۳) منحنی ایده‌آل سازی شده Pushover مورد استفاده در تحلیل خطی ..... ۹۷
- شکل (۱۴-۳) کاهش پاسخ سازه به دلیل کاهش میرایی موثر ..... ۱۰۰
- شکل (۱۵-۳) جابه‌جایی هارمونیک در سازه با میراگر ویسکوز غیرخطی و رابطه نیرو تغییر مکان ..... ۱۰۴
- شکل (۱۶-۳) تهیه طیف پاسخ برای میرایی‌های بیشتر از ۵ درصد ..... ۱۱۷
- شکل (۱۷-۳) ظرفیت و نیاز طیفی برای یک ساختمان بهسازی شده یک طبقه ..... ۱۲۰
- شکل (۱۸-۳) مقایسه منحنی Pushover و چرخه‌های هیسترزیس ..... ۱۲۱
- شکل (۱۹-۳) پارامترهای موثر در تحلیل غیرخطی ساده‌سازی شده ساختمان یک طبقه دارای میراگر ویسکوالاستیک ..... ۱۲۳
- شکل (۲۰-۳) تعریف زاویه و تغییر مکان نسبی در میراگرها ..... ۱۲۴
- پیوست الف ..... ۱۳۱
- انواع و مشخصات سیستم‌های میراگر ..... ۱۳۱



- شکل الف-۱- نحوه عملکرد جداساز لرزه‌ای: (الف) انتقال دوره تناوب اصلی جهت کاهش انرژی وارده، (ب) افزایش میرایی جهت محدود نمودن تغییر مکان (رایبسون ۱۹۹۸) ..... ۱۳۶
- شکل الف-۲- مقایسه عملکرد سیستم جداسازی پایه با سیستم قاب معمولی (قاب خمشی) ..... ۱۳۶
- شکل الف-۳- استفاده از جداساز لرزه‌ای در سازه‌های ساختمانی ..... ۱۳۷
- شکل الف-۴- مقطع الاستومر با صفحات فولادی ..... ۱۳۸
- شکل الف-۵- اجزا مختلف سیستم جداسازی لرزه‌ای سرب-لاستیک ..... ۱۳۹
- شکل الف-۶- جداساز لرزه‌ای لاستیکی با میرایی بالا ..... ۱۴۰
- شکل الف-۷- جداساز آونگی اصطکاکی، (ب) جداساز آونگی اصطکاکی دوگانه ..... ۱۴۱
- شکل الف-۸- جداساز آونگی اصطکاکی سه گانه ..... ۱۴۱
- شکل الف-۹- ساختمان شهرداری اوکلند، (ب) ساختمان مرکز پست غرب ژاپن (عکس از P.W. Clark) ..... ۱۴۲
- (الف) (ب) ..... ۱۴۳
- شکل الف-۱۰- جداگر لرزه‌ای بیمارستان کالیفرنیا جنوبی، (ب) جداگر لرزه‌ای آشیانه هواپیمای فرودگاه استانبول ..... ۱۴۳
- شکل الف-۱۱- ساختمان سازمان فرماندهی و کنترل آتش نشانی شهر لس آنجلس، (ب) مرکز قانون و عدالت اجتماعی فوت هیل واقع در شهر سان برناردینو (عکس از I.D. Aiken) ..... ۱۴۳
- شکل الف-۱۲- ساختمان دادگاه استیناف ایالات متحده در شهر سان فرانسیسکو، (ب) پایانه بین المللی فرودگاه سان فرانسیسکو ..... ۱۴۴
- شکل الف-۱۳- جداساز FPS، (الف) بکارفته در پل Benicia Martinez در سان فرانسیسکو (ونگ ۲۰۰۲)، (ب) بکار رفته در پل Hernando DeSoto در ممفیس ..... ۱۴۴
- شکل الف-۱۴- پایانه بین المللی فرودگاه سبیحا-گوکن شهر استانبول، (ب) جزئیات جداساز مورد استفاده و نحوه اجرای آن ..... ۱۴۵
- شکل الف-۱۵- سیستم سازه‌ای دارای میراگر با جرم متوازن ..... ۱۴۶
- شکل الف-۱۶- پاسخ دینامیکی سیستم در حالت با و بدون میراگر با جرم متوازن ..... ۱۴۷
- شکل الف-۱۷- طرح‌های مختلف برای میراگر جرمی تنظیم شده ..... ۱۴۸
- شکل الف-۱۸- برج جان هانکوک ..... ۱۴۹
- شکل الف-۱۹- (الف) برج City Corp، (ب) TMD نصب شده در برج ..... ۱۵۲
- شکل الف-۲۰- (الف) برج بندر چیبیا، (ب) TMD نصب شده در برج (حق چاپ برای J. Connor) ..... ۱۵۳
- شکل الف-۲۱- نمونه‌ای از TMD ساخته شده با میراگر و فنر ..... ۱۵۳
- شکل الف-۲۲- نمونه‌ای از TMD آزمایش شده بر روی میز لرزه، (ب) TMD برج Ten Bosch ناگاساکی (حق چاپ برای J. Connor) ..... ۱۵۴
- شکل الف-۲۳- میراگر TLD، (الف) ستونی روزنهدار، (ب) نوسانی حاوی میله و مش ..... ۱۵۵
- شکل الف-۲۴- برج فرودگاه بین المللی در توکیو و نمایی از واحدهای میراگر مایع که روی برج نصب شده است ..... ۱۵۷
- شکل الف-۲۵- (الف) برج کامکست، (ب) مخزن بتنی متشکل از دو بخش ..... ۱۵۸
- شکل الف-۲۶- (الف) ساختمان One Wall Center در کانادا، (ب) پلان ساختمان نشان دهنده موقعیت میراگرها ..... ۱۵۹
- شکل الف-۲۷- (الف) هتل سافیتل، (ب) جزئیات میراگر مایع متوازن با قابلیت تنظیم پیروید ..... ۱۶۰
- شکل الف-۲۸- سیستم میراگر جاری شونده فلزی در بادبند (تایلر ۱۹۸۵)، (ب) میراگر ADAS، (ج) میراگر TADAS ..... ۱۶۲
- شکل الف-۲۹- تغییر شکل ها ورق ها با شکل های گوناگون ..... ۱۶۲
- شکل الف-۳۰- بادبند دارای هسته فلزی با خاصیت جاری‌شدگی، (ب) مقایسه رفتار چرخه‌ای بادبند کمانش ناپذیر با بادبند معمولی ..... ۱۶۴
- شکل الف-۳۱- (الف) ساختمان فدرال Wallace F. Bennett، (ب) مقاوم سازی با بادبندهای BRB ..... ۱۶۵



- شکل الف-۳۲- الف) بیمارستان Kaiser Santa Clara، (ب) بکارگیری باندبندهای BRB ..... ۱۶۶
- شکل الف-۳۳- الف) میراگر اصطکاکی پال، (ب) میراگر اصطکاکی لغزشی شکاف دار، (ج) میراگر سومیتو ..... ۱۶۷
- شکل الف-۳۴- میراگر پال مورد استفاده در دانشگاه کُنکُردیا ..... ۱۶۹
- شکل الف-۳۵- الف) مرکز دولت Monterey County واقع در ایالات کالیفرنیا، (ب) میراگر اصطکاکی بکار رفته جهت مقاوم سازی ..... ۱۶۹
- شکل الف-۳۶- الف) Patient Tower، (ب) میراگر اصطکاکی بکار رفته جهت مقاوم سازی ..... ۱۷۰
- شکل الف-۳۷- نمونه کاربردی میراگر ویسکو الاستیک و منحنی هیستریزس آن ..... ۱۷۱
- شکل الف-۳۸- جزئیات میراگر با سیال ویسکوز ..... ۱۷۱
- شکل الف-۳۹- جایگذاری میراگر با سیال ویسکوز در یک قاب سازهای ..... ۱۷۲
- شکل الف-۴۰- نحوه انتقال انرژی به صورت هدفمند ..... ۱۷۴
- شکل الف-۴۱- نحوه عملکرد سیستم کنترل فعال ..... ۱۷۵
- شکل الف-۴۲- شماتیک سیستم AMD ..... ۱۷۷
- شکل الف-۴۳- اولین نمونه دستکاه AMD در ژاپن ..... ۱۷۸
- شکل الف-۴۴- جرم میراگر فعال (AMD) نصب شده بر روی محل فرود هلی کوپتر در یکی از ساختمان های ژاپن ..... ۱۷۸
- شکل الف-۴۵- جرم میراگر فعال: الف) جکهای جرم میراگر فعال نصب شده در زیر محل فرود هلی کوپتر، (ب) لایه های تکیه گاهی ..... ۱۷۹
- شکل الف-۴۶- شماتیک سیستم تاندون فعال ..... ۱۷۹
- شکل الف-۴۷- شماتیک سیستم مهاربند فعال ..... ۱۸۰
- شکل الف-۴۸- نحوه عملکرد سیستم کنترل نیمه فعال ..... ۱۸۲
- شکل الف-۴۹- میراگر با دریچه متغیر ..... ۱۸۳
- شکل الف-۵۰- میراگر روزنه متغیر نصب شده بر روی پل اینتر استیت در اکالاهاما ..... ۱۸۴
- شکل الف-۵۱- شماتیک وسیله سختی متغیر نیمه فعال ..... ۱۸۵
- شکل الف-۵۲- بکارگیری میراگرهای با سختی متغیر در ساختمان مرکز تحقیقات Kobori ..... ۱۸۶
- شکل الف-۵۳- میراگر با جرم متوازن نیمه فعال ..... ۱۸۷
- شکل الف-۵۴- نمونه ای از میراگرهای MR با مقیاس کوچک ..... ۱۸۹
- شکل الف-۵۵- پل کابلی Eiland، واقع در هلند، تقویت شده با میراگر MR در سال ۲۰۰۴ میلادی ..... ۱۸۹
- شکل الف-۵۶- پل کابلی Dubrovnik، تقویت شده با میراگر MR در سال ۲۰۰۶ میلادی ..... ۱۹۰
- شکل الف-۵۷- نخستین کاربرد سیستمهای نیمه فعال در ساختمان Nihon – Kagaku – Miraikan (موزه ملی توکیو) ..... ۱۹۰
- شکل الف-۵۸- برش طولی اجزای اصلی میراگرهای اصطکاکی سیلندری ..... ۱۹۸
- شکل الف-۵۹- برش طولی میراگر اصطکاکی سیلندری مو نتاژ شده ..... ۱۹۸
- شکل الف-۶۰- چند نمونه اتصال انتهایی برای میراگرهای اصطکاکی سیلندری ..... ۱۹۸
- شکل الف-۶۱- ابزاربندی و نحوه اتصال اجزای آزمایش ..... ۲۰۰
- شکل الف-۶۲- نحوه اتصال خط کش الکترونیکی به دو سر میراگر ..... ۲۰۰
- شکل الف-۶۳- منحنی هیستریسیس میراگر شماره ۲ ..... ۲۰۱
- شکل الف-۶۴- جزئیات المان TADAS ..... ۲۰۲
- شکل الف-۶۵- موقعیت نصب سیستم TADAS در یک قاب ..... ۲۰۲
- شکل الف-۶۶- میراگرهای TADAS مورد آزمایش ..... ۲۰۳
- شکل الف-۶۷- نمایی از setup آزمایش ..... ۲۰۴



۲۰۵	شکل الف-۶۸- منحنی تغییرات نیرو- تغییر مکان TADAS-25-I
۲۰۷	شکل الف-۶۹- میراگر LED
۲۰۷	شکل الف-۷۰- میراگر LED
۲۰۸	شکل الف-۷۱- میراگر LED
۲۰۸	شکل الف-۷۲- میراگر PVD
۲۰۹	شکل الف-۷۳- میراگر PVD
۲۱۰	شکل الف-۷۴- میراگر RVD
۲۱۱	شکل الف-۷۵- میراگر شرکت DAMPTECH
۲۱۲	شکل الف-۷۶- میراگر شرکت DAMPTECH
۲۱۲	شکل الف-۷۷- میراگر شرکت DAMPTECH
۲۱۳	شکل الف-۷۸- میراگر شرکت DAMPTECH
۲۱۳	شکل الف-۷۹- میراگر شرکت DAMPTECH
۲۱۳	شکل الف-۸۰- میراگر شرکت DAMPTECH
۲۱۴	شکل الف-۸۱- میراگر شرکت DAMPTECH
۲۱۴	شکل الف-۸۲- میراگر شرکت DAMPTECH
۲۱۵	شکل الف-۸۳- میراگر شرکت DAMPTECH
۲۱۵	شکل الف-۸۴- میراگر شرکت DAMPTECH
۲۱۵	شکل الف-۸۵- میراگر شرکت DAMPTECH
۲۱۶	شکل الف-۸۶- میراگر شرکت DAMPTECH
۲۱۶	شکل الف-۸۷- میراگر شرکت DAMPTECH
۲۱۷	شکل الف-۸۸- میراگر شرکت DAMPTECH
۲۱۸	شکل الف-۸۹- میراگر هیدرولیکی در هتل آزادی
۲۱۸	شکل الف-۹۰- جزئیات میراگرهای هیدرولیکی
۲۱۹	شکل الف-۹۱- (الف) میراگرهای شرکت FIP، (ب) مشخصات فنی
۲۲۰	شکل الف-۹۲- سیستم تست میراگرها
۲۲۰	شکل الف-۹۳- نمودار نیرو-سرعت میراگر ویسکوز هتل آزادی
۲۲۱	شکل الف-۹۴- سیستم مانیتورینگ میراگرهای هتل آزادی
۲۲۳	<b>پیوست ب</b>
۲۲۳	<b>مقایسه ساختمان‌های دارای سیستم‌های استهلاک انرژی</b>
۲۲۴	شکل ب-۱- پلان ساختمان مینا
۲۲۵	شکل ب-۲- مقاطع معرفی شده برای اعضای قاب
۲۲۳	شکل ب-۳- پلان ساختمان با جانمایی میراگرها
۲۳۵	شکل ب-۴- نمونه ای از میراگرهای شرکت Damptech
۲۳۵	شکل ب-۵- میراگر اصطکاکی ۴ مفصله با ظرفیت ۲۲۵۰ کیلونیوتن
۲۳۵	شکل ب-۶- میراگر مورد استفاده در پروژه
۲۵۳	شکل ب-۷- مقایسه برش و نیروی طبقات در ساختمان ۴ طبقه
۲۵۳	شکل ب-۸- مقایسه برش و نیروی طبقات در ساختمان ۸ طبقه
۲۵۴	شکل ب-۹- مقایسه برش و نیروی طبقات در ساختمان ۱۲ طبقه



## فهرست جداول

۱.....	چکیده
۱.....	فصل اول
۱.....	الزامات طراحی لرزه‌ای سازه‌ها با استفاده از سیستم‌های استهلاک انرژی
۵.....	جدول (۱-۱) مقادیر $S_{DI}$ بر حسب نوع خاک
۲۴.....	جدول (۲-۱) ضرایب میرایی هنگامی که دوره تناوب سازه بیشتر از $T_0$ باشد
۳۳.....	جدول (۳-۱) ضرایب نیرو $C_{mFD}^{-1}$
۳۴.....	جدول (۴-۱) ضرایب نیرو $C_{mFV}^{-1}$
۴۳.....	فصل دوم
۴۳.....	الزامات بهسازی لرزه‌ای سازه‌ها با استفاده از سیستم‌های استهلاک انرژی
۵۴.....	جدول (۱-۲) ضرایب $B_1$ و $B_s$ بر حسب میرایی مورد نظر
۵۵.....	جدول (۲-۲) مقادیر ضریب $C_m$
۶۴.....	جدول (۳-۲) مقدار ضریب $CO^1$
۸۱.....	فصل سوم
۸۱.....	راهنما و تفسیر
۹۳.....	جدول (۱-۳) ضرایب $F_a$ براساس مشخصات ساختگاه
۹۳.....	جدول (۲-۳) ضرایب $F_v$ براساس مشخصات ساختگاه
۱۰۳.....	جدول (۳-۳) مقادیر ضرایب اصلاح حاصل از مطالعات رامیرز و همکاران (۲۰۰۱)
۱۲۵.....	جدول (۴-۳) مقادیر پارمتر $\lambda$
۱۳۱.....	پیوست الف
۱۳۱.....	انواع و مشخصات سیستم‌های میراگر
۱۵۰.....	جدول الف-۱- استفاده از TMDها در سطح بین المللی
۱۵۶.....	جدول الف-۲- استفاده از TLDها در سطح بین المللی
۱۹۱.....	جدول الف-۳- کاربرد سیستم‌های جداگر لرزه‌ای و استهلاک انرژی
۱۹۶.....	جدول الف-۴- مقایسه میراگرهای غیرفعال مورد استفاده برای کاهش پاسخ لرزه‌ای سازه‌ها
۲۲۳.....	پیوست ب
۲۲۳.....	مقایسه ساختمان‌های دارای سیستم‌های استهلاک انرژی
۲۲۶.....	جدول ب-۱- کنترل جابجائی در دو راستای ساختمان ۴ طبقه مینا
۲۲۷.....	جدول ب-۲- وزن نهائی اسکلت ساختمان ۴ طبقه مینا
۲۲۸.....	جدول ب-۳- کنترل جابجائی در دو راستای ساختمان ۸ طبقه مینا
۲۲۹.....	جدول ب-۴- وزن نهائی اسکلت ساختمان ۸ طبقه مینا
۲۳۰.....	جدول ب-۵- کنترل جابجائی در دو راستای ساختمان ۱۲ طبقه مینا
۲۳۲.....	جدول ب-۶- وزن نهائی اسکلت ساختمان ۱۲ طبقه مینا



جدول ب-۷	مشخصات میراگرهای اصطکاکی به کار رفته در ساختمان های مینا	۲۳۶
جدول ب-۸	مشخصات میراگرهای ویسکوالاستیک به کار رفته در ساختمان های مینا	۲۳۶
جدول ب-۹	میرائی موثر ساختمان های دارای میراگر اصطکاکی	۲۳۷
جدول ب-۱۰	محاسبات میرائی موثر در ساختمان ۴ طبقه با میراگر اصطکاکی	۲۳۸
جدول ب-۱۱	محاسبات میرائی موثر در ساختمان ۸ طبقه با میراگر اصطکاکی	۲۳۸
جدول ب-۱۲	محاسبات میرائی موثر در ساختمان ۱۲ طبقه با میراگر اصطکاکی	۲۳۹
جدول ب-۱۳	کنترل جابجائی در دو راستای ساختمان ۴ طبقه با میراگر اصطکاکی	۲۳۹
جدول ب-۱۴	کنترل جابجائی در دو راستای ساختمان ۸ طبقه با میراگر اصطکاکی	۲۴۰
جدول ب-۱۵	کنترل جابجائی در دو راستای ساختمان ۱۲ طبقه با میراگر اصطکاکی	۲۴۱
جدول ب-۱۶	میرائی موثر ساختمان های دارای میراگر ویسکوالاستیک	۲۴۲
جدول ب-۱۷	محاسبات میرائی موثر در ساختمان ۴ طبقه با میراگر ویسکوالاستیک	۲۴۲
جدول ب-۱۸	محاسبات میرائی موثر در ساختمان ۸ طبقه با میراگر ویسکوالاستیک	۲۴۳
جدول ب-۱۹	محاسبات میرائی موثر در ساختمان ۱۲ طبقه با میراگر ویسکوالاستیک	۲۴۳
جدول ب-۲۰	کنترل جابجائی در دو راستای ساختمان ۴ طبقه با میراگر ویسکوالاستیک	۲۴۴
جدول ب-۲۱	کنترل جابجائی در دو راستای ساختمان ۸ طبقه با میراگر ویسکوالاستیک	۲۴۵
جدول ب-۲۲	کنترل جابجائی در دو راستای ساختمان ۱۲ طبقه با میراگر ویسکوالاستیک	۲۴۶
جدول ب-۲۳	میرائی موثر ساختمان های دارای میراگر ویسکوز	۲۴۷
جدول ب-۲۴	محاسبات میرائی موثر در ساختمان ۴ طبقه با میراگر ویسکوز	۲۴۷
جدول ب-۲۵	محاسبات میرائی موثر در ساختمان ۸ طبقه با میراگر ویسکوز	۲۴۸
جدول ب-۲۶	محاسبات میرائی موثر در ساختمان ۱۲ طبقه با میراگر ویسکوز	۲۴۸
جدول ب-۲۷	کنترل جابجائی در دو راستای ساختمان ۴ طبقه با میراگر ویسکوز	۲۴۹
جدول ب-۲۸	کنترل جابجائی در دو راستای ساختمان ۸ طبقه با میراگر ویسکوز	۲۴۹
جدول ب-۲۹	کنترل جابجائی در دو راستای ساختمان ۱۲ طبقه با میراگر ویسکوز	۲۵۰
جدول ب-۳۰	مقایسه میزان متوسط جابجائی نسبی طبقات در ساختمان ۴ طبقه با و بدون میراگر	۲۵۱
جدول ب-۳۱	مقایسه میزان متوسط جابجائی نسبی طبقات در ساختمان ۸ طبقه با و بدون میراگر	۲۵۲
جدول ب-۳۲	مقایسه میزان متوسط جابجائی نسبی طبقات در ساختمان ۱۲ طبقه با و بدون میراگر	۲۵۲
جدول ب-۳۳	مقایسه میزان برش پایه در ساختمان ۴ طبقه با و بدون میراگر	۲۵۲
جدول ب-۳۴	مقایسه میزان برش پایه در ساختمان ۸ طبقه با و بدون میراگر	۲۵۲
جدول ب-۳۵	مقایسه میزان برش پایه در ساختمان ۱۲ طبقه با و بدون میراگر	۲۵۳
جدول ب-۳۶	مقایسه وزن اسکلت در ساختمان ۴ طبقه با و بدون میراگر	۲۵۴
جدول ب-۳۷	مقایسه وزن اسکلت در ساختمان ۸ طبقه با و بدون میراگر	۲۵۴
جدول ب-۳۸	مقایسه وزن اسکلت در ساختمان ۱۲ طبقه با و بدون میراگر	۲۵۵

## چکیده

استفاده از ابزارهای کنترل سازه که در رده‌های ابزارهای کنترل فعال، نیمه فعال و غیرفعال طبقه‌بندی می‌شوند، در سازه‌هایی که دارای اهداف بهسازی سخت‌گیرانه هستند توصیه می‌شود. انتخاب این ابزارها، از جمله سیستم‌های استهلاک انرژی باید بر اساس هدف بهسازی ساختمان، که اساساً وابسته به عملکرد مورد انتظار در برابر زلزله است، صورت پذیرد. استفاده از میراگرها که در زمره سیستم‌های اتلاف انرژی غیرفعال رده‌بندی می‌شوند، باعث افزایش میرایی و در برخی موارد افزایش سختی سازه، افزایش شکل‌پذیری سازه و در نهایت، افزایش ایمنی سازه و ملحقات آن نسبت به آسیب‌های وارده در اثر زلزله می‌شود. علاوه بر این، هزینه منطقی‌تر این ابزار، استفاده از آنها را در مقایسه با سایر ابزارهای اتلاف انرژی، از جمله جداسازهای لرزه‌ای، وسعت بخشیده است. به همین دلیل، لزوم تدوین دستورالعملی جهت بهره‌گیری از این ابزارها در طراحی و مقاوم‌سازی ساختمان‌ها وجود داشته‌است. دستورالعمل حاضر بدین منظور تدوین شده و در دو فصل اصلی، ضوابط بهره‌گیری از میراگرها را در مباحث طراحی و مقاوم‌سازی ارائه می‌نماید. فصل سوم با هدف تشریح رفتار میراگرها به طور عمومی و نیز، مورد توجه قرار دادن ویژگی‌های خاص برخی از میراگرها، و همچنین، ارائه رهنمودهایی برای تعیین برخی مشخصات محاسباتی در فرآیند طراحی میراگرها تدوین گردید. همچنین، در پیوست الف، کلیات مرتبط با انواع ابزارهای کنترل سازه و مشخصات آنها و جزئیات رفتاری و مدلسازی آنها ارائه می‌شود. علاوه بر این، چند ساختمان نمونه که با استفاده از این دستورالعمل، و با حضور میراگرها طراحی و مقاوم‌سازی شده‌اند، در پیوست ب بررسی می‌شوند. تفسیر دستورالعمل حاضر نیز به عنوان یک مجموعه مجزای از گزارش حاضر ارائه خواهد شد.



## فصل اول

### الزامات طراحی لرزه‌ای سازه‌ها با استفاده از سیستم‌های استهلاک انرژی

#### ۱-۱- دامنه کاربرد

هدف از این فصل، ارائه مبانی محاسباتی مربوط به طراحی لرزه‌ای ساختمان‌های جدیدالاحداث، با استفاده از ابزارهای اتلاف انرژی و به طور خاص میراگرهاست. سازه‌های دارای سیستم میراگر و اجزاء آن باید براساس ضوابط این فصل طراحی و اجرا شوند.

#### ۱-۲- تعاریف

- **میراگر:** المان سازه‌ای شکل‌پذیر، به عنوان جزئی از سیستم میرائی می‌باشد که در اثر حرکت نسبی دو انتهای آن، باعث اتلاف انرژی می‌گردد. میراگر شامل تمام پین‌ها، پیچ‌ها، ورق‌های اتصال، مهاربندهای کششی و اجزای دیگر که برای اتصال میراگر به دیگر المان‌های سازه‌ای مورد نیاز است، می‌باشد. انواع میراگرها از لحاظ نحوه عملکرد عبارتند از میراگرهای وابسته به تغییرمکان، میراگرهای وابسته به سرعت و یا ترکیبی از این دو. میراگرها بسته به نوع و براساس رفتار مورد انتظار، به صورت‌های خطی یا غیرخطی طراحی می‌شوند.

- **سیستم میرائی:** مجموعه‌ای از المان‌های سازه‌ای شامل میراگر، المان‌های سازه‌ای یا مهاربندهای موجود جهت انتقال نیرو از میراگر به پی ساختمان، و المان‌های سازه‌ای مورد نیاز برای انتقال نیرو از میراگر به سیستم مقاوم لرزه‌ای می‌باشد.



- **میراگر وابسته به تغییرمکان:** نیروی میراگر وابسته به تغییرمکان، اساساً تابع تغییرمکان نسبی بین دو انتهای میراگر می‌باشد. در این وسایل پاسخ اساساً مستقل از سرعت نسبی دو انتهای میراگر و یا فرکانس تحریک می‌باشد.

**میراگر وابسته به سرعت:** رابطه نیرو-تغییرمکان برای میراگر "وابسته به سرعت" اساساً تابع سرعت دو انتهای میراگر می‌باشد. این رابطه می‌تواند تابع تغییرمکان نسبی میان دو انتهای میراگر باشد. **نامنظمی پیششی در پلان:** در صورتیکه بیشترین دررفت (گریز) طبقه، با در نظر گرفتن پیشش تصادفی و ضریب بزرگنمایی پیشش  $A_j=1.0$ ، در یک انتهای سازه، بیشتر از  $1/2$  برابر میانگین دررفت (گریز) طبقه در دو سمت سازه باشد، سازه دارای نامنظمی پیششی در پلان می‌باشد. ضوابط نامنظمی پیششی تنها در سازه‌های با دیافراگم صلب و نیمه صلب اعمال می‌شود.

**نامنظمی شدید پیششی در پلان:** در صورتیکه بیشترین دررفت (گریز) طبقه، با در نظر گرفتن پیشش تصادفی و ضریب بزرگنمایی پیشش  $A_j=1.0$ ، در یک انتهای سازه، بیشتر از  $1/4$  برابر میانگین دررفت (گریز) طبقه در دو انتهای سازه باشد، سازه دارای نامنظمی پیششی شدید در پلان می‌باشد. ضوابط نامنظمی شدید پیششی تنها در سازه‌های با دیافراگم صلب و نیمه صلب اعمال می‌شود.

**نامنظمی سختی در ارتفاع- طبقه نرم:** در مواردی که سختی جانبی هر طبقه از ۷۰ درصد سختی جانبی طبقه روی خود و یا کمتر از ۸۰ درصد متوسط سختی‌های جانبی سه طبقه روی خود باشد، سازه دارای طبقه نرم خواهد بود.

**نامنظمی شدید سختی در ارتفاع- طبقه خیلی نرم:** در مواردی که سختی جانبی هر طبقه از ۶۰ درصد سختی جانبی طبقه روی خود و یا کمتر از ۷۰ درصد متوسط سختی‌های جانبی سه طبقه روی خود باشد، سازه دارای طبقه خیلی نرم خواهد بود.



نامنظمی هندسی در ارتفاع: در مواردی که ابعاد افقی سیستم باربر جانبی در هر طبقه بیشتر از ۱۳۰ درصد آن در طبقات مجاور باشد، سازه دارای نامنظمی هندسی در ارتفاع می‌باشد.

نامنظمی جرمی در ارتفاع: در شرایطی که جرم طبقه‌ای (به استثنای بام و خرپشته) نسبت به جرم طبقه زیرین خود بیشتر از ۵۰ درصد تغییر داشته باشد، سازه دارای نامنظمی جرمی در ارتفاع است.

### ۱-۳- ضوابط عمومی طراحی:

#### ۱-۳-۱- طراحی لرزه‌ای

طراحی لرزه‌ای سازه‌های با سیستم میرایی، باید با استفاده از طیف طرح تعیین شده در استاندارد ۲۸۰۰ و روش تحلیل و الزامات طراحی ارائه شده در این فصل، انجام شود.

#### ۱-۳-۲- ضوابط سیستم

در طراحی سازه باید ضوابط اولیه برای سیستم باربر جانبی و سیستم میراگر مطابق آنچه که در این بخش ارائه خواهد شد، لحاظ شود. سیستم باربر جانبی باید مقاومت مورد نیاز در مقابل نیروهای معرفی شده در بخش ۱-۳-۲-۱ را داشته باشد. استفاده از ترکیب سیستم باربر جانبی و سیستم میرایی برای تامین ضوابط دریافت (گریز) مجاز می‌باشد.

#### ۱-۳-۲-۱- سیستم باربر جانبی

سازه‌های مجهز به سیستم میرایی لازم است دارای سیستم باربر جانبی بگونه‌ای باشند که در هر جهت جانبی، با یکی از انواع معرفی شده در استاندارد ۲۸۰۰ مطابقت داشته باشد. در طراحی سیستم باربر جانبی باید ضوابط بخش ۱-۳-۲-۱ و موارد زیر در هر جهت نظر گرفته شوند:

۱- برش پایه لرزه‌ای برای طراحی سیستم باربر جانبی نباید از  $V_{min}$  کمتر در نظر گرفته شود  $V_{min}$  از بزرگ‌ترین مقادیر محاسبه شده از روابط ۱-۱ و ۲-۱ بدست می‌آید.



$$V_{\min} = \frac{V}{B_{V+1}} \quad (1-1)$$

$$V_{\min} = 0.8V \quad (2-1)$$

$V$ : برش پایه لرزه‌ای در جهت مورد نظر که با استفاده از روش استاتیکی معادل استاندارد ۲۸۰۰ بدست می‌آید.

$B_{V+1}$ : ضریب اصلاح میرائی ارائه شده در جدول ۲-۱ براساس میرایی موثر که از حاصل جمع میرایی ویسکوز در مود اصلی ارتعاش سازه در جهت مورد نظر،  $\beta_{Vm}(m=1)$ ، و میرایی ذاتی،  $\beta_I$  (در پیود سازه برابر  $T_1$ ) بدست می‌آید و برای مقیاس‌سازی طیف طرح به کار می‌رود.

**تبصره:** برش پایه لرزه‌ای مورد استفاده برای طراحی لرزه‌ای در صورتی که هر یک از شرایط زیر برقرار باشد نباید کمتر از  $1/0.7V$  در نظر گرفته شود.

الف- تعداد میراگر جهت مقابله با پیچش سازه در هر تراز طبقه کمتر از ۲ عدد باشد.

ب- سیستم باربر جانبی دارای نا منظمی پیچشی شدید در پلان یا نا منظمی سختی جانبی با وجود طبقه خیلی نرم در ارتفاع باشد.

المان‌های مقاوم در برابر نیروی جانبی که عضوی از سیستم میرایی می‌باشند یا برای تحمل نیروهای ناشی از سیستم میراگر مورد نیاز می‌باشند، باید ضوابط تکمیلی بخش ۱-۲-۲ را برآورده نمایند.

#### ۱-۳-۲-۲- سیستم میرایی

المان‌های سیستم میرایی باید به‌گونه‌ای طراحی شوند که برای بارهای طراحی شامل نیروهای لرزه‌ای کاهش نیافته میراگر که در بخش ۱-۲-۸-۱ به آن اشاره شده است، در حالت خطی بماند. لازم به ذکر است در صورتی که دهانه دربرگیرنده میراگر، باربر جانبی باشد، این المان‌ها شامل دهانه‌ای که میراگر در آن قرار گرفته است نیز می‌شود (شکل ۱-۳ تفسیر دستورالعمل). در صورتی که نتایج آزمایشات و تحلیل‌ها نشان دهد که غیر خطی شدن المان‌ها بر کارکرد سیستم میرایی تأثیر منفی نمی‌گذارد و پاسخ غیرخطی به مقادیر ارائه شده در بخش ۱-۲-۸-۱ محدود می‌گردد، المان‌های سیستم می‌توانند وارد محدوده غیرخطی شوند.





### ۱-۳-۳- شتابنگاشت

#### ۱-۳-۳-۱- طیف طرح

به منظور تحلیل و طراحی سازه با سیستم میرایی باید از طیف طرح ارائه شده در استاندارد ۲۸۰۰ استفاده شود. اما در صورت وجود هر یک از دو شرط زیر باید از طیف طرح ویژه ساختگاه استفاده شود. در اینجا، مقدار  $S_{D1}$  متناظر با شتاب پاسخ طیفی زلزله طرح در دوره تناوب برابر با ۱ ثانیه است و جزئیات محاسبه آن در تفسیر دستورالعمل ارائه شده است.

۱- سازه بر روی خاک نوع IV استاندارد ۲۸۰۰ قرار داشته باشد.

۲- سازه بر روی سایت با  $S_{D1}$  بزرگتر و یا مساوی  $0.4F_v$  قرار داشته باشد. مقدار  $F_v$  و نحوه محاسبه آن

در تفسیر راهنما ارائه شده است. (سازه بر روی سایت با  $S_{D1}$  بزرگتر و یا مساوی مقادیر ارائه شده در

جدول ۱-۱ باشد.)

جدول (۱-۱) مقادیر  $S_{D1}$  بر حسب نوع خاک

نوع خاک	$S_{D1}$
I	۰/۴
II	۰/۵۲
III	۰/۶
IV	۰/۹۶

#### ۱-۳-۳-۲- روش تحلیل تاریخچه زمانی

شتابنگاشت مورد استفاده برای زلزله طرح و بیشترین زلزله مورد نظر (MCE) باید با استفاده از استاندارد ۲۸۰۰ تهیه شود. در صورت عدم وجود مطالعات ویژه ساختگاه، لازم است MCE مساوی ۱/۵ برابر طیف طرح استاندارد ۲۸۰۰ در نظر گرفته شود. در طراحی و تحلیل تمامی سازه‌های دارای میراگر که هر یک از شرایط زیر را داشته باشند، باید از روش تحلیل تاریخچه زمانی استفاده شود.

۱- سازه بر روی سایت با  $S_{D1}$  بزرگتر و یا مساوی مقادیر ارائه شده در جدول ۱-۱ باشد.



۲- در صورتیکه مقرر شده باشد که از تمام ظرفیت میراگر استفاده شود، سیستم میرایی به طور دقیق مدل‌سازی شده و با استفاده از روش تاریخچه زمانی تحلیل شده باشد.

### ۱-۳-۴- انتخاب روش تحلیل

سازه دارای سیستم میرایی باید با روش خطی، روش غیرخطی، و یا ترکیبی از روش‌های خطی و غیرخطی مطابق با ضوابط این بخش طراحی شوند.

بدون توجه به روش تحلیل استفاده شده، اگر سازه بر روی سایت با  $S_{D1}$  بزرگتر و یا برابر مقادیر ارائه شده در جدول ۱-۱ باشد، حداکثر پاسخ دینامیکی سازه و المان‌های سیستم میرایی باید با مقادیر حاصل از روش تاریخچه زمانی (پاسخ) غیر خطی کنترل شود.

#### ۱-۳-۴-۱- روش غیرخطی

روش غیرخطی ارائه شده در بخش ۱-۴ برای طراحی تمامی سازه‌های با سیستم میرایی مجاز می‌باشد. در این تحلیل:

- سازه باید برای زلزله طرح، طراحی شود.

- سیستم میراگر که شامل قابی که میراگر در آن قرار گرفته است نیز می‌شود، باید برای زلزله حداکثر، طراحی شود.

#### ۱-۳-۴-۲- روش طیف پاسخ

روش طیف پاسخ ارائه شده در بخش ۱-۵ جهت طراحی سازه با سیستم میرایی در صورت تامین شرایط زیر مجاز می‌باشد:

۱- در جهت مورد نظر، سیستم میرایی دارای حداقل دو میراگر در هر طبقه جهت مقابله با پیچش باشد.

۲- مجموع میرایی موثر مود اصلی سازه،  $\beta_{mD}$ ، ( $m=1$ )، در جهت مورد نظر از ۳۵٪ میرایی بحرانی تجاوز نکند.



### ۱-۳-۴-۳- روش نیروی جانبی معادل

روش نیروی جانبی معادل ارائه شده در بخش ۱-۶ برای استفاده در طراحی سازه با سیستم میرایی در صورت داشتن شرایط زیر، مجاز می‌باشد:

۱- در جهت مورد نظر، سیستم میرایی دارای حداقل دو میراگر در هر طبقه جهت مقابله با پیچش باشد.

۲- مجموع میرایی موثر مود اصلی،  $\beta_{mD}(m=1)$ ، سازه در جهت مورد نظر از ۳۵٪ بحرانی تجاوز نکند.

۳- در سیستم باربر جانبی، نامنظمی پیچشی یا نامنظمی شدید پیچشی در پلان و یا نامنظمی سختی در ارتفاع-طبقه نرم، نامنظمی شدید سختی در ارتفاع-طبقه خیلی نرم، نامنظمی هندسی در ارتفاع یا نامنظمی جرمی در ارتفاع وجود نداشته باشد.

۴- دیافراگم‌های کف باید طبق شرایط استاندارد ۲۸۰۰ صلب باشند.

۵- ارتفاع سازه از روی تراز پایه از ۳۰ متر تجاوز نکند.

### ۱-۳-۵- سیستم میرایی

#### ۱-۳-۵-۱- طراحی میراگر

طراحی، ساخت و نصب میراگر باید بر اساس پاسخ بیشینه زلزله مورد نظر (MCE) صورت گرفته و در طراحی آن باید ملاحظات زیر در نظر گرفته شوند:

۱- میراگرهای وابسته به تغییر مکان و وابسته به سرعت باید برای دامنه جابه‌جایی برابر با ۱/۳ برابر بیشینه جابه‌جایی سازه و میراگرهای وابسته به سرعت برای ۱/۵ برابر سرعت بیشینه سازه تحت زلزله MCE طراحی شوند.

۲- فرسایش ناشی از جابجایی‌های بزرگ با چرخه کم (low-cycle) ناشی از نیروهای لرزه‌ای



۳- فرسایش ناشی از جابجایی‌های کوچک با چرخه زیاد (high-cycle) ناشی از نیروهای باد، حرارتی و یا سایر بارگذاری‌های چرخه‌ای

۴- نیروها و تغییرمکان‌های ناشی از بارهای ثقیلی.

۵- زوال اجزای میراگر در اثر خوردگی یا سایش، تجزیه بیولوژیکی، رطوبت یا قرار گرفتن در معرض مواد شیمیایی.

۶- قرار گرفتن در معرض شرایط محیطی شامل، دما، رطوبت، تابش (به عنوان مثال نور فرابنفش)، و مواد خوردنده مثل آب نمک.

میراگرهایی که در اثر خستگی ناشی از حرکت با چرخه پایین (low cycle) دچار شکست می‌شوند، باید در برابر نیروهای باد بدون لغزش، حرکت یا چرخه غیرالاستیک، مقاومت کنند. طراحی میراگر باید با شرایط حرارتی و فرسایشی میراگر و رواداری‌های ساخت و اثرات دیگر که موجب تغییر مشخصات میراگر در طول عمر طراحی می‌شود، سازگاری داشته باشد.

#### ۱-۳-۵-۲ حرکات چند جهته

نقاط اتصال میراگرها باید با در نظر گرفتن تمهیدات کافی برای اثرات ناشی از تغییر مکان‌های هم‌زمان طولی، جانبی، و قائم سیستم میرایی طراحی شوند.

#### ۱-۳-۵-۳ بازرسی و تست‌های دوره‌ای

راه‌های دسترسی برای بازرسی و خارج کردن همه میراگرها باید در نظر گرفته شود. مسئول طراحی باید برای هر یک از میراگرها یک برنامه بازرسی و آزمایش مناسب تهیه نماید تا از عملکرد آنها در طول عمر طراحی خود اطمینان حاصل شود. سند بازرسی و تست باید تاریخچه‌ای از کارکرد میراگرها و تغییرات احتمالی خصوصیات آنها در طول عمر طراحی را در برگرد.



### ۱-۳-۵-۴- کنترل کیفیت

مسئول طراحی باید برنامه کنترل کیفیت برای میراگرهای ساخته شده ارائه نماید. در این برنامه باید ضوابط بخش ۱-۱۰-۲ در نظر گرفته شود.

### ۱-۴-۱- روش غیرخطی

سختی و میرایی میراگر در مدل سازه‌ای باید بر اساس آزمایشهای مشخص شده در بخش ۱-۱۰ باشد. مشخصه‌های غیرخطی نیرو-تغییر مکان در میراگر باید مدل شوند تا به طور صریح وابستگی بین فرکانس، دامنه و مدت زمان بارگذاری لرزه‌ای در نظر گرفته شود.

### ۱-۴-۱-۱- روش غیرخطی تاریخچه زمانی (Nonlinear Response-history)

در تحلیل غیرخطی تاریخچه زمانی باید از مدل ریاضی سازه و سیستم میرایی که در این بخش ارائه شده، استفاده شود. در مدل ریاضی باید مستقیماً رفتار هیستریزس غیرخطی اعضا سازه و میراگر در نظر گرفته شود.

میرایی ذاتی سازه نباید بزرگتر از ۵٪ میرایی بحرانی در نظر گرفته شود، مگر اینکه نتایج آزمایش سیستم برابر لرزه‌ای تحت جابجایی‌ای برابر یا اندکی کمتر از جابجایی تسلیم موثر، مقدار میرایی بیشتری را پیشنهاد نماید.

اگر نیروی محاسبه شده در عضوی از سیستم برابر لرزه‌ای از ۱/۵ برابر مقاومت اسمی آن تجاوز نکند، می‌توان عضو مورد نظر را به صورت خطی مدل نمود.

### ۱-۴-۱-۱-۱- مدلسازی میراگر

در مدل‌سازی ریاضی میراگرهای وابسته به تغییر مکان، باید رفتار هیستریزس میراگر که با اطلاعات بدست آمده از آزمایش سازگار باشد، لحاظ شود. در مدل ریاضی به کار رفته باید کلیه تغییرات قابل ملاحظه در مقاومت، سختی و شکل حلقه هیستریزس در نظر گرفته شود. در مدل‌سازی ریاضی میراگرهای وابسته به سرعت، باید ضریب میرایی وابسته به سرعت میراگر که با اطلاعات بدست آمده از آزمایش سازگار است،



لحاظ شود. همچنین در صورت لزوم باید تغییرات این ضریب میرایی در اثر گذشت زمان و یا تغییرات دما به طور صریح در نظر گرفته شود. اجزای میراگر که آن را به سازه متصل می‌نمایند، باید در مدلسازی لحاظ شوند.

- در صورت تغییر مشخصات وسایل میرایی در طول تحلیل تاریخچه زمانی، می‌توان از پوش پاسخ‌های دینامیکی تحلیل‌های انجام گرفته با در نظر گرفتن حدود بالا و پایین مشخصات میراگر استفاده نمود. در کلیه این موارد حدی برای مشخصات وسایل میرایی متغیر باید به طور صریح خصوصیات و وابسته به زمان میراگر مدلسازی گردد.

این حدود برای مشخصات متغیر وسیله باید شرایط مشابه را ارضاء کند درست شبیه اینکه رفتار وابسته به زمان وسیله به تنهایی مدل شده بود.

#### ۱-۴-۱-۲- پارامترهای پاسخ

در تحلیل تاریخچه زمانی برای هر شتابنگاشت، باید پارامترهای پاسخ شامل بیشترین مقدار نیرو، سرعت و تغییرمکان میراگر به طور مجزا در مورد میراگر وابسته به سرعت، تعیین شود.

اگر حداقل هفت زوج شتاب نگاشت در تحلیل تاریخچه زمانی استفاده شده باشد، می‌توان از میانگین مقادیر نیروهای میراگر، جابجایی، و سرعت‌های بدست آمده از تحلیل‌ها جهت طراحی استفاده نمود. اگر کمتر از هفت زوج شتابنگاشت در تحلیل تاریخچه زمانی استفاده شده باشد، باید از بیشینه مقادیر نیروهای میراگر، جابجایی و سرعت‌های بدست آمده از تحلیل‌ها جهت طراحی استفاده نمود. در این راستا باید حداقل از سه زوج شتابنگاشت استفاده گردد.

#### ۱-۴-۲- روش استاتیکی غیرخطی

مدل‌سازی استاتیکی غیرخطی ذکرشده در دستورالعمل ۳۶۰ و نیروهای جانبی ناشی از آن باید بر سیستم لرزه‌ای مقاوم در برابر زلزله اعمال شوند. نتایج منحنی‌های نیرو-جابجایی ناشی از تحلیل باید به جای جابجایی تسلیم موثر فرضی،  $D_T$  در معادله ۱-۵۴ استفاده شود تا شکل‌پذیری موثر مورد نیاز ناشی از زلزله



طرح،  $\mu_D$  و بشینه زلزله محتمل،  $\mu_M$ ، در روابط ۱-۵۳ و ۱-۵۲ به ترتیب محاسبه شود. مقدار  $(R/C_d)$  باید در معادله ۱-۶، ۱-۷، ۱-۱۰ و ۱-۱۱ برای روش طیف پاسخ و در معادله ۱-۲۵ و ۱-۲۶ و ۱-۳۴ برای روش نیروی جانبی معادل برابر ۱ در نظر گرفته شود.

### ۱-۵-۱- روش طیف پاسخ

در جائیکه از روش طیف پاسخ در تحلیل سازه با میراگر استفاده خواهد شد، ضوابط این بخش باید اعمال شود.

#### ۱-۵-۱-۱- مدل سازی

در مدلسازی ریاضی سیستم باربر لرزه ای و سیستم میرایی باید توزیع سه بعدی جرم، سختی و میرایی در سازه در نظر گرفته شود. همچنین در مدل و تحلیل باید ضوابط تحلیل طیف پاسخ مودال برای سیستم‌های لرزه‌ای در نظر گرفته شود. سختی و خصوصیات میراگر استفاده شده در مدل باید بر اساس آزمایش میراگر مطابق با بخش ۱-۱۰ بدست آید.

همچنین سختی الاستیک المان‌های سیستم میرایی به غیر از میراگر، باید به طور مجزا مدل شوند. سختی میراگر باید با توجه به نوع میراگر که در ادامه ارائه شده مدل شود:

۱- میراگرهای وابسته به تغییر مکان: در این میراگرها باید سختی موثر به نحوی مدل شود که بیانگر نیروی میراگر در پاسخ تغییر مکان مورد نظر (به عنوان مثال دریافت طراحی طبقه) باشد. در روش جایگزین، سختی میراگر اصطکاکی و میراگر هیسترتیک را می‌توان از تحلیل طیف پاسخ حذف نمود، به شرط اینکه نیروهای طراحی در میراگر وابسته به تغییر مکان،  $Q_{DSD}$ ، به عنوان نیروی خارجی به مدل اعمال گردد (سختی میراگر اصطکاکی و میراگر هیسترتیک را می‌توان به شرط اعمال نیروهای طراحی در میراگر وابسته به تغییر مکان،  $Q_{DSD}$ ، به صورت نیروی خارجی، از تحلیل طیف پاسخ حذف نمود)، (بخش ۱-۸-۲-۵).



۲- میراگر وابسته به سرعت: میراگر وابسته به سرعت دارای مؤلفه سختی (به عنوان مثال میراگر ویسکوالاستیک) باید با سختی موثر مربوط به دامنه و فرکانس مورد نظر، مدل شوند.

### ۲-۵-۱ سیستم باربر لرزه‌ای

#### ۱-۲-۵-۱-۱ برش پایه لرزه‌ای

برش پایه لرزه‌ای،  $V$ ، سازه در جهت مورد نظر باید از ترکیب مولفه‌های برش پایه مودال،  $V_m$ ، تعیین گردد به طوریکه رابطه ۳-۱ برقرار باشد.

$$V \geq V_{\min} \quad (۳-۱)$$

برش پایه لرزه‌ای،  $V$ ، سازه باید با روش جذر مجموع مربعات (SRSS) یا روش CQC، مولفه‌های برش پایه مودال،  $V_m$ ، تعیین شود.

#### ۱-۲-۵-۱-۲ برش پایه مودال

برش پایه مودال مد  $m$  ام ارتعاش سازه،  $V_m$ ، در جهت مورد نظر باید با توجه به رابطه ۴-۱ تعیین شود:

$$V_m = C_{sm} \overline{W}_m \quad (۴-۱ \text{ الف})$$

$$\overline{W}_m = \frac{(\sum_{i=1}^n w_i \phi_{im})^2}{\sum_{i=1}^n w_i \phi_{im}^2} \quad (۴-۱ \text{ ب})$$

$C_{sm}$ : ضریب پاسخ لرزه‌ای مد  $m$  ام ارتعاش سازه در جهت مورد نظر مطابق با بخش ۴-۲-۵-۱ ( $m=1$ ) یا بخش ۴-۲-۵-۱ ( $m>1$ ).

$W_m$ : وزن موثر لرزه‌ای مد  $m$  ام ارتعاش سازه

#### ۱-۲-۵-۱-۳ ضریب مشارکت مودی

ضریب مشارکت مودی مد  $m$  ام ارتعاش سازه،  $\Gamma_m$ ، در جهت مورد نظر باید با توجه به رابطه ۵-۱ تعیین شود:

$$\Gamma_m = \frac{\overline{W}_m}{\sum_{i=1}^n w_i \phi_{im}} \quad (۵-۱)$$





$\Phi_{im}$ : شکل مودی یا دامنه تغییر مکان در طبقه  $i$  ام و در مد  $m$  ام ارتعاش سازه در جهت مورد نظر که به یک واحد در سطح بام نرمال شده است.

#### ۱-۵-۲-۴- ضریب پاسخ لرزه‌ای مد اصلی

ضریب پاسخ لرزه‌ای در مد اصلی ( $m=1$ )،  $C_{s1}$ ، در جهت مورد نظر باید با توجه به رابطه ۱-۶ و ۱-۷ تعیین شود.

$$C_{s1} = \left(\frac{R}{C_d}\right) \frac{S_{Ds}}{\Omega_o B_{1D}} \quad \text{برای } T_{1D} < T_s \quad (۱-۶)$$

$$C_{s1} = \left(\frac{R}{C_d}\right) \frac{S_{D1}}{T_{1D}(\Omega_o B_{1D})} \quad \text{برای } T_{1D} \geq T_s \quad (۱-۷)$$

$S_{Ds}$ : شتاب طیفی در محدوده پریود کوتاه طیف شتاب طرح (مقدار شتاب طیفی طیف طرح در پریود  $0.2$  ثانیه طیف طرح استاندارد  $2800$  و یا طیف ویژه ساختگاه)

$S_{D1}$ : شتاب طیفی در پریود یک ثانیه طیف شتاب طرح (مقدار شتاب طیفی طیف طرح در پریود یک ثانیه طیف طرح استاندارد  $2800$  و یا طیف ویژه ساختگاه)

#### ۱-۵-۲-۵- تعیین دوره تناوب مؤثر مود اصلی

دوره تناوب مؤثر مود اصلی ( $m=1$ ) در زلزله طرح،  $T_{1D}$ ، و در بیشترین زلزله مورد نظر  $MCE_R$ ،  $T_{1M}$ ، باید با در نظر گرفتن خصوصیات نیرو-تغییر مکان سازه بعد از تسلیم به صورت صریح یا با توجه به روابط ۱-۸ و ۱-۹ تعیین شود.

$$T_{1D} = T_1 \sqrt{\mu_D} \quad (۱-۸)$$

$$T_{1M} = T_1 \sqrt{\mu_M} \quad (۱-۹)$$



### ۱-۵-۲-۶- ضریب پاسخ لرزه‌ای مدهای بالاتر

ضریب پاسخ لرزه‌ای مود  $m$  ام ارتعاش سازه  $(m > 1)$ ،  $C_{sm}$ ، در جهت مورد نظر با توجه به روابط ۱-۱۰ و ۱-۱۱ باید تعیین شود.

$$C_{sm} = \left( \frac{R}{C_d} \right) \frac{S_{D1}}{\Omega_o B_{mD}} \quad \text{برای } T_m < T_s \quad (10-1)$$

$$C_{sm} = \left( \frac{R}{C_d} \right) \frac{S_{D1}}{T_m (\Omega_o B_{mD})} \quad \text{برای } T_m \geq T_s \quad (11-1)$$

$T_m$ : دوره تناوب بر حسب ثانیه، درمد  $m$  ام ارتعاش سازه در جهت مورد نظر

$B_{mD}$ : ضریب اصلاح میرایی طبق جدول ۱-۲، برای میرایی موثر برابر  $\beta_{mD}$  و دوره تناوب سازه برابر  $T_m$

### ۱-۵-۲-۷- نیروی جانبی طرح

نیروی جانبی طرح در تراز  $i$  ام و درمود  $m$  ام ارتعاش سازه،  $F_{im}$ ، در جهت مورد نظر، باید توسط رابطه ۱-۱۲ تعیین شود.

$$F_{im} = w_i \phi_{im} \frac{\Gamma_m}{W_m} V_m \quad (12-1)$$

نیروهای طراحی المان‌های باربر لرزه‌ای با استفاده از روش SRSS و یا روش CQC، نیروهای طراحی مودال باید تعیین شود.

### ۱-۵-۳- سیستم میرایی

نیروهای طراحی میراگر و المان‌های دیگر سیستم میرایی باید بر اساس تغییر شکل کف (سقف)، دریافت طبقه و پارامترهای پاسخ سرعت طبقه که در ادامه ارائه شده است، تعیین شود.

در تعیین جابجایی‌ها و سرعت‌هایی که برای تعیین بیشترین نیروها در میراگر در هر تراز طبقه استفاده می‌شود، باید زاویه جهت‌گیری هر وسیله در افق و اثر افزایش پاسخ ناشی از پیچش مورد نیاز در طراحی سیستم باربر لرزه‌ای در نظر گرفته شود.



تغییر شکل کف (سقف) در تراز  $i$  ام،  $\delta_{iD}$  و  $\delta_{iM}$ ، دریفت طبقه  $\Delta_D$  و  $\Delta_M$ ، سرعت‌های طبقه  $V_D$  و  $V_M$  باید با در نظر گرفتن هر دو تراز زلزله طرح و بیشترین زلزله مورد نظر (MCE) با توجه به این بخش محاسبه شوند.

#### ۱-۳-۵-۱- تغییر شکل ناشی از زلزله طرح

تغییر شکل سازه ناشی از زلزله طرح در تراز  $i$  ام و  $m$  ام ارتعاش سازه،  $\delta_{imD}$ ، در جهت مورد نظر باید با توجه به رابطه ۱۳-۱ تعیین شود.

$$\delta_{imD} = D_{mD} \phi_{im} \quad (13-1)$$

که  $D_{mD}$  تغییر مکان طراحی در مرکز سختی بام سازه در  $m$  ام، در جهت مورد نظر می باشد. تغییر شکل کل طرح در هر طبقه از سازه باید با استفاده از روش SRSS و یا روش CQC تغییر شکل مودال زلزله طرح تعیین شود.

#### ۲-۳-۵-۱- تغییر مکان بام ناشی از زلزله طرح

تغییر مکان بام سازه در  $m=1$  و  $m>1$  ام و مودهای بالاتر ( $m>1$ ) در اثر زلزله طرح،  $D_{1D}$ ،  $D_{mD}$ ، در جهت مورد نظر باید با توجه به رابطه ۱۴-۱ و ۱۵-۱ تعیین شود.

$$D_{1D} = \left(\frac{g}{4\pi^2}\right) \Gamma_1 \frac{S_{DS} T_{1D}^2}{B_{1D}} \geq \left(\frac{g}{4\pi^2}\right) \Gamma_1 \frac{S_{DS} T_1^2}{B_{1E}} \quad T_{1D} < T_s, \text{ برای } m = 1 \quad (14-1 \text{ الف})$$

$$D_{1D} = \left(\frac{g}{4\pi^2}\right) \Gamma_1 \frac{S_{DS} T_{1D}}{B_{1D}} \geq \left(\frac{g}{4\pi^2}\right) \Gamma_1 \frac{S_{DS} T_1}{B_{1E}} \quad T_{1D} \geq T_s, \text{ برای } m = 1 \quad (14-1 \text{ ب})$$

$$D_{mD} = \left(\frac{g}{4\pi^2}\right) \Gamma_m \frac{S_{D1} T_m}{B_{mD}} \leq \left(\frac{g}{4\pi^2}\right) \Gamma_m \frac{S_{DS} T_m^2}{B_{mD}} \quad m > 1 \quad (15-1)$$

#### ۳-۳-۵-۱- دریفت طبقه ناشی از زلزله طرح

دریفت طرح طبقه در  $m=1$  ام،  $\Delta_{1D}$ ، و در مودهای بالاتر ارتعاش سازه،  $\Delta_{mD}$  ( $m>1$ )، در جهت مورد نظر باید با استفاده از جابجایی مودال سقف، ارائه شده در بخش ۲-۳-۵-۱ تعیین شود.

دریفت کل طرح طبقه،  $\Delta_D$ ، باید با استفاده از روش SRSS و یا روش CQC دریفت مودال زلزله طرح تعیین شود.



### ۱-۵-۳-۴- سرعت طبقه ناشی از زلزله طرح

سرعت طرح طبقه در مود اصلی،  $V_{1D}$  ( $m=1$ )، و مودهای بالاتر ارتعاش سازه ( $m>1$ ) سازه در جهت مورد نظر باید با توجه به روابط ۱۶-۱ و ۱۷-۱ تعیین شود.

$$V_{1D} = \begin{matrix} \text{برای } m=1 \\ (16-1) \\ 2\pi \frac{\Delta_{1D}}{T_{1D}} \end{matrix}$$

$$V_{mD} = \begin{matrix} \text{برای } m>1 \\ (17-1) \\ 2\pi \frac{\Delta_{mD}}{T_m} \end{matrix}$$

سرعت کل طرح طبقه،  $V_D$ ، باید با استفاده از روش SRSS و یا روش CQC سرعت‌های مودال ناشی از زلزله طرح طبقه تعیین شود.

### ۱-۵-۳-۵- پاسخ بیشترین زلزله مورد نظر (MCE)

بیشینه تغییرشکل کل مودال در تراز  $i$  ام، مقادیر دریافت طرح طبقه، و مقادیر سرعت طرح طبقه باید به ترتیب براساس بخش‌های ۱-۳-۵-۱ و ۳-۳-۵-۱ و ۴-۳-۵-۱ تعیین شوند، به جز تغییرمکان طرح بام که باید با تغییرمکان حداکثر بام جایگزین شود. تغییرمکان حداکثر بام سازه در جهت مورد نظر باید با توجه به رابطه ۱۸-۱ و ۱۹-۱ محاسبه شود.

$$D_{1M} = \left(\frac{g}{4\pi^2}\right) \Gamma_1 \frac{S_{MS} T_{1M}^2}{B_{1M}} \geq \left(\frac{g}{4\pi^2}\right) \Gamma_1 \frac{S_{MS} T_1^2}{B_{1E}} \quad \begin{matrix} \text{برای } m=1 \\ T_{1M} < T_s \\ (18-1) \text{ الف} \end{matrix}$$

$$D_{1M} = \left(\frac{g}{4\pi^2}\right) \Gamma_1 \frac{S_{M1} T_{1M}}{B_{1M}} \geq \left(\frac{g}{4\pi^2}\right) \Gamma_1 \frac{S_{M1} T_1}{B_{1E}} \quad \begin{matrix} \text{برای } m=1 \\ T_{1M} \geq T_s \\ (18-1) \text{ ب} \end{matrix}$$

$$D_{mM} = \left(\frac{g}{4\pi^2}\right) \Gamma_m \frac{S_{M1} T_m}{B_{mM}} \leq \left(\frac{g}{4\pi^2}\right) \Gamma_m \frac{S_{MS} T_m^2}{B_{mM}} \quad \begin{matrix} \text{برای } m > 1 \\ (19-1) \end{matrix}$$

$B_{mM}$ : ضریب اصلاح میرائی است که در جدول ۲-۱ برای میرایی موثر برابر  $\beta_{mM}$  و دوره تناوب سازه برابر  $T_m$  تعیین شده است.



## ۶-۱- روش نیروی جانبی معادل

هرجا از روش نیروی جانبی معادل برای طراحی سازه‌ها با سیستم میراگر استفاده می‌شود، ضوابط این بخش باید اعمال شود.

### ۶-۱-۱ مدل سازی

المان‌های سیستم باربر لرزه ای باید براساس ضوابط استاندارد ۲۸۰۰ مدلسازی شوند. برای تحلیل، سازه باید در تراز شالوده با تکیه‌گاه صلب مدل شود. استفاده از این مدل برای سازه‌های قرارگرفته بر روی جداساز لرزه‌ای، یا بستر انعطاف‌پذیر، مجاز نمی‌باشد. همچنین المان‌های سیستم میرایی باید جهت تعیین نیروهای طراحی انتقالی از وسیله میراگر به سیستم باربر لرزه ای و زمین مدلسازی گردند. سختی موثر میراگر وابسته به سرعت باید در مدلسازی لحاظ شود. اگر میرایی موثر با توجه به روش بخش ۱-۷ محاسبه شده و طبق ضوابط بخش‌های ۱-۶-۲ و ۱-۶-۳ برای اصلاح پاسخ استفاده شده باشد، نیازی به مدلسازی میراگر به صورت مجزا نمی‌باشد. مشخصات میرایی و سختی میراگر استفاده شده در مدل باید مبتنی بر ضوابط بخش ۱-۱۰ باشد. (سختی و خصوصیات میراگر استفاده شده در مدل باید بر اساس آزمایش میراگر مطابق با بخش ۱-۱۰ بدست آید).

### ۶-۱-۲ سیستم باربر لرزه ای

#### ۶-۱-۲-۱ برش پایه

برش پایه سیستم باربر لرزه ای،  $V$ ، در جهت مورد نظر باید با ترکیب دو مولفه مودی،  $V_1$  و  $V_R$  با توجه به رابطه ۱-۲۰ تعیین شود.

$$V = \sqrt{V_1^2 + V_R^2} \geq V_{\min} \quad (20-1)$$

که

$V_1$ : مقدار طراحی برش پایه لرزه‌ای در مد اصلی در راستای پاسخ مورد نظر است، که در بخش ۱-۶-۲-۲ تعیین شده است.



$V_R$ : مقدار طراحی برش پایه لرزه‌ای در مدهای باقی‌مانده (Residual mode) در راستای مورد نظر است، که در بخش ۱-۲-۶-۶ تعیین شده است.

$V_{min}$ : کمترین مقدار برش پایه مجاز سازه برای طراحی سیستم باربر لرزه‌ای در جهت مورد نظر است، که در بخش ۱-۲-۳-۱ تعیین شده است.

#### ۱-۲-۶-۶-۲-۲-۲ برش پایه مود اصلی

برش پایه مد اصلی،  $V_1$ ، با توجه به رابطه ۱-۲۱ تعیین می‌گردد.

$$V_1 = C_{s1} \bar{W}_1 \quad (۲۱-۱)$$

$C_{s1}$ : ضریب پاسخ لرزه‌ای مود اصلی که در بخش ۱-۲-۶-۴ تعیین شده است.

$\bar{W}_1$ : وزن موثر لرزه‌ای مود اصلی شامل درصدی از بار زنده که در رابطه ۱-۵ برای  $m=1$  مشخص شده است.

#### ۱-۲-۶-۶-۳-۲-۶-۱ مشخصات مود اصلی

شکل مد اصلی،  $\phi_{i1}$ ، و ضریب مشارکت  $\Gamma_1$ ، باید با تحلیل دینامیکی و استفاده از مشخصات الاستیک سازه و خصوصیات تغییرشکل المان‌های مقاوم یا روابط ۱-۲۲ و ۱-۲۳ تعیین شوند.

$$\phi_{i1} = \frac{h_i}{h_r} \quad (۲۲-۱)$$

$$\Gamma_1 = \frac{\bar{W}_1}{\sum_{i=1}^n w_i \phi_{i1}} \quad (۲۳-۱)$$

$h_i$ : ارتفاع از تراز پایه تا تراز  $i$  ام

$h_r$ : ارتفاع سازه از تراز پایه تا تراز بام

$w_i$ : سهمی از کل وزن موثر لرزه‌ای  $W$ ، اختصاص یافته به تراز  $i$  ام

پریود اصلی،  $T_1$ ، باید با تحلیل دینامیکی و استفاده از مشخصات الاستیک سازه و خصوصیات تغییرشکل المان‌های مقاوم یا رابطه ۱-۲۴ تعیین شود.



$$T_1 = 2\pi \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n w_i \delta_i^2}{g \sum_{i=1}^n f_i \delta_i}} \quad (24-1)$$

$f_i$ : نیروی جانبی در تراز  $i$  ام که با توجه به روابط بند ۲-۳-۹ از ویرایش سوم استاندارد ۲۸۰۰ ایران (بند ۳-۳-۶ از ویرایش چهارم) توزیع شده است

$\delta_i$ : تغییرشکل الاستیک در تراز  $i$  ام سازه ناشی از نیروی جانبی اعمالی  $f_i$

#### ۴-۲-۶-۱ ضریب پاسخ لرزه‌ای مود اصلی

ضریب پاسخ لرزه‌ای مود اصلی،  $C_{S1}$ ، باید از روابط ۱-۲۵ یا ۱-۲۶ تعیین شوند.

$$C_{S1} = \frac{S_{Ds}}{\Omega_o B_{1D}} \left( \frac{R}{C_d} \right) \quad T_{1D} < T_s \quad (25-1)$$

$$C_{S1} = \frac{S_{DT1}}{T_{1D}(\Omega_o B_{1D})} \left( \frac{R}{C_d} \right) \quad T_{1D} \geq T_s \quad (26-1)$$

$S_{DT1}$ : پارامتر شتاب طیف پاسخ طرح در مود اول

$B_{1D}$ : ضریب اصلاح میرایی طبق جدول ۱-۲ برای میرایی موثر برابر  $\beta_{mD}(m=1)$  و دوره تناوب سازه برابر

$T_{1D}$

$T_{1D}$ : مود اول ارتعاش براساس رابطه (۱-۲۷)

#### ۵-۲-۶-۱-۵ تعیین دوره تناوب موثر مود اصلی

دوره تناوب موثر مود اصلی در زلزله طرح،  $T_{1D}$ ، و در بیشترین زلزله موردنظر (MCE)،  $T_{1M}$ ، باید بر اساس

ملاحظات دقیق خصوصیات سازه بعد از تغییر شکل های تسلیم و یا از روابط ۱-۲۷ یا ۱-۲۸ بدست آید.

$$T_{1D} = T_1 \sqrt{\mu_D} \quad (27-1)$$

$$T_{1M} = T_1 \sqrt{\mu_M} \quad (28-1)$$

#### ۶-۲-۶-۱-۶ برش پایه سایر مودها

برش پایه سایر مودها،  $V_R$ ، باید از رابطه ۱-۲۹ تعیین شود.

$$V_R = C_{SR} \bar{W}_R \quad (29-1)$$

$C_{SR}$ : ضریب پاسخ لرزه‌ای مودهای باقی مانده (رابطه ۱-۳۴)



$\bar{W}_R$ : وزن موثر مودهای باقی‌مانده سازه (رابطه ۳۲-۱)

#### ۷-۲-۶-۱ مشخصات سایر مودها

شکل مودهای باقی‌مانده،  $\phi_{iR}$ ، و ضریب مشارکت،  $I_R$ ، و وزن لرزه‌ای موثر مود باقی‌مانده،  $\bar{W}_R$ ، و پریود موثر مود باقی‌مانده،  $T_R$ ، باید با استفاده از روابط ۳۰-۱ الی ۳۲-۱ تعیین شوند.

$$\phi_{iR} = \frac{1 - \Gamma_1 \phi_{i1}}{1 - \Gamma_1} \quad (30-1)$$

$$\Gamma_R = 1 - \Gamma_1 \quad (31-1)$$

$$\bar{W}_R = W - \bar{W}_1 \quad (32-1)$$

$$T_R = 0.4T_1 \quad (33-1)$$

#### ۸-۲-۶-۱ ضریب پاسخ لرزه‌ای مودهای باقی‌مانده

ضریب پاسخ لرزه‌ای مودهای باقیمانده،  $C_{SR}$ ، باید از رابطه (۳۴-۱) تعیین شود.

$$C_{SR} = \frac{S_{DS}}{\Omega_o B_R} \left( \frac{R}{C_d} \right) \quad (34-1)$$

$B_R$ : ضریب اصلاح میرایی طبق جدول ۱-۱ برای میرایی موثر برابر  $\beta_R$  و دوره تناوب سازه برابر  $T_R$

#### ۹-۲-۶-۱ نیروی جانبی طرح

نیروی جانبی طرح در المان‌های سیستم برابر لرزه‌ای ناشی از پاسخ مود اصلی  $F_{i1}$  و پاسخ مودهای

باقی‌مانده،  $F_{iR}$ ، در تراز  $i$  ام سازه در جهت مورد نظر باید با استفاده از روابط ۳۴-۱ و ۳۵-۱ تعیین شود.

$$F_{i1} = w_i \phi_{i1} \frac{\Gamma_1}{\bar{W}_1} V_1 \quad (35-1)$$

$$F_{iR} = w_i \phi_{iR} \frac{\Gamma_R}{\bar{W}_R} V_R \quad (36-1)$$

نیروهای طرح در المان‌های سیستم برابر لرزه‌ای، باید با استفاده از روش SRSS نیروهای ناشی از مودهای

اصلی و مودهای باقی‌مانده تعیین شوند.





### ۱-۶-۳- سیستم میرایی

نیروهای طراحی در میراگر و المانهای دیگر سیستم میرایی باید بر اساس تغییر شکل کف، دریافت طبقه و پارامترهای پاسخ سرعت طبقه که در ادامه ارائه شده است، تعیین شود.

در تعیین بیشترین نیروها در وسیله میرایی در هر تراز طبقه با استفاده از جابجایی و سرعت، باید زاویه جهت گیری هر وسیله در افق را در نظر گرفته شده و اثر افزایش پاسخ ناشی از پیچش مورد نیاز سیستم باربر لرزه ای لحاظ گردد.

تغییر شکل کف در تراز  $i$  ام،  $\delta_{iD}$  و  $\delta_{iM}$ ، دریافت طبقه  $\Delta_D$  و  $\Delta_M$ ، سرعتهای طبقه  $V_D$ ،  $V_m$  باید با در نظر گرفتن شتابنگاشت در هر دو زلزله طرح و بیشترین زلزله مورد نظر با توجه به ضوابط این بخش محاسبه شوند.

### ۱-۳-۶-۱- تغییر شکل کف ناشی از زلزله طرح

تغییر شکل کل در هر طبقه سازه در جهت مورد نظر باید از تغییر شکل کف مود اصلی و مودهای باقی مانده با استفاده از روش SRSS تعیین شود. تغییر شکل کف مود اصلی و مودهای باقی مانده ناشی از زلزله طرح  $\delta_{iRD}$  و  $\delta_{iID}$  در مرکز سختی تراز  $i$  ام سازه در جهت مورد نظر باید از رابطه ۱-۳۷ و ۱-۳۸ تعیین شود.

$$\delta_{iID} = D_{iD}\phi_{iI} \quad (۳۷-۱)$$

$$\delta_{iRD} = D_{iRD}\phi_{iR} \quad (۳۸-۱)$$

$D_{iD}$ : تغییر مکان طراحی مود اصلی در مرکز سختی تراز بام سازه در جهت مورد نظر با توجه به بخش ۱-۶-۳-

۲-۳

$D_{iRD}$ : تغییر مکان طراحی مودهای باقی مانده در مرکز سختی تراز بام سازه در جهت مورد نظر با توجه به

بخش ۱-۶-۳-۲.



### ۱-۶-۳-۲- تغییر مکان بام ناشی از زلزله طرح

تغییر مکان موده‌های اصلی و موده‌های باقی‌مانده ناشی از زلزله طرح،  $D_{1D}$ ،  $D_{RD}$ ، در مرکز سختی تراز بام سازه در جهت مورد نظر با توجه به روابط ۱-۳۹ و ۱-۴۰ تعیین شود.

$$D_{1D} = \left(\frac{g}{4\pi^2}\right) \Gamma_1 \frac{S_{DS} T_{1D}^2}{B_{1D}} \geq \left(\frac{g}{4\pi^2}\right) \Gamma_1 \frac{S_{DS} T_1^2}{B_{1D}} \quad T_{1D} < T_s \quad (۱-۳۹ \text{ الف})$$

$$D_{1D} = \left(\frac{g}{4\pi^2}\right) \Gamma_1 \frac{S_{D1} T_{1D}}{B_{1D}} \geq \left(\frac{g}{4\pi^2}\right) \Gamma_1 \frac{S_{D1} T_1}{B_{1E}} \quad T_{1D} \geq T_s \quad (۱-۳۹ \text{ ب})$$

$$D_{RD} = \left(\frac{g}{4\pi^2}\right) \Gamma_R \frac{S_{D1} T_R}{B_R} \leq \left(\frac{g}{4\pi^2}\right) \Gamma_R \frac{S_{DS} T_R^2}{B_R} \quad (۱-۴۰)$$

### ۱-۶-۳-۳- دریافت طبقات در زلزله طرح

دریافت طبقه زلزله طرح از فرمول ۲-۴۱ باید محاسبه شود.

$$\Delta_D = \sqrt{\Delta_{1D}^2 + \Delta_{RD}^2} \quad (۱-۴۱)$$

$\Delta_D$ : دریافت طرح طبقه ناشی از مود اصلی ارتعاش سازه در جهت مورد نظر

$\Delta_{RD}$ : دریافت طرح طبقه ناشی از موده‌های باقی‌مانده ارتعاش سازه در جهت مورد نظر

دریافت‌های مودال طرح طبقه،  $\Delta_{1D}$ ،  $\Delta_{RD}$  باید از تفاضل تغییر شکل‌های بالا و پایین طبقه با در نظر گرفتن تغییر شکل‌های کف در بخش ۱-۶-۳-۱ باید تعیین شوند.

### ۱-۶-۳-۴- سرعت طبقه در زلزله طرح

سرعت‌های طرح طبقه،  $\nabla_D$ ، در جهت مورد نظر باید از روابط ۱-۴۱ تا ۱-۴۳ محاسبه شوند.

$$\nabla_D = \sqrt{\nabla_{1D}^2 + \nabla_{RD}^2} \quad (۱-۴۱)$$

$$\nabla_{1D} = 2\pi \frac{A_{1D}}{T_{1D}} \quad (۱-۴۲)$$

$$\nabla_{RD} = 2\pi \frac{A_{RD}}{T_R} \quad (۱-۴۳)$$

$\nabla_{1D}$ : سرعت طرح طبقه ناشی از مود اصلی ارتعاش سازه در جهت مورد نظر

$\nabla_{RD}$ : سرعت طرح طبقه ناشی از موده‌های باقی‌مانده ارتعاش سازه در جهت مورد نظر

**۱-۶-۳-۵- پاسخ در بیشترین زلزله محتمل (MCE)**

تغییر شکل‌های بیشینه مودال و کل در تراز  $i$ ام، دریافت طرح طبقه، و سرعت‌های طرح طبقه باید به ترتیب براساس روابط بخش ۱-۶-۳-۲، ۱-۶-۳-۳ و ۱-۶-۳-۴ باشند. فقط جابجایی‌های طرح بام باید با بیشینه جابجایی بام جایگزین شوند. جابجایی‌های بیشینه بام باید از روابط (۱-۴۴) و (۱-۴۵) محاسبه شوند.

$$D_{1M} = \left(\frac{g}{4\pi^2}\right)\Gamma_1 \frac{S_{MS}T_{1M}^2}{B_{1M}} \geq \left(\frac{g}{4\pi^2}\right)\Gamma_1 \frac{S_{MS}T_1^2}{B_{1E}} \quad T_{1M} < T_s \quad (1-44 \text{ الف})$$

$$D_{1M} = \left(\frac{g}{4\pi^2}\right)\Gamma_1 \frac{S_{M1}T_{1M}}{B_{1M}} \geq \left(\frac{g}{4\pi^2}\right)\Gamma_1 \frac{S_{M1}T_1}{B_{1E}} \quad T_{1M} \geq T_s \quad (1-44 \text{ ب})$$

$$D_{RM} = \left(\frac{g}{4\pi^2}\right)\Gamma_R \frac{S_{M1}T_R}{B_R} \leq \left(\frac{g}{4\pi^2}\right)\Gamma_R \frac{S_{MS}T_R^2}{B_R} \quad (1-45)$$

$S_{M1}$ : پارامتر شتاب طیف پاسخ ( $MCE_R$ ) با میرایی ۵٪ در دوره تناوب ۱ ثانیه، تنظیم شده برای اثرات نوع خاک محل است که جزئیات محاسبه آن در تفسیر دستورالعمل ارائه شده است.

$S_{MS}$ : پارامتر شتاب طیف پاسخ ( $MCE_R$ ) با میرایی ۵٪ در دوره تناوب های کوچک، تنظیم شده برای اثرات نوع خاک محل است که جزئیات محاسبه آن در تفسیر دستورالعمل ارائه شده است.

$B_{1M}$ : ضریب اصلاح میرایی طبق جدول ۱-۱ برای میرایی موثر برابر  $\beta_{mM}$  ( $m=1$ ) و دوره تناوب سازه برابر

$T_{1M}$

**۱-۷-۱- اصلاح پاسخ میرایی**

مطابق ضوابط بخش‌های ۱-۵ و ۱-۶، باید پاسخ سازه برای اثرات سیستم میرایی اصلاح شود.

**۱-۷-۱-۱- ضریب میرایی**

اگر دوره تناوب سازه برابر و یا بزرگتر از  $T_0$  باشد ضریب میرایی باید طبق جدول ۱-۲ تعیین شود. اگر دوره تناوب سازه کمتر از  $T_0$  باشد، ضریب میرایی باید به صورت خطی بین مقدار ۱ در ثانیه صفر برای تمامی مقادیر میرایی موثر و مقدار میرایی در دوره تناوب  $T_0$  طبق جدول ۱-۲ درون‌یابی شود. لازم به ذکر است که مقادیر  $\beta$  مفهومی متناظر با ضریب اصلاح طیف پاسخ براساس میزان میرایی خواهند داشت.



جدول (۲-۱) ضرایب میرایی هنگامی که دوره تناوب سازه بیشتر از  $T_0$  باشد

$B_{v+1}, B_{1D}, B_R, B_{1M}, B_{mD}, B_{mM}$ (هنگامی که دوره تناوب سازه بیشتر از $T_0$ باشد)	میرایی موثر، $\beta$ (درصدی از میرایی بحرانی)
۰/۸	$\leq 2$
۱/۰	۵
۱/۲	۱۰
۱/۵	۲۰
۱/۸	۳۰
۲/۱	۴۰
۲/۴	۵۰
۲/۷	۶۰
۳/۰	۷۰
۳/۳	۸۰
۳/۶	۹۰
۴/۰	$\geq 100$

### ۲-۷-۱- میرایی موثر

میرایی موثر در جابجایی طرح،  $\beta_{mD}$ ، و در جابجایی بیشینه،  $\beta_{mM}$ ، در مود  $m$  ام ارتعاش سازه در جهت مورد نظر باید با استفاده از روابط ۱-۴۵ و ۱-۴۶ محاسبه شوند.

$$\beta_{mD} = \beta_1 + \beta_{vm}\sqrt{\mu_D} + \beta_{HD} \quad (۴۵-۱)$$

$$\beta_{mM} = \beta_1 + \beta_{vm}\sqrt{\mu_M} + \beta_{HM} \quad (۴۶-۱)$$

$\beta_{HD}$ : جزء میرایی موثر در سازه در جهت مورد نظر ناشی از رفتار هیستریک پس از جاری‌شدگی (post-

yield) سیستم باربر لرزه‌ای و المان‌های سیستم میرایی در شکل‌پذیری موثر مورد نیاز،  $\mu_D$

$\beta_{HM}$ : جزء میرایی موثر در سازه در جهت مورد نظر ناشی از رفتار هیستریک پس از جاری‌شدگی (post-

yield) سیستم باربر لرزه‌ای و المان‌های سیستم میرایی در شکل‌پذیری موثر مورد نیاز،  $\mu_M$

$\beta_1$ : جزء میرایی موثر در سازه در جهت مورد نظر ناشی از میرایی ذاتی اجزای سازه، در تغییر مکان موثر

تسلیم یا دقیقاً زیر این مقدار در سیستم باربر لرزه‌ای

$\beta_{vm}$ : جزء میرایی موثر در مود  $m$  ام ارتعاش سازه در جهت مورد نظر ناشی از میرایی ویسکوز توسط سیستم

میرایی در تغییر مکان مؤثر تسلیم یا دقیقاً زیر این مقدار در سیستم باربر لرزه‌ای

$\mu_D$ : شکل‌پذیری موثر مورد نیاز در سیستم باربر لرزه‌ای در جهت مورد نظر ناشی از زلزله طرح



$\mu_M$ : شکل پذیری موثر مورد نیاز در سیستم باربر لرزه‌ای در جهت مورد نظر ناشی از بیشترین زلزله مورد نظر (MCE)

در صورتیکه تحلیل یا نتایج تست مقادیر دیگری را تأیید کند، شکل پذیری موثر مورد نیاز در موده‌های بالاتر ارتعاش در جهت مورد نظر باید ۱/۰ در نظر گرفته شود.

#### ۱-۲-۷-۱- میرایی ذاتی

میرایی ذاتی،  $\beta_1$ ، باید مبتنی بر نوع مصالح، چیدمان (آرایش) اجزای سازه‌ای و غیرسازه‌ای، رفتار سازه و اجزای غیرسازه‌ای با توجه به پاسخ دینامیکی سیستم باربر لرزه‌ای در حد تسلیم باشد.

#### ۱-۲-۷-۱-۲- میرایی هیستریزیس

میرایی هیستریزیس سیستم باربر لرزه‌ای مقاوم و المان‌های سیستم میرایی باید بر اساس تست یا تحلیل باشد یا با استفاده از فرمول‌های ۴۷-۱ و ۴۸-۱ محاسبه شود.

$$\beta_{HD} = q_H(0.64 - \beta_1)\left(1 - \frac{1}{\mu_D}\right) \quad (47-1)$$

$$\beta_{HM} = q_H(0.64 - \beta_1)\left(1 - \frac{1}{\mu_M}\right) \quad (48-1)$$

$q_H$ : ضریب اصلاح چرخه هیستریزیس مطابق با بخش ۱-۲-۲-۷-۱

$\mu_D$ : شکل پذیری موثر مورد نیاز در سیستم باربر لرزه‌ای در جهت مورد نظر ناشی از زلزله طرح

$\mu_M$ : شکل پذیری موثر مورد نیاز در سیستم باربر لرزه‌ای مقاوم در جهت مورد نظر ناشی از بیشترین زلزله مورد نظر (MCE)

در صورتیکه تحلیل یا نتایج تست مقادیر دیگری را تأیید کند، میرایی هیستریزیس موده‌های بالاتر ارتعاش در جهت مورد نظر باید صفر در نظر گرفته شود.

#### ۱-۲-۷-۱-۲-۱- ضریب اصلاح چرخه هیستریزیس

در محاسبه میرایی هیستریک سیستم باربر لرزه‌ای و المان‌های سیستم میرایی باید pinching و عوامل دیگری که باعث کاهش مساحت چرخه هیستریزیس در حین سیکل‌های تکراری زلزله نیاز می‌شود، لحاظ



شوند. در صورتیکه تحلیل یا نتایج تست مقادیر دیگری را تأیید کند، کسری از مساحت چرخه هیستریزس سیستم برابر لرزه‌ای باید برای طراحی استفاده شود. بدین منظور ضریب اصلاح  $q_H$  با استفاده از رابطه ۱-۴۹ محاسبه می‌شود.

$$q_H = 0.67 \frac{T_S}{T_1} \quad (۱-۴۹)$$

$T_S$ : دوره تناوب معادل  $S_{D1}/S_{DS}$

$S_{DS}$ : متناظر با شتاب پاسخ طیفی زلزله طرح در دوره تناوب‌های کوتاه است و جزئیات محاسبه آن در تفسیر راهنما ارائه شده است.

$T_1$ : دوره تناوب مد اصلی ارتعاش سازه در جهت مورد نظر

مقدار  $q_H$  نباید بیشتر از ۱ و کمتر از ۰/۵ در نظر گرفته شوند.

#### ۱-۷-۲-۳- میرایی ویسکوز

میرایی ویسکوز مود  $m$  ام ارتعاش سازه،  $\beta_{vm}$  باید با استفاده از معادلات ۱-۵۰ و ۱-۵۱ محاسبه شود.

$$\beta_{vm} = \frac{\sum_j W_{mj}}{4\pi W_m} \quad (۱-۵۰)$$

$$W_m = \frac{1}{2} \sum_j F_{im} \delta_{im} \quad (۱-۵۱)$$

$W_{mj}$ : کار انجام شده توسط وسیله میراگر زام در یک سیکل کامل پاسخ دینامیکی متناظر با مود  $m$  ام

ارتعاش سازه در جهت مورد نظر در جابجایی مودال،  $\delta_{im}$

$W_m$ : انرژی کرنشی حداکثر در مود  $m$  ام ارتعاش سازه در جهت مورد نظر در تغییر مکان مودال  $\delta_{im}$

$F_{im}$ : نیروی اینرسی مد  $m$  ام در تراز  $i$  ام

$\delta_{im}$ : تغییر شکل تراز  $i$  ام در مود  $m$  ام ارتعاش در مرکز سختی سازه در جهت مورد نظر

میرایی مودال ویسکوز میراگر وابسته به جابجایی باید بر اساس دامنه پاسخ، برابر با جابجایی تسلیم موثر

سازه باشد. در محاسبه کار انجام شده توسط میراگرها باید جهت‌گیری و میزان مشارکت هر وسیله با توجه

به مد ارتعاشی مورد نظر لحاظ شود. کار انجام شده توسط میراگر به تنهایی باید با توجه به انعطاف‌پذیری



المان‌ها شامل پین‌ها، پیچ‌ها، ورق‌های اتصال، مهاربندهای کشش و اجزاء دیگر که میراگر را به المان‌های دیگر سازه متصل می‌کنند، کاهش یابد.

### ۱-۷-۳- شکل‌پذیری موثر مورد نیاز

در سیستم باربر لرزه ای، شکل‌پذیری موثر مورد نیاز ناشی از زلزله طرح،  $\mu_D$  و ناشی از بیشترین زلزله مورد نظر (MCE)،  $\mu_M$  باید با استفاده از روابط ۱-۵۲ الی ۱-۵۴ محاسبه شوند.

$$\mu_D = \frac{D_{1D}}{D_Y} \geq 1 \quad (۱-۵۲)$$

$$\mu_M = \frac{D_{1M}}{D_Y} \geq 1 \quad (۱-۵۳)$$

$$D_Y = \left(\frac{g}{4\pi^2}\right) \left(\frac{\Omega_0 C_d}{R}\right) \Gamma_1 C_{S1} T_1^2 \quad (۱-۵۴)$$

$D_{1D}$ : تغییر مکان طراحی مد اصلی در مرکز سختی تراز بام سازه در جهت مورد نظر با توجه به بخش‌های ۱-۳-۵ و ۱-۳-۶

$D_{1M}$ : تغییر مکان حداکثر مود اصلی در مرکز سختی تراز بام سازه در جهت مورد نظر با توجه به بخش‌های ۱-۳-۵ و ۱-۳-۶

$D_Y$ : تغییر مکان در مرکز سختی تراز بام سازه در نقطه تسلیم موثر سیستم باربر لرزه ای

R: ضریب رفتار طبق استاندارد ۲۸۰۰

$C_d$ : ضریب تشدید تغییر شکل طبق استاندارد ۲۸۰۰

$\Omega_0$ : ضریب اضافه مقاومت طبق استاندارد ۲۸۰۰

$\Gamma_1$ : ضریب مشارکت مود اصلی ارتعاش سازه در جهت مورد نظر، مطابق بخش‌های ۱-۳-۵ یا ۱-۳-۶  
(m=1)۳

$C_{S1}$ : ضریب پاسخ لرزه‌ای مود اصلی ارتعاش سازه در جهت مورد نظر، مطابق بخش‌های ۱-۳-۵ یا ۱-۳-۶  
(m=1) ۴-۲-۶

$T_1$ : دوره تناوب مود اصلی ارتعاش سازه در جهت مورد نظر



شکل‌پذیری مورد نیاز طرح،  $\mu_D$ ، نباید از بیشینه مقدار شکل‌پذیری نیاز موثر،  $\mu_{max}$ ، ارائه شده در بخش ۱-۷-۴ بیشتر شود.

#### ۱-۷-۴- بیشینه نیاز شکل‌پذیری موثر

برای تعیین ضریب اصلاح لوپ هیسترتیک، میرایی هیسترتیک و پارامترهای دیگر، باید بیشینه مقدار شکل‌پذیری موثر،  $\mu_{max}$ ، از روابط ۱-۵۵ و ۱-۵۶ محاسبه شود.

$$T_{1D} \leq T_S \quad (۱-۵۵)$$

$$\mu_{max} = 0.5[(R/(\Omega_o I_e))^2 + 1]$$

$$T_1 \geq T_S \quad (۱-۵۶)$$

$$\mu_{max} = R/(\Omega_o I_e)$$

$I_e$ : ضریب اهمیت طبق استاندارد ۲۸۰۰

$T_{1D}$ : دوره تناوب موثر مود اصلی ارتعاش سازه در تغییرمکان طرح در جهت مورد بررسی

برای  $T_1 < T_S < T_{1D}$ ، مقدار  $\mu_{max}$  باید از درون‌یابی خطی بین مقادیر روابط ۱-۵۵ و ۱-۵۶ تعیین شود.

#### ۱-۸- شرایط بارگذاری لرزه‌ای و معیارهای پذیرش

برای روش غیرخطی بخش ۱-۴ سیستم مقاوم در برابر نیرو، سیستم میرایی، شرایط بارگذاری و معیارهای پذیرش برای پارامترهای پاسخ مورد نظر باید مطابق با بخش ۱-۸-۱ باشند. صحت نیروهای طراحی و تغییرمکان‌های تعیین شده در روش طیف پاسخ بخش ۱-۵ یا روش بارجانبی معادل بخش ۱-۶ باید با معیارهای مقاومت طرح این استاندارد و شرایط بارگذاری لرزه‌ای بخش‌های ۱-۸-۱ و ۲-۸-۱ مورد بررسی قرار گیرد.

##### ۱-۸-۱- روش‌های غیرخطی

اگر از روش‌های غیرخطی در تحلیل استفاده می‌شود، سیستم برابر لرزه‌ای، سیستم میرایی، شرایط بارگذاری لرزه‌ای و معیارهای پذیرش باید با ضوابط این بخش تطابق داشته باشند.





#### ۱-۱-۸-۱- سیستم باربر لرزه ای

در سیستم باربر لرزه‌ای باید ضوابط مقاومتی ارائه شده در استاندارد ۲۸۰۰ تحت برش پایه لرزه‌ای،  $V_{min}$ ، ارائه شده در بخش ۱-۲-۳-۱ در نظر گرفته شود. دریافت طبقه باید برای زلزله طرح تعیین شود.

#### ۲-۱-۸-۱- سیستم‌های میرایی

مشخصات و ابعاد میراگر و اتصالات آن باید با توجه به نیروها، تغییرمکان‌ها و سرعت‌های بیشترین زلزله مورد نظر (MCE) تعیین شوند.

#### ۳-۱-۸-۱- ترکیب اثرات بارگذاری

اثر بارهای ثقلی و لرزه‌ای روی سیستم میرایی، باید با توجه به بخش ۱-۲-۸-۳ با استفاده از اثر افقی نیروی زلزله،  $Q_E$ ، که طبق تحلیل‌ها تعیین شده است، ترکیب شوند. ضریب افزایش،  $p$ ، در همه موارد باید برابر ۱/۰ در نظر گرفته شود و نیازی به استفاده از بارگذاری لرزه ای تشدید یافته برای طراحی سیستم میرایی نمی باشد.

#### ۴-۱-۸-۱- معیارهای پذیرش برای پارامترهای پاسخ مورد نظر

مولفه‌های سیستم میرایی باید با استفاده از معیارهای پذیرش مقاومت این استاندارد و نیروهای لرزه‌ای و شرایط بارگذاری لرزه‌ای مشخص شده در روش غیرخطی و با در نظر گرفتن  $\Phi=1.0$ ، بررسی شوند. در صورت استفاده از نیروهای بدست آمده از روش غیرخطی نیازی به ارزیابی اعضای سیستم باربر لرزه ای نمی باشد.

#### ۲-۸-۱- روش‌های طیف پاسخ و نیروی جانبی معادل

در صورت استفاده از روش طیف پاسخ یا بار جانبی معادل در تحلیل، سیستم باربر لرزه ای، سیستم میرایی، شرایط بارگذاری لرزه‌ای و معیارهای پذیرش باید مطابق با ضوابط این بند باشند.



### ۱-۲-۸-۱ سیستم باربر لرزه‌ای

ضوابط ارائه شده در استاندارد ۲۸۰۰ در ارتباط با برش پایه و همچنین نیروهای معرفی شده در بخش ۱-۵-۲ و ۱-۶-۲ باید در مورد سیستم باربر لرزه‌ای صادق باشند.

نسبت دررفت طرح طبقه،  $\Delta_{RD}$ ، به دررفت مجاز طبقه تعیین شده در استاندارد ۲۸۰۰ با لحاظ کردن اثر پیچش نباید از مقدار  $R/C_d$  بیشتر شود.

### ۱-۲-۸-۲ سیستم میرایی

سیستم میرایی باید ضوابط استاندارد ۲۸۰۰ برای نیروهای لرزه‌ای طرح و شرایط بارگذاری لرزه‌ای مشخص شده در این بخش را تامین نماید.

### ۱-۲-۸-۳ ترکیب اثرات بارگذاری

اثر بارهای ثقیل لرزه‌ای روی سیستم میرایی و اجزا آن باید با استفاده از اثر افقی نیروی زلزله،  $Q_E$  (که در بخش ۱-۲-۸-۵ مشخص شده)، مطابق با بخش ۱-۳-۲-۸-۱ ترکیب شوند. فاکتور افزایش،  $\rho$ ، در همه موارد باید برابر ۱/۰ در نظر گرفته شود و نیازی به استفاده از بارگذاری لرزه‌ای تشدید یافته برای طراحی سیستم میرایی نمی‌باشد.

### ۱-۳-۲-۸-۱ مقدار نیروی افقی زلزله ( $E_h$ )

مقدار نیروی افقی زلزله،  $E_h$ ، از رابطه ۱-۵۷ بدست می‌آید.

$$E_h = \rho Q_E \quad (۵۷-۱)$$

### ۱-۳-۲-۸-۲ نیروی قائم زلزله

نیروی قائم زلزله از رابطه ۱-۵۸ بدست می‌آید.

$$E_v = 0.2S_{DS}D \quad (۵۸-۱)$$

$S_{DS}$ : شتاب پاسخ طیف طرح طبق استاندارد ۲۸۰۰



D: بار مرده

### ۱-۸-۲-۳ ترکیب بارهای لرزه ای

ترکیب بارها برای طراحی مقاومت در ادامه ارائه شده است.

$$1.2 D + \rho Q_E + L + 0.2S$$

$$0.9 D + \rho Q_E + 1.6H$$

و ترکیب بارها برای طراحی تنش مجاز به صورت زیر می باشد.

$$D + H + 0.75\rho Q_E$$

$$D + H + 0.525\rho Q_E + 0.75L + 0.75(L_T یا S)$$

$$0.6D + 0.7\rho Q_E + H$$

که در این روابط،  $D$  بیانگر بار مرده،  $L$  بار زنده،  $L_T$  بار زنده سقف،  $Q_E$  بار زلزله،  $S$  بار برف و  $H$  بار ناشی از فشار جانبی زمین یا فشار آب زیرزمینی است.

### ۱-۸-۲-۴ نیروهای مودال طراحی سیستم میرایی

نیروهای مودال طراحی سیستم میرایی باید بر اساس نوع میراگر و تغییرمکان های مودال طراحی طبقه و سرعت های تعیین شده در هر یک از بخش های ۱-۵-۳ یا ۱-۶-۳ محاسبه شوند.

۱- در صورتیکه جهت تایید بیشینه پاسخ ها نیاز به تحلیل تاریخچه زمانی باشد، باید در صورت لزوم تغییرمکان مودال طراحی طبقه و سرعتها برای پوشش کل تغییرمکان های طراحی طبقه و سرعت های مشخص شده با توجه به بخش ۱-۴ افزایش یابد. میراگرهای وابسته به تغییر مکان: نیروی طراحی لرزه ای در میراگرهای وابسته به تغییر مکان، باید بر اساس بیشینه نیروی میراگر در تغییرمکان های ایجاد شده تا تغییرمکان نظیر دریافت طراحی طبقه،  $\Delta_D$ ، باشد.

۲- میراگرهای وابسته به سرعت: نیروی طراحی لرزه ای در هر مد ارتعاش در میراگرهای وابسته به سرعت باید بر اساس بیشینه نیروی میراگر در سرعت های ایجاد شده تا سرعت نظیر طراحی طبقه در مود مورد نظر باشد.



در تغییرمکان‌ها و سرعت‌های مورد استفاده در تعیین نیروهای طراحی سیستم‌های میرایی در هر طبقه باید زاویه قرارگیری میراگر نسبت به افق و اثر افزایش پاسخ ناشی از حرکات پیچشی لحاظ شود.

#### ۱-۸-۲-۵ شرایط بار لرزه‌ای و ترکیب پاسخ‌های مودال

نیروی طراحی لرزه‌ای،  $Q_E$ ، در هر المان سیستم میرایی برابر با بیشینه مقدار بدست آمده از سه حالت بارگذاری زیر می باشد:

۱- سطح بیشینه تغییرمکان: نیروی طراحی لرزه‌ای در مرحله بیشینه جابجایی باید از رابطه ۱-۵۹ محاسبه شود.

$$Q_E = \Omega_0 \sqrt{\sum m (Q_{mSFRS})^2} \pm Q_{DSD} \quad (۱-۵۹)$$

$Q_{mSFRS}$ : نیرو در المانی از سیستم میرایی برابر با نیروی طراحی لرزه‌ای مود  $m$  ام ارتعاش سازه در جهت مورد نظر

$Q_{DSD}$ : نیروی المانی از سیستم میرایی که برای مقاومت در برابر نیروی‌های طراحی لرزه‌ای میراگر وابسته به تغییرمکان ضروری می باشد.

نیروی‌های لرزه‌ای در اعضای سیستم میرایی،  $Q_{DSD}$ ، باید با اعمال نیروهای طراحی میراگر وابسته به تغییرمکان در سیستم میرایی به صورت نیروهای شبه استاتیکی، محاسبه شوند. نیروهای طراحی میراگر وابسته به تغییرمکان باید در هر دو جهت مثبت و منفی تا بیشینه تغییرمکان سازه اعمال شوند.

۲- سطح بیشینه سرعت: نیروهای طراحی لرزه‌ای در مرحله بیشینه سرعت باید از رابطه ۱-۶۰ محاسبه شود.

$$Q_E = \sqrt{\sum m (Q_{mSDV})^2} \quad (۱-۶۰)$$

$Q_{mSDV}$ : نیرو در المان سیستم میرایی که برای مقاومت در برابر نیروهای طراحی لرزه‌ای وسیله میرایی وابسته به سرعت ناشی از مود  $m$  ام ارتعاش سازه در جهت مورد نظر مورد نیاز می باشد.

نیروهای طراحی لرزه‌ای مودال در المان‌های سیستم میرایی،  $Q_{mSDV}$ ، باید با اعمال نیروهای طراحی مودال میراگر وابسته به سرعت در سیستم میرایی تغییرشکل نیافته به صورت نیروهای شبه‌استاتیکی، محاسبه شوند.



راستای اعمال نیروهای طراحی مودال باید همراستا با شکل مودی مود مورد نظر باشد. نیروهای تکیه گاه های افقی باید در هر تراز،  $\alpha$  سیستم تغییرشکل نیافته سیستم میرایی، همزمان با نیروهای طراحی وسیله میراگر وابسته به سرعت به گونه ای که تغییر مکان افقی در هر تراز برابر صفر شود، اعمال شوند. در هر تراز،  $\alpha$  نیروهای تکیه گاهی باید متناسب بوده و در محل هر مرکز جرم قرار گیرد.

۳- سطح بیشینه شتاب: نیروهای طراحی لرزه ای در مرحله بیشینه شتاب باید از رابطه ۱-۶۱ محاسبه شود.

$$Q_E = \sqrt{\sum_m (C_{mFD} \Omega_o Q_{mSFRS} + C_{mFV} Q_{mDSV})^2} \pm Q_{DSD} \quad (1-61)$$

ضرایب نیرو،  $C_{mFD}$  و  $C_{mFV}$  باید به ترتیب از جدول ۱-۳ و ۱-۴ با استفاده از مقادیر میرایی موثر بدست آمده با الزامات زیر تعیین شوند:

برای پاسخ مود اصلی ( $m=1$ ) در جهت مورد نظر، ضرایب  $C_{1FD}$  و  $C_{1FV}$  باید بر اساس توان سرعت،  $\alpha$ ، که نیروی میراگر را به سرعت میراگر وابسته می کند، تعیین گردند. مقدار توان سرعت،  $\alpha$ ، براساس مطالب مندرج در تفسیر این دستورالعمل محاسبه می شود.

جدول (۱-۳) ضرایب نیرو  $C_{mFD}^{2-1}$

$C_{mFD}=1/0$ (۳)	$\mu \leq 1/0$				میرایی موثر
	$\alpha \geq 1/0$	$\alpha = 0/75$	$\alpha = 0/5$	$\alpha \leq 0/25$	
$\mu \geq 1/0$	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	$\leq 0/05$
$\mu \geq 1/0$	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۰/۱
$\mu \geq 1/1$	۰/۹۳	۰/۹۴	۰/۹۵	۱/۰۰	۰/۲
$\mu \geq 1/2$	۰/۸۶	۰/۸۸	۰/۹۲	۱/۰۰	۰/۳
$\mu \geq 1/3$	۰/۷۸	۰/۸۱	۰/۸۸	۱/۰۰	۰/۴
$\mu \geq 1/4$	۰/۷۱	۰/۷۳	۰/۸۴	۱/۰۰	۰/۵
$\mu \geq 1/6$	۰/۶۴	۰/۶۴	۰/۷۹	۱/۰۰	۰/۶
$\mu \geq 1/7$	۰/۵۸	۰/۵۵	۰/۷۵	۱/۰۰	۰/۷
$\mu \geq 1/9$	۰/۵۳	۰/۵۰	۰/۷۰	۱/۰۰	۰/۸
$\mu \geq 2/1$	۰/۵۰	۰/۵۰	۰/۶۶	۱/۰۰	۰/۹
$\mu \geq 2/2$	۰/۵۰	۰/۵۰	۰/۶۲	۱/۰۰	$\geq 1/0$

<sup>۱</sup> مقدار  $C_{mFD}$  برای سیستم های ویسکوالاستیک برابر ۱/۰ در نظر گرفته می شود.

<sup>۲</sup> در مورد سایر ضرایب توان سرعت،  $\alpha$ ، و نیاز شکل پذیری،  $\mu$ ، می توان از درون یابی استفاده نمود.

<sup>۳</sup> برای نیاز شکل پذیری،  $\mu$ ، بزرگتر از مقادیر ارائه شده در جدول  $C_{mFD}$  برابر ۱/۰ در نظر گرفته شود.



میرایی موثر مود اصلی باید برابر میرایی موثر کل مود اصلی منهای میرایی بخش هیستریزیس ( $\beta_{ID} - \beta_{HD}$ ) یا ( $\beta_{IM} - \beta_{HM}$ ) در سطح پاسخ مورد نظر  $\mu = \mu_D$  (یا  $\mu = \mu_M$ ) در نظر گرفته شود. برای پاسخ مودهای بالاتر ( $m > 1$ ) یا مودهای باقی‌مانده در جهت مورد نظر، ضرایب  $C_{mFD}$  و  $C_{mFV}$  باید بر اساس مقدار  $\alpha$  برابر ۱ بدست آیند. میرایی مودال موثر باید برابر میرایی موثر کل مود مورد نظر ( $\beta_{mD}$  یا  $\beta_{mM}$ ) در نظر گرفته شود. برای تعیین ضریب  $C_{mFD}$ ، نیازشکل‌پذیری باید برابر نیاز شکل‌پذیری مود اصلی ( $\mu = \mu_D$ ) یا  $\mu = \mu_M$  فرض شود.

جدول (۱-۱) ضرایب نیرو  $C_{mFV}^{-1}$

$\alpha \geq 1/0$	$\alpha = 0/75$	$\alpha = 0/5$	$\alpha \leq 0/25$	میرایی موثر
0/10	0/20	0/35	1/00	$\leq 0/05$
0/20	0/31	0/44	1/00	0/1
0/37	0/46	0/56	1/00	0/2
0/51	0/58	0/64	1/00	0/3
0/62	0/69	0/70	1/00	0/4
0/71	0/77	0/75	1/00	0/5
0/77	0/84	0/80	1/00	0/6
0/81	0/90	0/83	1/00	0/7
0/90	0/94	0/90	1/00	0/8
1/00	1/00	1/00	1/00	0/9
1/00	1/00	1/00	1/00	$\geq 1/0$

<sup>۱</sup> مقدار  $C_{mFV}$  برای سیستم‌های ویسکوالاستیک برابر ۱/۰ در نظر گرفته می‌شود، مگر نتایج تحلیل یا آزمایش مقادیر دیگری نشان دهند

<sup>۲</sup> در مورد سایر ضرایب توان سرعت،  $\alpha$ ، می‌توان از درون یابی استفاده نمود.

### ۱-۲-۸-۶ حدود پاسخ غیرخطی

پاسخ المان‌های سیستم میرایی می‌توانند از حدود مقاومت بارهای طراحی بیشتر شوند در صورتی که تحلیل یا آزمایش نشان دهد که:

- ۱- پاسخ غیرالاستیک تاثیر نامطلوب بر کارکرد سیستم میرایی ندارد
- ۲- نیروهای المان محاسبه شده در بخش ۱-۲-۸-۵ با در نظر گرفتن  $\Omega_0$  برابر با ۱/۰ نباید از مقاومت مورد نیاز بر اساس ترکیب بارهای بخش ۱-۲-۸-۳ بیشتر شود.



## ۱-۹ بررسی طراحی

بررسی طراحی سیستم میرایی و برنامه‌های آزمایش باید توسط یک تیم طراحی حرفه‌ای مستقل در زمینه روش تحلیل لرزه‌ای و کارکرد سیستم اتلاف انرژی انجام شود.

در بررسی طراحی باید موارد زیر در نظر گرفته شوند، هرچند لزوماً نباید فقط به موارد زیر محدود شود:

۱. بررسی معیارهای لرزه‌ای ویژه ساختگاه، شامل تهیه طیف ویژه ساختگاه و تاریخچه حرکات زمین و تمامی معیارهای دیگر طراحی مربوط به پروژه.

۲. بررسی اولیه طراحی لرزه‌ای سیستم میرایی و سیستم باربر لرزه‌ای، شامل پارامترهای طراحی وسیله میراگر.

۳. بررسی طراحی نهایی سیستم باربر لرزه‌ای و سیستم میرایی و تمامی تحلیل‌های تکمیلی

۴. بررسی ضوابط آزمایش وسیله میراگر، کنترل و تضمین کیفیت ساخت وسیله و برنامه نگهداری و ضوابط بازرسی آن.

## ۱-۱۰ آزمایش سیستم میرایی

مشخصات نیرو-سرعت یا نیرو-تغییر مکان، و مشخصات میرایی استفاده شده در طراحی باید بر اساس نتایج حاصل از آزمایش نمونه شاهد مطابق با ضوابط این بخش تعیین گردد.

روش ساخت و کنترل کیفیت استفاده شده برای نمونه‌های شاهد میراگر و میراگرهای تولیدی باید یکسان باشد.

### ۱-۱۰-۱ آزمایش‌های نمونه شاهد

آزمایش‌های زیر باید برای هر اندازه و نوع میراگر استفاده شده در طراحی به صورت مجزا و تمام مقیاس روی دو وسیله با ترتیب زیر انجام شود.

اندازه نمونه شاهد از هر نوع میراگر برای استفاده به عنوان نمونه تحت آزمایش می‌تواند تمام مقیاس نباشد، به شرطی که شرایط زیر فراهم گردد:



- ۱- روش‌های ساخت و کنترل کیفیت هر نوع و اندازه میراگر استفاده شده در سازه یکسان باشد.
  - ۲- آزمایش اندازه‌های معادل برای نمونه شاهد، توسط مسئول حرفه‌ای طراحی سازه قابل قبول باشد.
- از نمونه‌های آزمایش نباید در ساخت و ساز استفاده شود مگر آنکه توسط مسئول حرفه‌ای طراحی سازه تأیید شده باشند و ضوابط آزمایش نمونه‌های شاهد و تولید تامین گردند.

#### ۱-۱۰-۱-۱-۱ ثبت اطلاعات

رابطه نیرو-تغییر مکان برای هر سیکل در هر آزمایش باید ثبت شود.

#### ۱-۱۰-۱-۲-۱ ترتیب و تعداد سیکل‌های آزمایش

برای ترتیب آزمایش‌های زیر، هر میراگر باید تحت اثرات بار ثقلی و شرایط محیطی (به لحاظ حرارتی) مشابه با شرایط نصب قرار گیرد. برای آزمایش‌های لرزه‌ای، جابجایی محاسبه شده در وسایل برای بیشترین زلزله مورد نظر (MCE)، که در اینجا به عنوان حداکثر جابجایی میراگر نامیده می‌شود، باید استفاده شود.

- ۱- هر میراگر باید تحت اثر تعداد سیکل‌های مورد انتظار در بار طراحی باد قرار گیرد. در هر صورت تعداد سیکل‌ها نباید کمتر از ۲۰۰۰ سیکل کامل بار باد به صورت ممتد باشد. دامنه این بار (باد) باید مطابق با دامنه مورد انتظار طراحی باد بوده و با فرکانسی برابر با معکوس دوره تناوب اصلی سازه اعمال شود. ( $f_1=1/T_1$ ).

تبصره: اگر در وسایل میراگر در اثر باد، نیرو یا جابجایی ایجاد نگردد، یا نیروی باد طراحی کمتر از نیروی تسلیم یا نیروی لغزش باشد، نیازی به انجام این آزمایش‌ها نیست.

- ۲- هر میراگر باید در پنج سیکل سینوسی کامل با دامنه‌ای برابر با بیشینه جابجایی وسیله و با فرکانسی برابر با  $1/T_{IM}$  مطابق با بخش ۱-۵-۲-۵، آزمایش گردد. در صورت تغییر مشخصات میرایی وسیله با دمای عملیاتی، کمینه سه دمای (کمترین دما، دمای محیط، بیشترین دما) در محدوده دمای عملیاتی میراگر برای این آزمایش‌ها انتخاب می‌گردد.

تبصره: میراگر را می‌توان با روش‌های جایگزین، آزمایش کرد، در صورتیکه شرایط زیر برقرار باشند:





الف- روش‌های جایگزین، معادل ضوابط آزمایش‌های چرخه‌ای این بخش باشد.  
 ب- در روش‌های جایگزین وابستگی پاسخ میراگر به دمای محیط، فرکانس بارگذاری و افزایش دما در حین آزمایش را در نظر گرفته شوند.

۳- اگر تغییرات مشخصات نیرو-تغییرشکل میراگر در تغییر مکانی معادل با بیشترین تغییر مکان میراگر یا کمتر از این مقدار، در محدوده فرکانس آزمایش از  $1/T_{IM}$  تا  $2/5/T_1$  بیش از ۱۵٪ باشد، آزمایش‌های تکمیلی در فرکانس‌های معادل  $1/T_{IM}$  و  $2/5/T_1$  باید اعمال شود.

اگر از نمونه شاهد مقیاس شده برای ارزش‌گذاری و تعیین مشخصات وابسته به نرخ بارگذاری میراگر استفاده می‌شود، نمونه شاهد مقیاس شده باید از نظر نوع، مصالح، روش ساخت و روش کنترل کیفیت مشابه نمونه با اندازه واقعی بوده و در فرکانسی که نرخ بارگذاری نمونه با اندازه واقعی را شبیه‌سازی می‌کند، آزمایش شود.

#### ۳-۱-۱۰-۱ آزمایش میراگرهای مشابه

در میراگر، در صورتی که هر دو شرط زیر برقرار باشد، نیازی به آزمایش نمونه شاهد نمی‌باشد:  
 ۱- تمامی آزمایش‌های مربوطه و سایر اطلاعات میراگر در دسترس مسئول حرفه‌ای طراحی سازه بوده و توسط او تأیید گردند.

۲- مسئول حرفه‌ای طراحی سازه، مشابهت میراگر را با میراگرهای تست شده قبلی تأیید کند.

#### ۴-۱-۱۰-۱ تعیین مشخصات تغییر مکان-سرعت-نیرو

مشخصات تغییر مکان-سرعت-نیرو میراگر باید بر اساس آزمایش‌های بارگذاری چرخه‌ای و تغییر مکان میراگر شاهد که پیش از این مشخص شد، تعیین گردد.

سختی موثر میراگر برای هر سیکل تغییر شکل باید از رابطه ۶۲-۱ محاسبه شود.

$$k_{\text{eff}} = \frac{|F^+| + |F^-|}{|\Delta^+| + |\Delta^-|} \quad (62-1)$$



#### ۱-۱۰-۱-۵-۵ کفایت میراگر

عملکرد نمونه شاهد میراگر در صورت احراز کلیه شرایط این بخش مورد تأیید می‌باشد.

#### ۱-۱۰-۱-۵-۱ میراگر وابسته به تغییرمکان

عملکرد نمونه‌های شاهد میراگر وابسته به تغییرمکان در صورت احراز شرایط زیر، مطابق با آزمایش‌های مشخص شده در بخش ۱-۱۰-۱-۲، مناسب می‌باشد:

- ۱- برای آزمایش ۱، هیچ اثری از خرابی شامل نشت، تسلیم یا شکست وجود نداشته باشد.
- ۲- برای آزمایش‌های ۲ و ۳، بیشترین نیرو و کمترین نیرو در تغییرمکان صفر میراگر برای هیچ یک از چرخه‌ها، بیشتر از ۱۵٪ با میانگین بیشترین و کمترین نیروها در تغییرمکان صفر که از محاسبه تمامی سیکل‌ها در فرکانس و دمای مشخص در آن آزمایش بدست می‌آید، اختلاف نداشته باشد.
- ۳- برای آزمایش‌های ۲ و ۳، بیشترین نیرو و کمترین نیرو در تغییرمکان ماکزیمم میراگر برای هیچ یک از چرخه‌ها، بیشتر از ۱۵٪ با میانگین بیشترین و کمترین نیروها در تغییرمکان ماکزیمم که از محاسبه تمامی سیکل‌ها در فرکانس و دمای مشخص در آن آزمایش بدست می‌آید، اختلاف نداشته باشد.
- ۴- برای آزمایش‌های ۲ و ۳، مساحت چرخه هیستریزیس ( $E_{loop}$ ) وسیله میرایی برای هیچ یک از چرخه‌ها، بیشتر از ۱۵٪ با میانگین مساحت چرخه هیستریزیس که از محاسبه تمامی سیکل‌ها در فرکانس و دمای مشخص در آن آزمایش بدست می‌آید، اختلاف نداشته باشد.
- ۵- میانگین بیشترین و کمترین نیروها در تغییرمکان صفر و تغییرمکان بیشینه، و میانگین مساحت چرخه هیستریزیس که برای هر تست با ترتیب تست ۲ و تست ۳ محاسبه شده، نباید بیشتر از ۱۵٪ با مقدار هدف مشخص شده توسط مسئول حرفه‌ای طراحی سازه اختلاف داشته باشد.

#### ۱-۱۰-۱-۵-۲ میراگر وابسته به سرعت

عملکرد نمونه‌های اولیه میراگر وابسته به سرعت در صورت احراز شرایط زیر مطابق با آزمایش‌های مشخص شده در بخش ۱-۱۰-۱-۱، مناسب می‌باشد:

- ۱- برای آزمایش ۱، هیچ اثری خرابی شامل نشت، تسلیم یا شکست وجود نداشته باشد.



۲- برای میراگر وابسته به سرعت با سختی، سختی موثر میراگر در هر یک از سیکل‌های آزمایش ۲ و ۳ نباید بیشتر از ۱۵٪ با میانگین سختی موثر محاسبه شده با استفاده از تمامی سیکل‌ها در فرکانس و دما معین آن آزمایش، اختلاف داشته باشد.

۳- برای آزمایش های ۲ و ۳، بیشترین نیرو و کمترین نیرو در تغییر مکان صفر میراگر برای هیچ یک از چرخه‌ها، نباید بیشتر از ۱۵٪ با میانگین بیشترین و کمترین نیروها در جابجایی صفر که از تمامی سیکل‌ها در آن تست در فرکانس و دمای معین محاسبه شده، اختلاف داشته باشد.

۴- برای آزمایش های ۲ و ۳، مساحت چرخه هیستریزس وسیله میراگر برای هیچ یک از چرخه‌ها، نباید بیشتر از ۱۵٪ با میانگین مساحت چرخه هیستریزس که از تمامی سیکل‌ها در آن تست در فرکانس و دمای معین محاسبه شده، اختلاف داشته باشد.

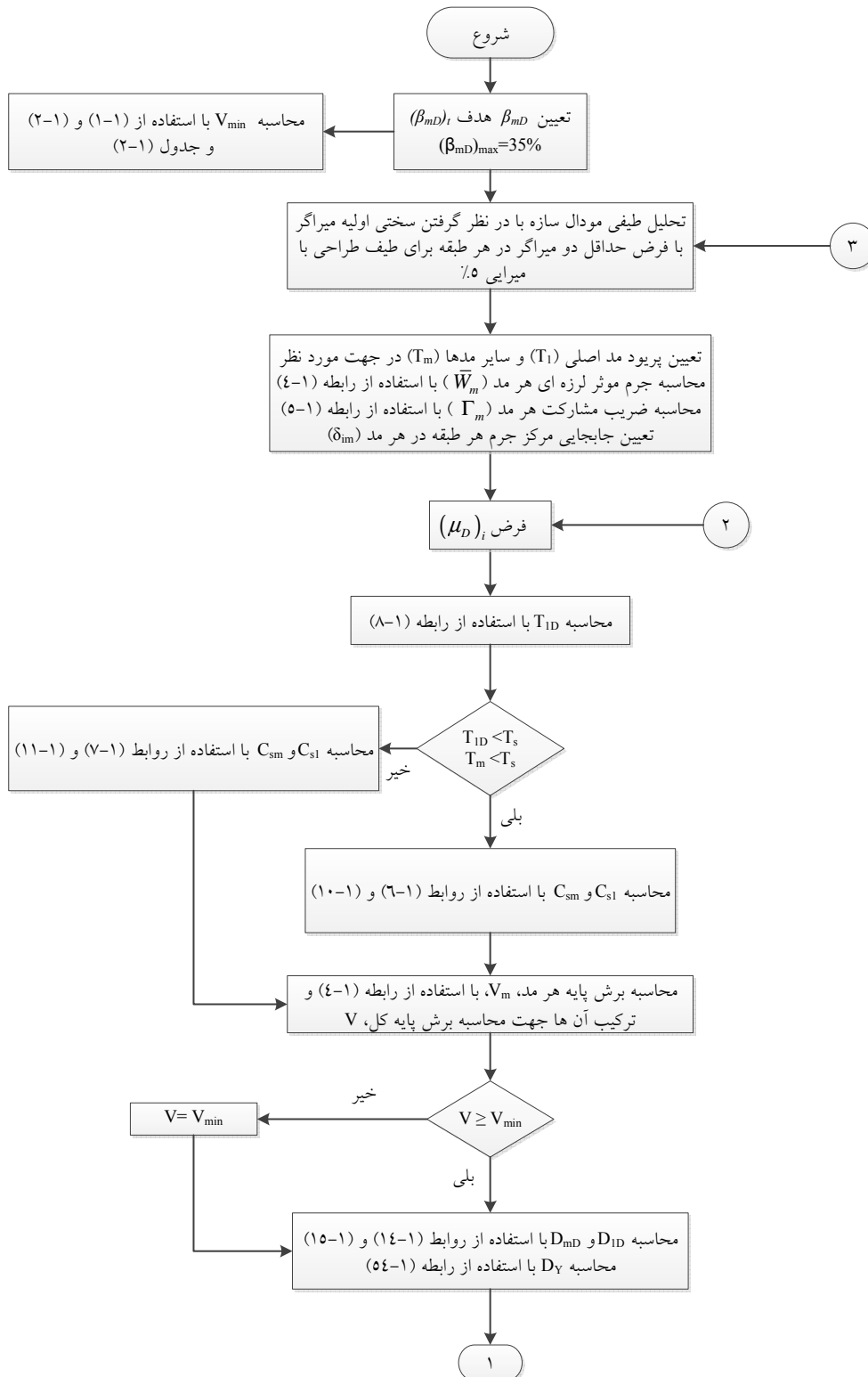
۵- میانگین بیشترین و کمترین نیروها در تغییر مکان صفر، سختی موثر (برای وسیله میرایی فقط با سختی) و میانگین مساحت چرخه هیستریزس که برای هر آزمایش در آزمایش های ۲ و ۳ محاسبه شده، نباید بیشتر از ۱۵٪ با مقدار هدف مشخص شده توسط مسئول حرفه‌ای طراحی سازه تغییر کند.

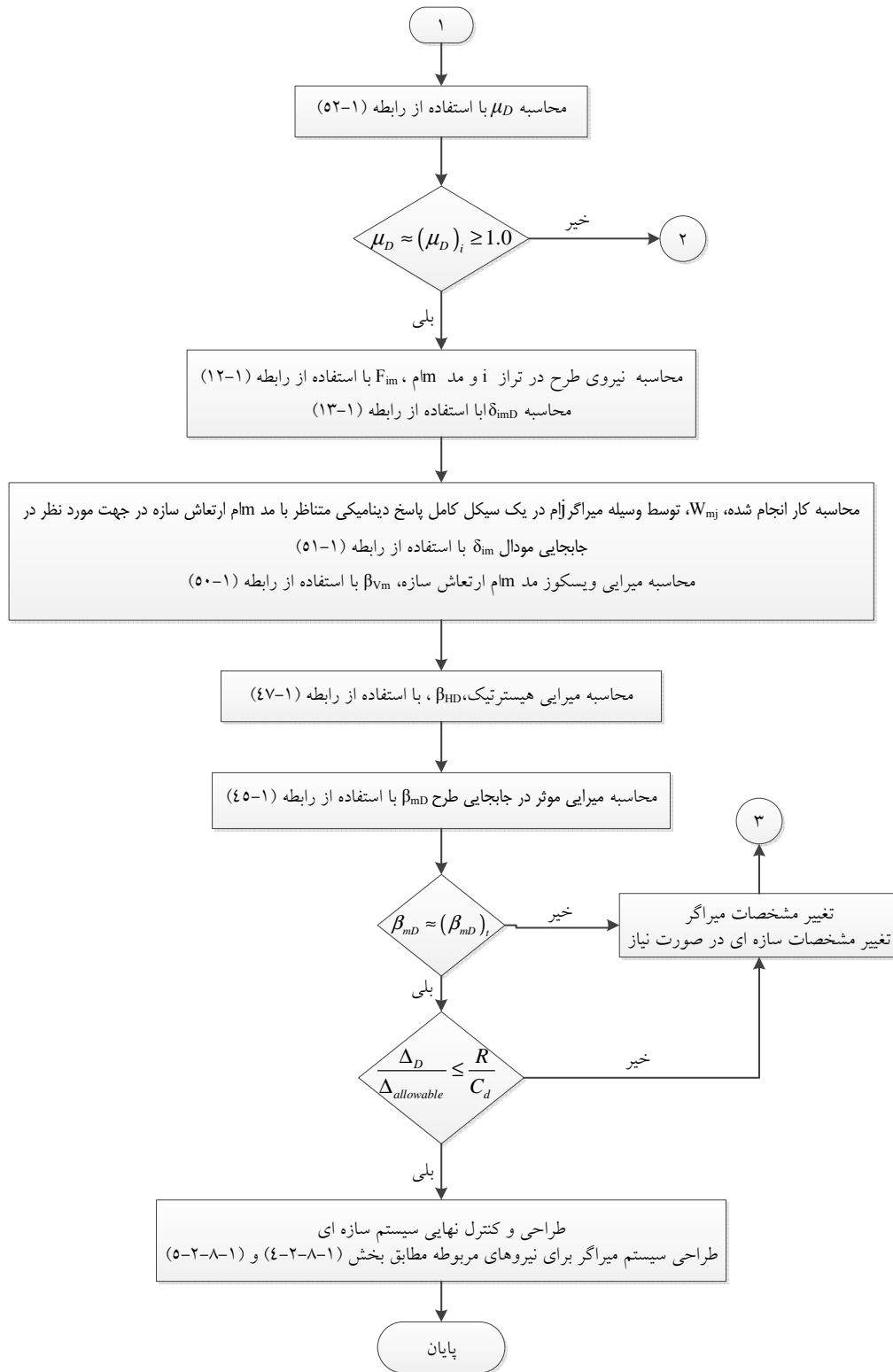
### ۱-۱-۲ آزمایش میراگر

قبل از نصب در ساختمان، میراگر باید آزمایش شود تا مشخصات نیرو-سرعت-تغییر مکان درون حدود تعیین شده توسط مسئول حرفه‌ای طراحی سازه باشد. تعداد و نحوه برنامه آزمایش-تولید باید توسط مسئول حرفه‌ای طراحی سازه تعیین شود.

### ۱-۱۱ فلوچارت طراحی ساختمان‌ها با استفاده از میراگر

به منظور تفهیم هرچه بهتر مطالب ارائه شده در این فصل، روند بهره‌گیری از میراگرها در طراحی ساختمان‌ها، در قالب فلوچارت زیر بیان شده است.







## فصل دوم

### الزامات بهسازی لرزه‌ای سازه‌ها با استفاده از سیستم‌های استهلاک انرژی

#### ۱-۲ کلیات

##### ۱-۱-۲ هدف

هدف از این فصل، ارائه مبانی محاسباتی مربوط به بهسازی لرزه‌ای ساختمان‌های موجود، با استفاده از ابزارهای اتلاف انرژی و به طور خاص میراگرهاست. این میراگرها باید براساس ضوابط این فصل و با در نظر گرفتن اصلاحات ذکر شده در بخش‌های بعدی، برای مقاوم‌سازی ساختمان‌های موجود به کار گرفته شوند.

##### ۲-۱-۲ محدوده کاربرد

ساختمان‌های هدف که در آنها بهره‌گیری از میراگرها به عنوان عناصر مقاوم‌سازی تعریف می‌شود باید شرایط زیر را داشته باشند:

الف) اهداف بهسازی در رده اهداف عملکردی مورد اشاره در بخش ۲-۳ قرار گیرد.

ب) ساختمان‌های مورد توجه برای مقاوم‌سازی دارای سیستم باربری ثقلی با مسیر بار کامل باشد.

ج) کل سیستم پس از افزودن عناصر مقاوم‌سازی یا میراگرها، باید براساس استاندارد ۳۶۰ ایران، مورد ارزیابی قرار گرفته و در صورت نیاز، سیستم باربر جانبی به آن اضافه شده و یا، المان‌های سازه‌ای آن تقویت شوند.



## ۲-۲ سطوح خطر لرزه‌ای مورد استفاده در این دستورالعمل

سطوح خطر لرزه‌ای مورد استفاده در این دستورالعمل به شرح زیر است:

**سطح خطر-۱:** این سطح خطر براساس ۱۰٪ احتمال فراگذشت در ۵۰ سال عمر مفید ساختمان که معادل دوره بازگشت ۴۷۵ سال است، تعیین می‌شود. سطح خطر-۱ «زلزله طرح» (Design Basis Earthquake, DBE) نامیده می‌شود.

**سطح خطر-۲:** این سطح خطر براساس ۲٪ احتمال فراگذشت در ۵۰ سال عمر مفید سازه که معادل دوره بازگشت ۲۴۷۵ سال است، تعیین می‌شود. سطح خطر-۲ به عنوان «بیشینه زلزله در نظر گرفته شده» (Maximum Considered Earthquake, MCE) نامیده می‌شود.

**سطح خطر خدمت‌رسانی:** این سطح خطر براساس ۵۰٪ احتمال فراگذشت در ۵۰ سال عمر مفید سازه که معادل دوره بازگشت ۷۲ سال است، تعیین می‌شود.

در صورت عدم انجام مطالعات تحلیل خطر لرزه‌ای برای سایت مورد نظر می‌توان از طیف طرح ارتجاعی استاندارد ۲۸۰۰ ایران (A.B) استفاده نمود. طیف طرح ارتجاعی استاندارد ۲۸۰۰ ایران برای زلزله «سطح خطر-۱» قابل استفاده می‌باشد. برای زلزله «سطح خطر-۲» نیز در صورت عدم انجام تحلیل خطر لرزه‌ای مستقل، می‌توان از طیف حاصل از ۱/۵ برابر طیف طرح ارتجاعی استاندارد ۲۸۰۰ استفاده نمود. برای طیف طرح مورد استفاده برای زلزله خدمت‌رسانی با دوره بازگشت ۷۲ سال، می‌توان از ۰/۴ طیف طرح ارتجاعی استاندارد ۲۸۰۰ استفاده نمود. برای طیف طرح زلزله قائم در صورت نیاز می‌توان از  $\frac{2}{3}$  طیف طرح افقی انتخابی استفاده نمود.

## ۳-۲ سطوح عملکرد

سطح عملکرد ساختمان بر مبنای عملکرد اجزای سازه‌ای و غیرسازه‌ای مطابق بندهای (۱-۳-۲) تا (۳-۳-۲) تعریف می‌شود. سطوح عملکرد در ساختمان‌ها برای تعیین هدف بهسازی مورد استفاده قرار می‌گیرد.





## ۲-۳-۱ سطوح عملکرد اجزای سازه‌ای

سطوح عملکرد اجزای سازه‌ای شامل چهار سطح عملکرد اصلی و دو سطح عملکرد میانی به شرح زیر است.

سطوح عملکرد اصلی عبارتند از:

الف) سطح عملکرد ۱: قابلیت استفاده بی‌وقفه

ب) سطح عملکرد ۳: ایمنی جانی

ج) سطح عملکرد ۵: آستانه فروریزش

د) سطح عملکرد ۶: لحاظ نشده

و سطوح عملکرد میانی عبارتند از:

هـ) سطح عملکرد ۲: خرابی محدود

ز) سطح عملکرد ۴: ایمنی جانی محدود.

**سطح عملکرد ۱ - قابلیت استفاده بی‌وقفه:** در این سطح عملکرد پیش‌بینی می‌شود که در اثر وقوع زلزله

محتمل، مقاومت و سختی اجزای سازه، تغییر قابل توجهی پیدا نکرده و استفاده بی‌وقفه از آن ممکن باشد.

**سطح عملکرد ۲ - خرابی محدود:** در این سطح عملکرد پیش‌بینی می‌شود در اثر وقوع زلزله محتمل، خرابی در

سازه به میزان محدود ایجاد شود، به گونه‌ای که پس از زلزله با انجام تعمیر بخش‌های آسیب‌دیده، ادامه بهره‌برداری از ساختمان به سادگی میسر باشد.

**سطح عملکرد ۳ - ایمنی جانی:** در این سطح عملکرد پیش‌بینی می‌شود در اثر وقوع زلزله محتمل، خرابی در

سازه ایجاد شود ولی میزان خرابی‌ها به اندازه‌ای نباشد که منجر به خسارت جانی شود.

**سطح عملکرد ۴ - ایمنی جانی محدود:** در این سطح عملکرد پیش‌بینی می‌شود در اثر وقوع زلزله محتمل،

خرابی در سازه ایجاد شود ولی میزان خرابی‌ها به اندازه‌ای باشد که منجر به خسارت جانی حداقل شود.

**سطح عملکرد ۵ - آستانه فروریزش:** در این سطح عملکرد پیش‌بینی می‌شود در اثر وقوع زلزله محتمل، خرابی

گسترده در سازه ایجاد شود اما ساختمان فرونریزد و تلفات جانی به حداقل برسد.



**سطح عملکرد ۶- لحاظ نشده:** چنانچه برای عملکرد اجزای سازه‌ای، سطح عملکرد خاصی انتخاب نشده باشد، سطح عملکرد اجزای سازه‌ای لحاظ نشده نامیده می‌شود.

## ۲-۳-۲ سطوح عملکرد اجزای غیرسازه‌ای

سطوح عملکرد اجزای سازه‌ای شامل پنج سطح عملکرد به شرح زیر است:

(الف) سطح عملکرد A: خدمت‌رسانی بی‌وقفه

(ب) سطح عملکرد B: قابلیت استفاده بی‌وقفه

(ج) سطح عملکرد C: ایمنی جانی

(د) سطح عملکرد D: ایمنی جانی محدود

(هـ) سطح عملکرد E: لحاظ نشده.

**سطح عملکرد A- خدمت‌رسانی بی‌وقفه:** در این سطح عملکرد پیش‌بینی می‌شود که اجزای غیرسازه‌ای در اثر وقوع زلزله محتمل، دچار خرابی بسیار جزئی شوند، به گونه‌ای که خدمت‌رسانی ساختمان به طور پیوسته انجام شود.

**سطح عملکرد B- قابلیت استفاده بی‌وقفه:** در این سطح عملکرد پیش‌بینی می‌شود که اجزای غیرسازه‌ای در اثر وقوع زلزله محتمل، دچار خرابی بسیار جزئی شوند، به گونه‌ای که پس از زلزله، راه‌های دسترسی و فرار مانند درها، راهروها، پله‌ها، آسانسورها و روشنایی آن‌ها مختل نشده و امکان استفاده بی‌وقفه از ساختمان میسر باشد.

**سطح عملکرد C- ایمنی جانی:** در این سطح عملکرد پیش‌بینی می‌شود که خرابی اجزای غیرسازه‌ای در اثر وقوع زلزله محتمل، خطر جدی برای ساکنین به وجود نیاورد.

**سطح عملکرد D- ایمنی جانی محدود:** در این سطح عملکرد پیش‌بینی می‌شود که خرابی اجزای غیرسازه‌ای در اثر وقوع زلزله محتمل، به اندازه‌ای باشد که خسارت جانی حداقل شود.

**سطح عملکرد E- لحاظ نشده:** چنانچه برای عملکرد اجزای غیرسازه‌ای، سطح عملکرد خاصی انتخاب نشده باشد، سطح عملکرد اجزای غیرسازه‌ای لحاظ نشده نامیده می‌شود.



## ۳-۳-۲ سطوح عملکرد کل ساختمان

سطوح عملکرد کل ساختمان براساس سطح عملکرد اجزای سازه‌ای (۱ تا ۶ مطابق بند ۳-۲-۱) و غیرسازه‌ای آن (A تا E مطابق بند ۳-۳-۲) تعریف می‌شود. سطوح مختلف عملکرد ساختمان که در بهسازی مبنای مطلوب و ویژه به کار می‌روند، مطابق یکی از بندهای (۱-۳-۳-۲ تا ۴-۳-۳-۲) تعریف می‌شوند.

### ۱-۳-۳-۲ سطح عملکرد خدمت‌رسانی بی‌وقفه (A-۱) (OP<sup>۱</sup>):

ساختمانی دارای سطح عملکرد خدمت‌رسانی بی‌وقفه است که اجزای سازه‌ای آن دارای سطح عملکرد (۱-۱) قابلیت استفاده بی‌وقفه) و اجزای غیرسازه‌ای آن دارای سطح عملکرد (A-۱) خدمت‌رسانی بی‌وقفه) باشند.

### ۲-۳-۳-۲ سطح عملکرد قابلیت استفاده بی‌وقفه (B-۱) (IO<sup>۲</sup>):

ساختمانی دارای سطح عملکرد قابلیت استفاده بی‌وقفه است که اجزای سازه‌ای آن دارای سطح عملکرد (۱-۱) قابلیت استفاده بی‌وقفه) و اجزای غیرسازه‌ای آن دارای سطح عملکرد (B-۱) قابلیت استفاده بی‌وقفه) باشند.

### ۳-۳-۳-۲ سطح عملکرد ایمنی جانی (C-۳) (LS<sup>۳</sup>):

ساختمانی دارای سطح عملکرد ایمنی جانی است که اجزای سازه‌ای آن دارای سطح عملکرد (۳-ایمنی جانی) و اجزای غیرسازه‌ای آن دارای سطح عملکرد (C-۳) ایمنی جانی) باشند.

### ۴-۳-۳-۲ سطح عملکرد آستانه فروریزش (E-۵) (CP<sup>۴</sup>):

ساختمانی دارای سطح عملکرد آستانه فروریزش است که اجزای سازه‌ای آن دارای سطح عملکرد (۵-آستانه فروریزش) باشد. در این حالت محدودیتی برای سطح عملکرد اجزای غیرسازه‌ای وجود ندارد (سطح عملکرد لحاظ نشده E).

<sup>1</sup> OP: Operational Performance

<sup>2</sup> IO: Immediate Occupancy Performance

<sup>3</sup> LS: Life Safety Performance

<sup>4</sup> CP: Collapse Prevention Performance



## ۲-۴- انواع میراگرها

سیستم‌های غیرفعال اتلاف انرژی و به طور خاص میراگرها که در این فصل به آن‌ها پرداخته می‌شود و به صورت وابسته به تغییر مکان، وابسته به سرعت یا صورت‌های دیگر طبق بند (۲-۵) دسته‌بندی می‌شوند، باید با ضوابط این بخش سازگار باشند. تحلیل سیستم به روش خطی و غیرخطی در صورت نیاز باید بترتیب طبق بند (۲-۶) و (۲-۷) انجام شود. علاوه بر این، لازم است ضوابط تکمیلی مربوط به میراگرها که در بند (۲-۸) تعریف شده‌است برآورده شود. میراگرها باید طبق بندهای (۲-۹) و (۲-۱۰) به ترتیب بازبینی و آزمایش شوند.

میراگرها باید با در نظر گرفتن شرایط محیطی شامل باد، اثرات گذشت زمان (سن)، خزش، خستگی، دمای محیط، دمای حین بهره‌برداری و مجاورت با رطوبت یا مواد مضر طراحی شوند.

در ساخت مدل ریاضی ساختمان بهسازی شده باید توزیع میراگرها در پلان و در ارتفاع ساختمان در نظر گرفته شود. در تحلیل، لازم است وابستگی این وسایل به فرکانس ارتعاش، دمای محیطی و بهره‌برداری، سرعت، بارهای وارد و دوجهته بودن بارها در محاسبات لحاظ شود. با انجام چندین تحلیل روی ساختمان باید میزان تغییرات هر یک از مشخصات مکانیکی این وسایل با تغییر پارامترهای معرفی شده، تعیین شود. میراگرها باید قادر به تحمل تغییر مکان‌های بزرگتر (برای کلیه میراگرها) و سرعت‌های بزرگتر (برای میراگرهای وابسته به سرعت) از حداکثر مقدار محاسبه شده تحت زلزله سطح خطر-۲ براساس معیارهای زیر باشند.

۱- اگر تعداد میراگرها در طبقه مورد نظر از یک ساختمان، در یکی از جهات اصلی چهار عدد یا بیش‌تر بوده و حداقل دو عدد از این وسایل، در هر سمت مرکز سختی طبقه در راستای اصلی مورد نظر قرارداشته باشد، کلیه میراگرها (وابسته به جابجائی و وابسته به سرعت) باید قادر به تحمل تغییر مکان‌هایی برابر با ۱۳۰٪ حداکثر تغییر مکان محاسبه شده برای آن میراگر (یا وسیله) تحت زلزله سطح خطر-۲ باشند. هر میراگر وابسته به سرعتی که در بند (۲-۵-۲) تعریف شده باید قادر به



تحمل نیروی متناظر با سرعتی برابر با ۱۳۰٪ حداکثر سرعت محاسبه شده برای این وسیله تحت زلزله سطح خطر ۲- باشد.

۲- اگر کمتر از چهار عدد میراگر در طبقه‌ای مورد نظر از یک ساختمان، در یکی از جهات اصلی آن موجود باشد، یا کم تر از دو میراگر در هر سمت مرکز سختی طبقه در امتداد مورد بررسی وجود داشته باشد، کلیه میراگرها (وابسته به جابجائی و وابسته به سرعت) باید قادر به تحمل تغییر مکان هایی برابر با ۲۰۰٪ حداکثر تغییر مکان محاسبه شده در آن میراگر تحت زلزله‌ی سطح خطر ۲- باشند. اگر میراگر وابسته به سرعت باشد، باید قادر به تحمل نیروی متناظر با سرعتی معادل ۲۰۰٪ حداکثر سرعت محاسبه شده برای این میراگر تحت زلزله سطح خطر ۲- باشد. اجزا و اتصالاتی که نیروها را بین میراگر انتقال می‌دهند نیز باید طوری طراحی شوند که به ازای نیروهای توصیف شده در ردیف های ۱ و ۲ بالا، رفتار آنها ارتجاعی خطی باقی بماند.

## ۲-۵ مدل سازی میراگرها

در مدل‌های ریاضی تهیه شده برای میراگرها، لازم است سختی اجزای سازه‌ای که بخشی از مسیر انتقال بار بین میراگر و زمین هستند، و انعطاف پذیری آنها که بر عملکرد سیستم اتلاف انرژی تأثیر می‌گذارد، شامل اجزای پی، مهاربندهایی که با میراگرها به صورت سری کار می‌کنند و اتصالات بین مهاربندها و میراگرها، لحاظ شوند. میراگرها باید به صورتی که در بندهای بعدی ذکر می‌شود مدل شوند، مگر اینکه از روش‌های تأیید شده دیگری استفاده شود.

## ۲-۵-۱ میراگرهای وابسته به تغییر مکان

در یک میراگر وابسته به تغییر مکان باید رابطه نیرو-تغییر مکان تابعی از تغییر مکان نسبی بین دو انتهای میراگر باشد. عملکرد یک میراگر وابسته به تغییر مکان باید مستقل از سرعت نسبی بین دو انتهای میراگر و فرکانس ارتعاش تعریف شود. به منظور دستیابی به پاسخ نیرو-تغییر مکان و وابستگی بین آنها، میراگرهای وابسته به تغییر مکان باید با جزئیات کافی مدل سازی شوند و همچنین در صورت وجود اندرکنش نیروی



محوری با برش و خمش، یا وجود تغییرشکل دو طرفه، مدل سازی باید با در نظر گرفتن جزئیات کافی و تاثیرگذار انجام شود.

برای ارزیابی عملکرد یک میراگر وابسته به تغییر مکان براساس اطلاعات آزمایشگاهی، نیروی موجود در آن باید از معادله‌ی (۱-۲) محاسبه شود.

$$F = K_{eff} D \quad (1-2)$$

$D$ : تغییر مکان نسبی دو انتهای میراگر (بدون واحد)

در رابطه فوق سختی مؤثر میراگر،  $K_{eff}$  توسط معادله (۲-۲) به دست می‌آید:

$$K_{eff} = \frac{|F^+| + |F^-|}{|D^+| + |D^-|} \quad (2-2)$$

که در آن:

$D^-$ : حداکثر تغییر مکان منفی میراگر

$D^+$ : حداکثر تغییر مکان مثبت میراگر

$F^-$ : نیروی منفی میراگر در یک چرخه بارگذاری در دامنه تغییر مکان  $\Delta^-$

$F^+$ : نیروی مثبت میراگر در یک چرخه بارگذاری در دامنه تغییر مکان  $\Delta^+$

## ۲-۵-۲ میراگرهای وابسته به سرعت

### ۱-۲-۵-۲ میراگرهای ویسکوالاستیک جامد<sup>۱</sup>

میراگرهای ویسکو-الاستیک جامد باید با استفاده از یک فنر و میراگر موازی (مدل کلونین) مدل سازی شوند. وابستگی ثابت‌های فنر و میراگر به فرکانس و دما باید با در نظر گرفتن فرکانس اصلی ساختمان بهسازی شده ( $f_1$ ) و حدود دمای بهره‌برداری وسیله محاسبه شود. اگر پاسخ چرخه‌ای برای یک میراگر ویسکو-الاستیک جامد را نتوان با تخمین دقیقی از ثابت‌های فنر و میراگر به دست آورد، واکنش ساختمان بهسازی

<sup>1</sup> Solid viscoelastic devices



شده را باید با تحلیل‌های متوالی ساختمان با استفاده از مقادیر کرانه بالا و پایین ثابت های فنر و میراگر تخمین زد.

نیروی ایجادشده در یک میراگر ویسکو-الاستیک باید از معادله (۳-۲) محاسبه شود.

$$F = K_{\text{eff}}D + C\dot{D} \quad (3-2)$$

که در آن  $C$  ضریب میرایی وسیله ویسکو-الاستیک،  $D$  تغییر مکان نسبی بین دوانتهای وسیله و  $\dot{D}$  سرعت نسبی بین دوانتهای وسیله و  $K_{\text{eff}}$  سختی مؤثر وسیله است که از معادله (۴-۲) به دست می‌آید:

$$K_{\text{eff}} = \frac{|F^+| + |F^-|}{|D^+| + |D^-|} = k' \quad (4-2)$$

که در آن  $K'$  سختی ذخیره شده نامیده می‌شود.

ضرایب میرایی وسیله باید از معادله (۵-۲) به دست آید:

$$C = \frac{W_D}{\pi\omega_1 D_{\text{ave}}^2} = \frac{K''}{\omega_1} \quad (5-2)$$

که در آن  $K''$  سختی اتلاف شده،  $\omega_1$  فرکانس زاویه ای برابر با  $2\pi f_1$  و  $D_{\text{ave}}$  میانگین مقادیر مطلق تغییر مکان‌های  $D^+$  و  $D^-$  و  $W_D$  سطح محصور شده توسط یک چرخه‌ی کامل از منحنی نیرو-تغییر مکان وسیله می‌باشد.

پاسخ چرخه‌ای میراگرهای ویسکو-الاستیک جامد معمولاً وابسته به فرکانس و دامنه حرکت و دمای بهره‌برداری خواهد بود (افزایش دما ناشی از تحریک سیستم).

## ۲-۲-۵-۲- میراگرهای ویسکو-الاستیک مایع<sup>۱</sup>

میراگرهای ویسکو-الاستیک مایع باید با استفاده از یک فنر و میراگر به صورت سری (مدل ماکسول) مدل سازی شوند. وابستگی ثابت های فنر و میراگر این میراگرها به فرکانس و دما باید با در نظر گرفتن فرکانس اصلی ساختمان بهسازی شده ( $f_1$ ) و حدود دمای بهره‌برداری وسیله محاسبه شود. اگر پاسخ چرخه‌ای یک میراگر ویسکو-الاستیک مایع را نتوان با تخمین دقیقی از ثابت های فنر و میراگر به دست آورد، عملکرد

<sup>1</sup> Fluid viscoelastic devices



ساختمان بهسازی شده را باید با تحلیل‌های متوالی قاب ساختمان با استفاده از مقادیر کرانه بالا و پایین ثابت فنر و میراگر تخمین زد. پاسخ میراگرهای ویسکو-الاستیک مایع معمولاً وابسته به فرکانس و دامنه حرکت و دمای بهره‌برداری است (افزایش دما ناشی از تحریک سیستم).

### ۲-۵-۳- میراگرهای ویسکوز مایع<sup>۱</sup>

سختی میراگرهای ویسکوز مایع در محدوده فرکانسی  $0.5f_1$  تا  $2f_1$  باید همانند یک میراگر ویسکو-الاستیک مدل شود. در صورت عدم وجود سختی در محدوده فرکانسی  $0.5f_1$  تا  $2f_1$ ، نیرو در وسیله ویسکوز مایع از رابطه (۲-۶) محاسبه می‌شود.

$$F = C_0 |\dot{D}|^\alpha \operatorname{sgn}[\dot{D}] \quad (2-6)$$

که در آن  $C_0$  ضریب میرایی وسیله،  $\alpha$  توان عددی سرعت وسیله،  $\dot{D}$  سرعت نسبی بین دو انتهای وسیله و  $\operatorname{sgn}$  تابع علامت است که در اینجا بیانگر علامت جمله‌ی سرعت نسبی است.

### ۲-۵-۳ انواع دیگر میراگرها

میراگرهایی که نه در رده‌ی میراگرهای وابسته به تغییر مکان و نه در رده‌ی میراگرهای وابسته به سرعت قرار می‌گیرند را باید با استفاده از روش‌های مورد تأیید مدل‌سازی کرد. در چنین مدل‌هایی باید منحنی‌های نیرو-سرعت-تغییر مکان وسیله در اثر کلیه عوامل بارگذاری شامل اثرات ثقلی، لرزه‌ای و حرارتی به دقت تعریف شود.

### ۲-۶- روش‌های خطی

استفاده از روش‌های خطی تنها در صورت فراهم شدن معیارهای زیر مجاز است:

- ۱- رفتار کل سیستم قاب‌بندی ساختمان، به جز میراگرها، تحت سطح خطر انتخابی زلزله و با به حساب آوردن اثرات میرایی اضافه شده به سیستم، به صورت ارتجاعی خطی باقی بماند.

<sup>1</sup> Fluid viscos devices





- ۲- میرایی مؤثر تأمین شده توسط عمل اتلاف انرژی در مود اصلی، از ۳۰٪ مقدار بحرانی تجاوز ننماید.
- ۳- در مدل ریاضی ساختمان بهسازی شده، از سختی سکانتی هر میراگری که در تغییر مکان حداکثر محاسبه می شود، استفاده شده باشد.
- ۴- در هنگام ارزیابی وضعیت ساختمان از نظر منظم بودن، میراگرها نیز در مدل ریاضی در نظر گرفته شده باشند.
- ۵- اثر مودهای بالاتر بر پاسخ سازه ناچیز باشد. برای مشخص کردن لزوم اعمال اثرات مودهای بالاتر، ضروری است ابتدا یک تحلیل طیف پاسخ مودال، به نحوی که ۹۰ درصد مشارکت جرمی در مودهای در نظر گرفته شده حاصل شود، برای سازه انجام شود. سپس لازم است تحلیل دیگری تنها با در نظر گرفتن مشارکت مود اول انجام شود. در صورتیکه برش در هر یک از طبقات، که از تحلیل مودال با مشارکت جرمی ۹۰ درصد حاصل شده است، بیشتر از ۱/۳۰ برابر میزان برش حاصل از تحلیل براساس مشارکت مود اول باشد، لازم است اثرات مودهای بالاتر در تحلیل وارد شود.

## ۲-۶-۱- روش استاتیکی خطی

### ۲-۶-۱-۱- میراگرهای وابسته به تغییر مکان

- استفاده از روش استاتیکی خطی برای تحلیل میراگرهای وابسته به تغییر مکان به شرطی مجاز است که علاوه بر ضوابط بند (۲-۶) ضوابط زیر نیز فراهم شوند:
- ۱- نسبت حداکثر مقاومت در هر طبقه و در راستای مورد بررسی، به برش طبقه‌ای که بر مبنای معادله (۲-۱۷) قابل محاسبه است، باید بین ۸۰٪ و ۱۲۰٪ مقدار میانگین همین نسبت برای کلیه‌ی طبقات باشد. در محاسبه حداکثر مقاومت طبقه لازم است مشارکت کلیه‌ی اجزاء از جمله میراگرها، در نظر گرفته شود.
  - ۲- حداکثر مقاومت کلیه میراگرها در یک طبقه و در راستای مورد بررسی، نباید از ۵۰٪ مقاومت بقیه قاب (بدون این وسایل) در آن طبقه بیش تر باشد. این مقاومت باید به ازای تغییر مکان‌های مورد انتظار تحت زلزله



سطح خطر-۲ محاسبه شود. اثرات عمر سازه و شرایط محیط باید در محاسبه حداکثر مقاومت میراگرها محسوب شود.

بار جانبی استاتیکی معادل حاصل از رابطه (۷-۲) باید توسط ضرایب اصلاح برای میرایی موجود در جدول (۱-۲) کاهش داده شود تا میزان اتلاف انرژی (میرایی) تأمین شده توسط میراگرها به حساب آید. اثر میرایی باید توسط معادله (۱۲-۲) محاسبه شود.

جدول (۱-۲) ضرایب  $B_1$  و  $B_s$  بر حسب میرایی مورد نظر

$B_1$	$B_s$	$\beta$
۰/۸	۰/۸	$\leq 2$
۱/۰	۱/۰	۵
۱/۲	۱/۳	۱۰
۱/۵	۱/۸	۲۰
۱/۷	۲/۳	۳۰
۱/۹	۲/۷	۴۰
۲/۰	۳/۰	$\geq 50$

در روش تحلیل استاتیکی خطی، نیروی جانبی ناشی از زلزله (V) به صورت ضریبی از وزن کل ساختمان (W) محاسبه می‌شود:

$$V = C_1 C_2 C_m S_a W \quad (7-2)$$

که در آن:

W: وزن کل ساختمان، شامل وزن مرده ی ساختمان و درصدی از سربار زنده مطابق آخرین ویرایش استاندارد ۲۸۰۰ ایران میباشد؛

$S_a$ : شتاب طیفی به ازای زمان تناوب اصلی T است که از روی طیف استاندارد تعیین می‌شود.

$C_1$ : ضریب تصحیح برای اعمال تغییر مکان‌های غیر ارتجاعی سیستم است که به روش زیر محاسبه میشود:

$$\begin{cases} T \leq 0.2 \rightarrow C_1 = 1 + \frac{R-1}{0.04 \alpha} \\ 0.2 \leq T \leq 1 \rightarrow C_1 = 1 + \frac{R-1}{\alpha T^2} \\ 1 \leq T \rightarrow C_1 = 1 \end{cases} \quad (8-2)$$

در این رابطه:



$\alpha$ : ضریب نوع خاک بوده و برابر است با:

۱۳۰ برای خاک نوع I مطابق استاندارد ۲۸۰۰

۹۰ برای خاک نوع II مطابق استاندارد ۲۸۰۰

۶۰ برای خاک نوع III و IV مطابق استاندارد ۲۸۰۰

R: نسبت مقاومت مطابق رابطه (۹-۲):

$$R = \frac{DCR_{max}}{1.5} C_m \geq 1 \quad (9-2)$$

که در آن  $DCR_{max}$  بزرگترین مقدار DCR در المانها بوده که با فرض  $C_1=C_2=C_m=1.0$  بدست آمده است.

$C_2$ : اثرات کاهش سختی و مقاومت اعضای سازه ای را بر تغییرمکان ها به دلیل رفتار چرخشی آن ها وارد می

کند و مقدار آن برابر است با:

$$C_2 = 1 + \frac{1}{800} \left( \frac{R-1}{T} \right)^2 \quad (10-2)$$

برای ساختمانها با زمان تناوب اصلی بزرگتر از ۰/۷،  $C_2=1$  میباشد.

$C_m$ : ضریبی برای اعمال اثر مودهای بالاتر بوده و از جدول (۲-۲) بدست می آید.

جدول (۲-۲) مقادیر ضریب  $C_m$

تعداد طبقات	قاب خمشی بتنی یا فولادی	قاب فولادی مهاربندی شده با محورهای متقارب یا غیرمتقارب	سازه با دیوار برشی	سایر سیستم های سازه ای
یک یا دو	۱	۱	۱	۱
سه یا بیشتر	۰/۹	۰/۹	۰/۸	۱

علاوه بر این، میزان میرائی موثر باید براساس رابطه (۱۱-۲) محاسبه شود.

$$\beta_{eff} = \beta + \frac{\sum_j W_j}{4\pi W_k} \quad (11-2)$$

که در آن  $\beta$  عبارت است از میرایی سیستم قاب بندی ساختمان که باید مساوی ۵٪ فرض شود مگر اینکه

میرایی دیگری مورد نظر باشد و  $W_j$  عبارت است از کار انجام شده توسط وسیله زام در یک چرخه کامل

تحت تغییر مکان های  $\delta_i$  کفهای طبقات. عمل جمع زدن روی تمامی میراگرها انجام می گیرد و  $W_k$

حداکثر انرژی کرنشی قاب است که از معادله (۱۲-۲) به دست می آید:



$$W_k = \sum_i \frac{1}{2} F_i \delta_i \quad (12-2)$$

که در آن  $F_i$  نیروی اینرسی در کف طبقه‌ی نام بوده و عمل جمع روی کلیه کف‌ها انجام می‌گیرد.

#### ۲-۱-۶-۲- میراگرهای وابسته به سرعت

استفاده از روش استاتیکی خطی برای مدل‌سازی و تحلیل رفتار میراگرهای وابسته به سرعت مجاز است به شرط اینکه علاوه بر ضوابط بند (۲-۶) ضوابط زیر نیز برآورد شوند:

حداکثر مقاومت کلیه میراگرها در یک طبقه و در راستای مورد بررسی نباید از ۵۰٪ مقاومت سیستم باربر جانبی بیشتر باشد. این مقاومت باید به ازای تغییر مکان‌های مورد انتظار تحت زلزله‌ی سطح خطر ۲- محاسبه شود. اثرات عمر سازه و شرایط محیط باید در محاسبه حداکثر مقاومت میراگرها در نظر گرفته شود. بار جانبی استاتیکی معادل حاصل از رابطه (۲-۷) باید توسط ضرایب اصلاح برای میرایی حاصل از جدول (۱-۳) کاهش داده شود تا اتلاف انرژی به حساب آید. اثر میرایی باید از معادله (۲-۱۳) محاسبه شود:

$$\beta_{\text{eff}} = \beta + \frac{\sum_j W_j}{4\pi W_k} \quad (13-2)$$

که در آن  $\beta$  عبارت است از میرایی قاب سازه‌ای که باید مساوی ۵٪ گرفته شود مگر آنکه میرایی دیگری مورد نظر باشد و  $W_j$  کار انجام شده توسط وسیله زام در یک چرخه کامل به ازای تغییر مکان‌های  $\delta_i$  کف‌های ساختمان است. عمل جمع روی کلیه میراگرهای موجود انجام می‌گیرد و  $W_k$  حداکثر انرژی کرنشی قاب می‌باشد که از رابطه (۲-۱۲) به دست می‌آید.

کار انجام شده توسط وسیله زام در یک چرخه کامل بارگذاری را باید توسط معادله (۲-۱۴) محاسبه کرد:

$$W_j = \frac{2\pi^2}{T} \delta_{rj}^2 C_j \quad (14-2)$$

که در آن  $T$  زمان تناوب اصلی ساختمان بهسازی شده است که در محاسبه آن سختی میراگر وابسته به سرعت نیز در نظر گرفته شده است،  $C_j$  ثابت میرایی وسیله زام و  $\delta_{rj}$  تغییر مکان نسبی بین دو انتهای وسیله زام در امتداد محور این وسیله می‌باشد.



محاسبه میرایی مؤثر با استفاده از معادله (۱۵-۲) به جای معادله (۱۳-۲) برای وسایل میراگر ویسکوز خطی مجاز می‌باشد:

$$\beta_{\text{eff}} = \beta + \frac{T \sum_j C_j (\cos \theta_j)^2 \phi_{ij}^2}{4\pi \sum_i \left[ \frac{w_i}{g} \right] \phi_i^2} \quad (15-2)$$

که در آن  $\theta_j$  زاویه شیب وسیله زام با افق،  $\phi_{ij}$  تغییر مکان نسبی بین دو انتهای وسیله زام در مود اول در جهت افقی،  $w_i$  وزن (موجود) طبقه  $i$  ام در مود اول است.

### ۲-۶-۱-۳- نیروهای طراحی

نیروهای طراحی برای اجزای ساختمان بهسازی شده باید در سه مرحله مجزای تغییر شکلی به ترتیب زیر محاسبه شوند. از بین این مقادیر، مقدار حداکثر باید برای طراحی به کار رود.

۱- ناحیه تغییر مکان نسبی (دریفت) حداکثر: نیروهای جانبی در هر تراز از ساختمان باید با استفاده از

معادله (۱۶-۲) محاسبه شوند.

$$F_i = C_{vi} V \quad (16-2 \text{ الف})$$

$$C_{vi} = \frac{w_i h_i^k}{\sum_{j=1}^n w_j h_j^k} \quad (16-2 \text{ ب})$$

که در آن  $V$  برش پایه اصلاح شده معادل

$C_{vi}$ : ضریب توزیع

$w_i$ : سهم اختصاص یافته به تراز  $i$ ام از وزن لرزه ای مؤثر،  $W$

$h_i$ : ارتفاع تراز  $i$ ام از تراز پایه

و  $K$  مشارکت ارتفاعی طبقات است که برای دوره تناوب‌های بزرگتر از  $2/5$  ثانیه برابر با ۲، و برای دوره

تناوب‌های کمتر از  $0/5$  ثانیه برابر با ۱ تعیین می‌شود. در این بازه نیز با استفاده از درونیابی خطی مقدار  $K$

محاسبه می‌شود.



۲- ناحیه سرعت حداکثر و تغییر مکان نسبی (دریافت) صفر: مؤلفه ویسکوز نیرو در هر میراگر باید توسط معادله (۳-۲) یا (۶-۲) محاسبه شود که در آن سرعت نسبی  $\dot{D}$  برابر با  $2\pi f_1 D$  و  $D$  تغییر مکان نسبی بین دو انتهای وسیله می‌باشد که در مرحله حداکثر تغییر مکان نسبی محاسبه شده‌است. نیروهای ویسکوز محاسبه شده باید به مدل تحلیلی ساختمان در نقاط اتصال وسایل و در جهات سازگار با فرم تغییر شکل یافته ساختمان در هنگام حداکثر تغییر مکان نسبی اعمال شود. نیروهای افقی اینرسی در تراز هر کف ساختمان نیز باید همزمان با نیروهای ویسکوز اعمال شوند به طوری که تغییر مکان افقی هر یک از کف‌ها برابر صفر شود.

۳- ناحیه حداکثر شتاب طبقه: نیروهای طراحی اجزای ساختمان بهسازی شده باید با جمع زدن نیروهای محاسبه شده در مرحله حداکثر دریافت ضرب در  $CF_1$ ، و نیروهای داخلی محاسبه شده در مرحله حداکثر سرعت ضرب در  $CF_2$ ، به دست آیند.

$$CF_1 = \cos [\tan^{-1}(2\beta_{\text{eff}})] \quad (۱۷-۲)$$

$$CF_2 = \sin [\tan^{-1}(2\beta_{\text{eff}})] \quad (۱۸-۲)$$

که در آن  $\beta_{\text{eff}}$  توسط معادله (۱۳-۲) یا (۱۵-۲) تعریف می‌شود.

### ۲-۶-۲- روش دینامیکی خطی

اگر روش دینامیکی خطی براساس ضوابط بند (۶-۲) انتخاب شود، از روش دینامیکی خطی با استفاده از ضوابط بیان شده در این بخش باید استفاده شود.

استفاده از روش طیف پاسخ به عنوان یکی از روش‌های دینامیکی خطی هنگامی که میرایی موثر در مود اصلی ساختمان بهسازی شده در هر جهت اصلی از ۳۰٪ مقدار بحرانی تجاوز نمی‌کند، مجاز می‌باشد.

### ۲-۶-۲-۱- میراگرهای وابسته به تغییر مکان

اعمال روش دینامیکی خطی برای تحلیل ساختمان‌های بهسازی شده دارای وسایل وابسته به تغییر مکان باید با محدودیت‌های ذکر شده در بند (۲-۶-۱-۱) سازگار باشد.



برای تحلیل به روش طیف پاسخ، اصلاح طیف پاسخ با میرایی ۵٪ برای احتساب میرایی تأمین شده توسط میراگرهای وابسته به تغییر مکان مجاز می‌باشد. طیف شتاب با میرایی ۵٪ باید توسط ضریب اصلاح میرایی متناظر با مود مربوطه،  $B$  یا  $B_s$  یا  $B_1$  برای دوره تناوب های واقع در محدوده مود مورد بررسی کاهش داده شود. مقدار  $B$  در هر مود ارتعاشی متفاوت خواهد بود. ضریب اصلاح برای میرایی در هر مود اصلی باید با استفاده از جدول (۳-۱) و میرایی مؤثر محاسبه شده در آن مود تعیین شود. میرایی مؤثر باید با استفاده از روشی مشابه با آنچه که در بند (۲-۶-۱-۱) ذکر شد، محاسبه شود.

اگر حداکثر نیروی برش پایه محاسبه شده توسط تحلیل دینامیکی کمتر از ۸۰٪ برش پایه اصلاح شده معادل ذکر شده در بند (۲-۶-۱) باشد، نیروها و تغییر شکل های اعضا باید همگی به یک نسبت افزایش داده شود تا برش پایه‌ی حاصل برابر ۸۰٪ برش پایه اصلاح شده معادل شود.

#### ۲-۲-۶-۲- میراگرهای وابسته به سرعت

برای تحلیل به روش طیف پاسخ، اصلاح طیف پاسخ با میرایی ۵٪ به منظور احتساب میرایی تأمین شده توسط میراگرهای وابسته به سرعت مجاز می‌باشد. مقادیر طیف شتاب با میرایی ۵٪ باید توسط ضریب اصلاح میرایی متناظر با مود تحت بررسی،  $B$ ،  $B_s$  یا  $B_1$  در محدوده دوره تناوب های مود مورد بررسی کاهش داده شود که مقدار  $B$  برای هر مود ارتعاشی متفاوت خواهد بود. ضریب اصلاح برای میرایی در هر مود اصلی باید با استفاده از جدول (۳-۱) و میرایی مؤثر محاسبه شده در آن مود تعیین شود. میرایی مؤثر در مود  $m$ -ام ارتعاش ( $B_{eff-m}$ ) باید طبق معادله (۲-۱۹) تعیین شود.

$$\beta_{eff-m} = \beta_m + \frac{\sum_j W_j}{4\pi W_{mk}} \quad (۲-۱۹)$$

که در آن  $\beta_m$  عبارت است از میرایی مود  $m$  در قاب ساختمان،  $W_{mj}$  کار انجام شده توسط وسیله زام در یک چرخه کامل تحت تغییر مکان های مودال طبقات  $\delta_{mi}$  و  $W_{mi}$  حداکثر انرژی کرنشی قاب در مود  $m$ -ام است که توسط معادله (۲-۲۰) تعیین می‌شود:

$$W_{mk} = \frac{1}{2} \sum_i F_{mi} \delta_{mi} \quad (۲-۲۰)$$



که در آن  $F_{mi}$  و  $\delta_{mi}$  به ترتیب نیروی اینرسی افقی و تغییر مکان افقی مود  $m$ -ام در تراز کف نام می‌باشد. کار انجام شده توسط وسیله میراگرویسکوز خطی زام، در یک چرخه کامل بارگذاری در مورد  $m$  ام را می‌توان از معادله (۲-۲۱) محاسبه نمود:

$$W_{mj} = \frac{2\pi^2}{T_m} \delta_{mrj}^2 C_j \quad (2-21)$$

که در آن  $T_m$  زمان تناوب مود  $m$  ام ساختمان بهسازی شده است که در محاسبه آن سختی میراگرهای وابسته به سرعت نیز منظور شده،  $C_j$  ثابت میرایی وسیله زام و  $\delta_{mrj}$  تغییر مکان نسبی مود  $m$  ام بین دو انتهای وسیله زام می‌باشد.

علاوه بر اعمال مستقیم روش طیف پاسخ مطابق با این بخش برای دستیابی به نیروهای اعضا در حداکثر تغییر مکان نسبی (دریفت)، نیروهای آنها در حداکثر سرعت و حداکثر شتاب در هر مود مورد نظر نیز باید با استفاده از روش ذکر شده در بند (۲-۱-۶-۲) تعیین شوند. ضرایب ترکیب مودی  $CF_1$  و  $CF_2$  باید براساس معادلات (۲-۱۷) و (۲-۱۸) و با استفاده از  $\beta_{eff-m}$  برای مود  $m$  ام محاسبه شود.

اگر حداکثر نیروی برش پایه محاسبه شده توسط تحلیل دینامیکی، کم‌تر از ۸۰٪ برش پایه اصلاح شده معادل طبق بند (۲-۱-۶-۲) باشد، نیروها و تغییرشکل‌های اعضا باید همگی به یک نسبت افزایش داده شوند به طوری که برش پایه حاصل، به ۸۰٪ برش پایه اصلاح شده معادل برسد.

## ۲-۷- روش‌های غیرخطی

### ۲-۷-۱- روش استاتیکی غیرخطی

اگر روش استاتیکی غیرخطی طبق ضوابط بند (۲-۶) انتخاب شود، روش استاتیکی غیرخطی باید براساس ضوابط مطرح شده در این بند دنبال شود. مدل ریاضی غیرخطی ساختمان بهسازی شده باید به طور دقیق در برگیرنده مشخصات منحنی‌های غیرخطی نیرو-سرعت-تغییر مکان میراگرها و مشخصات مکانیکی اجزای نگه‌دارنده این وسایل باشد. مشخصات سختی مربوطه، باید سازگار با تغییرشکل‌های موجود در تغییر مکان هدف و فرکانسی برابر با معکوس زمان تناوب  $T_e$  (که از رابطه ۲-۲۴ بدست می‌آید) باشد. میراگرهای با





سختی و میرایی وابسته به فرکانس ارتعاش و یا درجه حرارت باید با مشخصاتی مدل شود که آن مشخصات با شرایط زیر سازگار باشد.

۱- تغییر شکل‌های مورد انتظار در تغییر مکان هدف.

۲- فرکانس برابر با عکس دوره تناوب موثر.

مزیت مدلسازی میراگرهای وابسته به تغییر مکان این است که افزایش سختی ساختمان ناشی از به کارگیری این وسایل در مدل وارد شده و نیز، کاهش  $T_e$  باعث کاهش در تغییر مکان هدف می‌شود. این روش استاتیکی غیرخطی، شیوه دیگری برای محاسبه تغییر مکان هدف است و به صورت مستقیم، میرایی اضافه شده توسط میراگرها را اعمال می‌کند.

مزیت مدلسازی میراگرهای وابسته به سرعت این است که باعث افزایش سختی و میرایی ویسکوز معادل در قاب ساختمانی می‌شود. برای اغلب وسایل وابسته به سرعت، دستاورد اصلی این روش مدلسازی مرتبط با میرایی ویسکوز افزوده شده به سیستم می باشد. نیروهای میرایی مودهای بالاتر در میراگرها باید بدون توجه به روش استاتیکی غیرخطی به کار گرفته شده تعیین شوند.

در این روش، بار جانبی ناشی از زلزله، بطور استاتیکی و به تدریج به صورت فزاینده به سازه اعمال می شود تا آنجا که تغییر مکان یک نقطه ی خاص (نقطه ی کنترل) تحت اثر بار جانبی، به مقدار مشخصی (تغییر مکان هدف) برسد و یا سازه فروریزد. انتخاب نقطه کنترل، الگوی بارگذاری، تعیین دوره تناوب اصلی و روش انجام تحلیل باید الزامات این بخش را برآورده نماید.

- رابطه بین برش پایه و تغییر مکان نقطه ی کنترل باید برای هر گام افزایش نیروهای جانبی تا رسیدن به تغییر مکانی حداقل ۱/۵ برابر تغییر مکان هدف ثبت شود.

- در مدلسازی بارهای ثقلی اعضا در ترکیب با بارهای جانبی باید مطابق ضوابط استاندارد ۲۸۰۰ ایران برای انتخاب ترکیب بارها عمل شود. بارهای جانبی باید در هر دو جهت منفی و مثبت به سازه اعمال و اثرات بحرانی ترین حالت برای طراحی استفاده گردد.



- در مدل تحلیلی باید پاسخ نیرو-تغییرشکل در طول هر عضو برای تشخیص موقعیت تلاش غیرخطی قابل تعیین باشد.

تحلیل استاتیکی غیرخطی می‌تواند به دو روش کامل و ساده شده انجام شود:

۱- در روش کامل، اعضای اصلی و غیراصلی در مدل وارد شده و رفتار غیرخطی آن‌ها تا حد امکان نزدیک به واقعیت انتخاب می‌شود. همچنین اثرات کاهندگی به نحوی وارد محاسبات می‌شود.

۲- در روش ساده شده، فقط اعضای اصلی مدل می‌شوند. رفتار غیرخطی اعضای اصلی توسط مدل دو خطی شبیه‌سازی می‌شود و از اثرات کاهندگی صرف نظر می‌شود. هنگام استفاده از این روش، لازم است معیارهای پذیرش در نظر گرفته شود. چنانچه تعداد کمی از اعضای اصلی توسط این معیار پذیرفته نشوند، می‌توان آن‌ها را در دسته‌ی اعضای غیراصلی فرض کرده و از مدل خارج نمود.

#### ۲-۷-۱-۱ نقطه‌ی کنترل

در تحلیل استاتیکی غیرخطی، مرکز جرم بام به عنوان نقطه‌ی کنترل تغییرمکان سازه انتخاب می‌شود (مرکز جرم سقف خرپشته به عنوان نقطه‌ی کنترل انتخاب نمی‌شود).

#### ۲-۷-۱-۲ توزیع بار جانبی

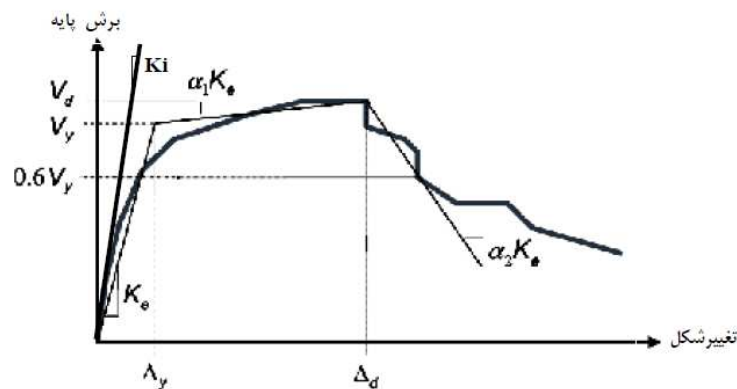
توزیع بار جانبی بر مدل سازه باید تا حد امکان شبیه به آنچه که هنگام زلزله رخ خواهد داد، باشد و حالت‌های بحرانی تغییرشکل و نیروهای داخلی را در اعضا ایجاد نماید. به همین جهت توزیع بار در ارتفاع سازه باید متناسب با شکل مد اول ارتعاشی در جهت مورد نظر لحاظ گردد.

#### ۲-۷-۱-۳ مدل رفتار سه خطی نیرو-تغییرمکان سازه

رفتار غیرخطی سازه که ارتباط بین برش پایه و تغییرمکان نقطه‌ی کنترل را مطابق شکل (۲-۱) مشخص می‌نماید، به منظور محاسبه‌ی سختی جانبی موثر ( $K_e$ ) و برش تسلیم موثر ( $V_y$ ) باید با یک مدل رفتار سه خطی ساده جایگزین شود. برای ساده‌سازی مدل رفتار غیرخطی، قسمت اول منحنی از مبدا مختصات و با شیب برابر با سختی موثر جانبی،  $K_e$ ، ترسیم می‌گردد. سختی موثر جانبی،  $K_e$ ، برابر با سختی سکانتی در



برش پایه معادل ۶۰ درصد برش پایه تسلیم سازه تعریف میگردد. قسمت دوم منحنی ایده آل شده نشان دهنده سخت شوندگی سازه پس از تسلیم بوده و از اتصال نقطه متناظر با تغییر مکان هدف یا تغییر مکان متناظر با حداکثر برش پایه  $(V_d, \Delta_d)$ ، به نقطه ای بر روی خط اول به گونه ای تعیین میشود که مساحت زیر منحنی ایده آل شده با مساحت زیر منحنی ظرفیت سازه برابر گردد. قسمت سوم منحنی ایده آل شده که دارای شیب منفی  $(\alpha_2 K_e)$  میباشد از اتصال نقطه متناظر با تغییر مکان هدف یا تغییر مکان متناظر با حداکثر برش پایه  $(V_d, \Delta_d)$ ، به نقطه ای متناظر با برش پایه برابر با ۶۰ درصد برش پایه تسلیم سازه ترسیم میگردد.



شکل (۱-۲): منحنی ساده شده نیرو-تغییر مکان

#### ۴-۱-۷-۲ تغییر مکان هدف

تغییر مکان هدف برحسب نوع دیافراگم تعیین می شود. در سازه‌هایی که دارای دیافراگم صلب یا نیمه صلب هستند تغییر مکان هدف باید به دلیل پیچش اصلاح شود. دیافراگم طبقات باید برای نیرویی برابر یکی از دو مقدار بندهای (۴-۱-۷-۲) الف و ب) طراحی شود. اثر زلزله در امتداد عمود بر امتداد موردنظر در صورت لزوم باید در نظر گرفته شود.

#### ۴-۱-۷-۲ الف ساختمان با دیافراگم صلب

تغییر مکان هدف برای سازه با دیافراگم های صلب باید با در نظر گرفتن رفتار غیرخطی سازه برآورد شود. به عنوان یک روش تقریبی می توان مقدار تغییر مکان هدف را از رابطه (۲۲-۲) محاسبه نمود.

$$\delta_t = C_0 C_1 C_2 S_a \frac{T_e^2}{4\pi^2} g \quad (22-2)$$



که در آن  $T_e$  زمان تناوب اصلی موثر ساختمان مطابق رابطه (۲-۲۳) بدست می‌آید:

$$T_e = T_i \sqrt{\frac{K_i}{K_e}} \quad (2-23)$$

که در آن  $T_i$  دوره تناوب اصلی ساختمان با فرض رفتار خطی است و  $K_i$  سختی جانبی ارتجاعی مطابق شکل (۱-۲) می‌باشد.

$C_0$  ضریب اصلاح برای ارتباط تغییر مکان طیفی سیستم یک درجه آزادی به تغییر مکان بام سیستم چند درجه آزادی است که برابر یکی از مقادیر زیر انتخاب می‌شود:

- ضریب مشارکت مود اول

- ضریب مشارکت جرمی محاسبه شده با استفاده از بردار شکل متناظر با تغییر شکل سازه در مقدار بردار در نقطه کنترل در تغییر مکان هدف

- مقادیر تقریبی مطابق جدول (۲-۳)

جدول (۲-۳) مقدار ضریب  $C_0$

تعداد طبقات ساختمان	ساختمان‌های برشی <sup>۲</sup>	سایر ساختمانها
۱	۱/۰	۱/۰
۲	۱/۲	۱/۲
۳	۱/۲	۱/۳
۵	۱/۳	۱/۴
۱۰	۱/۳	۱/۵

۱. برای مقادیر مابین حدود داده شده در جدول باید از درونیایی خطی استفاده کرد.

۲. منظور از ساختمان برشی، ساختمانی است که در تمام طبقات، تغییر مکان جانبی نسبی کوچکتر از طبقه زیرین باشد.

ضریب  $C_1$  ضریب اصلاح جهت ارتباط دادن ماکزیمم تغییر مکانهای غیر خطی مورد انتظار با تغییر مکانهای بدست آمده از تحلیل‌های خطی بوده و از رابطه (۲-۸) محاسبه می‌شود. در این رابطه،  $R$  نسبت مقاومت مطابق رابطه (۲-۲۴) میباشد. در صورتی که  $R$  بزرگتر از  $R_{max}$  مطابق رابطه (۲-۲۵) باشد، استفاده از روش آنالیز استاتیکی غیرخطی مجاز نمی‌باشد.



$$R = \frac{S_a}{V_y/W} \cdot C_m \quad (24-2)$$

که در آن:

$S_a$ : شتاب طیفی در زمان تناوب موثر اصلی و میرایی سازه در راستای مورد نظر ;

$V_y$ : مقاومت جاری شدن بر اساس نمودار نیرو-تغییر مکان ایده آل شده بدست آمده از آنالیز استاتیکی غیر خطی;

$W$ : وزن لرزه ای موثر سازه ;

$C_m$ : ضریب جرم موثر در مد اول است که میتواند با استفاده از جدول (۲-۲) و یا از تحلیل دینامیکی بدست آید.

$C_2$ : اثرات کاهش سختی و مقاومت اعضای سازه ای را بر تغییر مکان ها به دلیل رفتار چرخشی آن ها وارد می کند و براساس بند ۲-۶-۱-۱ تعیین می شود.

برای ساختمانهایی با رفتار نرم شدگی (سختی پس جاری شدن منفی) بیشینه ضریب مقاومت،  $R_{max}$ ، میبایست با استفاده از رابطه (۲-۲۵) محاسبه گردد.

$$R_{max} = \frac{\Delta_d}{\Delta_y} + \frac{|\alpha_e|^{-h}}{4} \quad (25-2)$$

که در آن :

$\Delta_d$ : کمترین مقدار مابین تغییر مکان هدف،  $\delta_t$  و تغییر مکان در بیشینه برش پایه مطابق شکل (۲-۱) ;

$\Delta_y$ : تغییر مکان جاری شدن مطابق شکل (۲-۱) ;

$$h = 1 + 0.15 \ln T_e \quad (26-2)$$

$\alpha_e$ : شیب پس جاری شدگی موثر مطابق رابطه (۲-۲۷) ;

$$\alpha_e = \alpha_{p-\Delta} + \lambda(\alpha_2 - \alpha_{p-\Delta}) \quad (27-2)$$

که در آن:

$\alpha_2$ : ضریب شیب نرم شدگی مطابق شکل (۲-۱) ;



$\alpha_{P-\Delta}$ : ضریب شیب منفی بواسطه اعمال اثر  $P-\Delta$  بوده که برای بدست آوردن آن لازم است یک بار سازه با در نظر گرفتن اثرات  $P-\Delta$  تحلیل گردد و سپس مدل رفتار سه خطی ایده آل سازه ترسیم گردد. شیب  $\alpha_2$  در نمودار رفتاری ایده آل شده برابر  $\alpha_{P-\Delta}$  می‌باشد.

$\lambda$ : ضریب اثر حوزه نزدیک بوده که برای مناطق با لرزه خیزی بسیار زیاد و زیاد برابر  $0/8$  و برای مناطق با لرزه خیزی متوسط و کم برابر  $0/2$  می‌باشد.

#### ۲-۷-۱-۴ ب ساختمان با دیافراگم نیمه صلب

برای سازه‌هایی که دارای دیافراگم نیمه صلب هستند، تغییرمکان هدف باید با در نظر گرفتن سختی دیافراگم محاسبه شود. برای این منظور باید تغییرمکان نقاط مختلف بام با استفاده از تحلیل دینامیکی مدل سه بعدی سازه که در آن سختی دیافراگم نیز منظور شده تعیین شود. سپس تغییرمکان هدف مطابق بند (۲-۷-۱-۴ الف) برای سازه با دیافراگم صلب محاسبه شده و در نسبت حداکثر تغییرمکان هر نقطه ای از بام به تغییرمکان مرکز جرم بام ضرب شود. تغییرمکان هدف که به این ترتیب محاسبه می شود باید برای تمام قاب های سازه در نظر گرفته شده و به هر حال نباید از مقدار به دست آمده از رابطه (۲-۲۲) کوچکتر باشد.

#### ۲-۷-۱-۴ ج ساختمان با دیافراگم نرم

برای سازه‌هایی که دارای دیافراگم نرم می‌باشند، مقدار تغییرمکان هدف را میتوان برای هر یک از قابها به طور جداگانه برآورد نمود، در این حالت جرم مربوط به هر قاب باید بر اساس سطح بارگیر آن تعیین گردد. تغییرمکان هدف برای هر یک از قابها را باید مشابه تغییرمکان هدف ساختمانهای با دیافراگم صلب محاسبه نمود

#### ۲-۷-۱-۵- میراگرهای وابسته به تغییر مکان

مشخصات سختی میراگرها باید در مدل ریاضی در نظر گرفته شود.



### ۲-۷-۱-۶- میراگرهای وابسته به سرعت

شتاب طیفی باید به منظور احتساب میرایی اضافه شده توسط میراگرهای وابسته به سرعت کاهش داده شود. میرایی مؤثر باید طبق معادله (۲۸-۲) محاسبه شود.

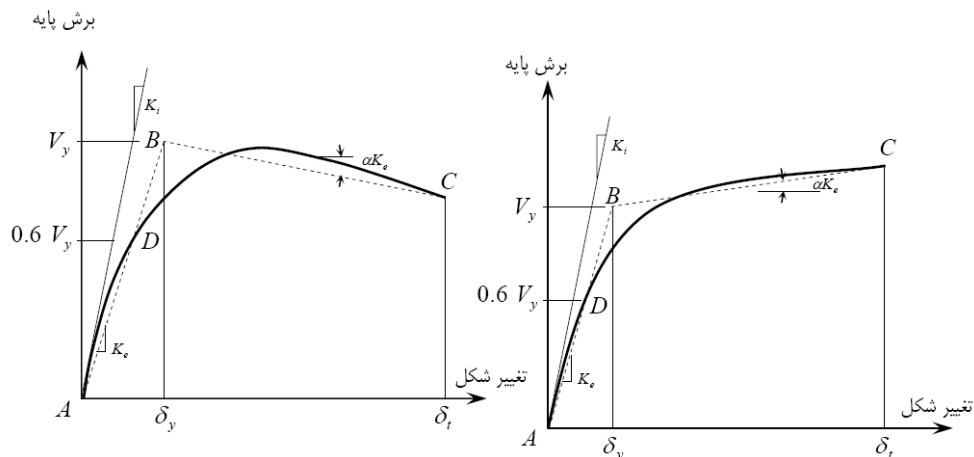
$$\beta_{\text{eff}} = \beta + \frac{\sum_j W_j}{4\pi W_K} \quad (28-2)$$

که در آن  $\beta$  میرایی قاب ساختمان است که باید مساوی ۵٪ گرفته شود مگر آنکه میرایی دیگری مورد نظر باشد،  $W_j$  کار انجام شده توسط وسیله-ز-ام در یک چرخه کامل به ازای تغییر مکان های  $\delta_j$  طبقات ساختمان است، و عمل جمع روی کل وسایل صورت می گیرد. همچنین،  $W_K$  حداکثر انرژی کرنشی قاب است که طبق معادله (۱۲-۲) محاسبه می شود.

کار انجام شده توسط وسیله-ز-ام در یک چرخه کامل بارگذاری باید براساس معادله (۲۹-۲) محاسبه شود.

$$W_j = \frac{2\pi^2}{T_{SS}} \delta_{rj}^2 C_j \quad (29-2)$$

که در آن  $T_{SS}$  زمان تناوب اصلی سکانتی ساختمان بهسازی شده است که در محاسبه آن سختی میراگرهای وابسته به سرعت در صورت وجود باید منظور شود. این زمان تناوب با استفاده از معادله (۲۳-۲) محاسبه می شود که در آن سختی مؤثر،  $K_e$ ، با سختی سکانتی،  $K_s$ ، در تغییر مکان هدف، همان گونه که در شکل (۲-۲) نشان داده شده، جایگزین می شود.  $C_j$  ثابت میرایی وسیله-ز-ام بوده و  $\delta_{rj}$ ، تغییر مکان نسبی بین دوانتهای وسیله-ز-ام در امتداد محور وسیله-ز-ام به ازای تغییر مکان بام در تغییر مکان هدف می باشد.

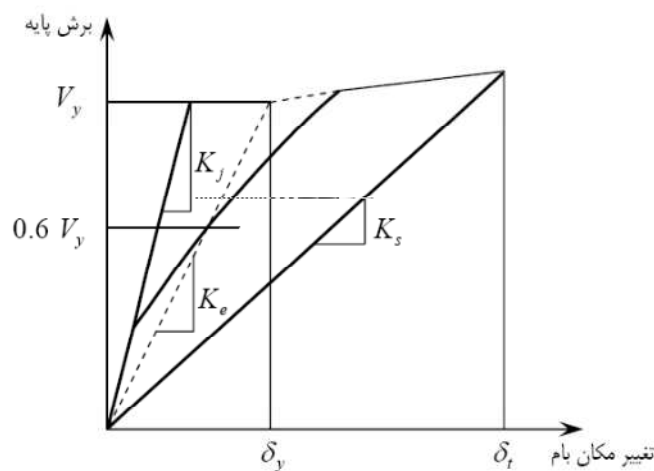


شکل (۲-۲) منحنی ساده شده نیرو-تغییر مکان



برای کنترل نیروهای اعضای کنترل شونده توسط تغییر مکان باید از تغییر شکل‌های ایجاد شده به ازای تغییر مکان هدف استفاده کرد. برای کنترل نیروهای اعضای کنترل شونده توسط نیرو باید نیروهای به دست آمده در سه حالت حدی زیر را مورد استفاده قرارداد:

تغییر مکان نسبی حداکثر، سرعت حداکثر و شتاب حداکثر. نیروهای حداکثر باید در طراحی استفاده شود و اثرات موده‌های بالاتر باید به طور دقیق ارزیابی شود.



شکل (۳-۲) منحنی نیرو-تغییر مکان خطی، معادل و غیرخطی

## ۲-۷-۲- روش دینامیکی غیرخطی

اگر روش دینامیکی غیرخطی طبق بند (۲-۶) انتخاب شود، از تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی به گونه‌ای که در بند (۲-۷-۲-۱) بیان شده است، به جز موارد یک‌گانه در این بند اصلاح می‌شود، باید استفاده کرد.

در مدل تحلیلی باید توزیع میراگرها، هم در پلان و هم در ارتفاع ساختمان بهسازی شده در نظر گرفته شود. اگر مشخصات میراگرها به فرکانس ارتعاش، دمای بهره‌برداری (شامل افزایش حرارت ناشی از ارتعاش)، تغییر شکل (یا کرنش)، سرعت بارهای وارده و دوجهته بودن بارها بستگی داشته باشد، این وابستگی باید با فرض مقادیر حدی کرانه بالا و پایین مشخصات مربوط برای یافتن حدود نتایج در تحلیل لحاظ شود. جزئیات مرتبط با تعیین معیارهای حدی کرانه بالا و پائین در بخش ۳-۴-۳ از تفسیر دستورالعمل ارائه شده است.





یکی از راه‌های لحاظ نمودن تغییرات در پاسخ نیرو- تغییر شکل میراگرها، انجام چند تحلیل برای ساختمان بهسازی شده با به کارگیری محدوده مشخصات پاسخ میراگرها می‌باشد. طراحی ساختمان بهسازی شده شامل میراگرها باید براساس پاسخ‌های حداکثر محاسبه شده ناشی از تحلیل‌های انجام شده باشد. نیروهای ویسکوز (در صورت وجود) که در سیستم قاب لرزه‌ای ایجاد می‌شود، باید در تحلیل و طراحی سیستم قاب لرزه‌ای لحاظ شود. ارزیابی تاریخچه نیروهای اعضا باید براساس تغییر مکان‌های گره‌ای (با انجام عملیات روی ماتریس‌های سختی اعضا) و سرعت‌های گره‌ای (با انجام عملیات روی ماتریس‌های میرایی اعضا) انجام شود.

راه حل دستیابی به پاسخ قابل قبول برای ساختمان بهسازی شده با استفاده از میراگرها، پاسخ ثابت میراگرها می‌باشد. باید نشان داده شود نیروها و تغییر شکل‌های میراگرها که در طی زلزله طرح ایجاد می‌شود، براساس مشخصات نمونه آزمایش شده براساس ضوابط بند (۲-۶) مجاز و کافی است.

## ۲-۸- ضوابط تفصیلی سیستم‌ها

### ۲-۸-۱- کلیات

سیستم اتلاف انرژی و سایر بخش‌های سیستم باربر جانبی باید با الزامات بیان شده در این بند سازگار باشند.

### ۲-۸-۲- دمای بهره‌برداری

در تحلیل یک ساختمان بهسازی شده باید تغییرات منحنی نیرو- تغییر مکان میراگرها ناشی از تغییر دمای محیط و افزایش دمای حاصل از ارتعاشات چرخه‌ای زلزله در نظر گرفته شود. باید با انجام تحلیل‌های متوالی محدوده پاسخ لرزه‌ای ساختمان هنگام زلزله طراحی مشخص شده و واکنش قابل قبول وسایل و نمونه‌های آزمایشی آن‌ها تعریف شود.

پاسخ نیرو- تغییر مکان میراگرها عموماً وابسته به دمای محیط و افزایش دمای حاصل از تحریک لرزه‌ای و چرخه‌ای می‌باشد.



### ۲-۸-۳- شرایط محیطی

علاوه بر در نظرگرفتن ضوابط مربوط به بارهای قائم و جانبی ناشی از باد و زلزله در طراحی میراگرها، سایر شرایط محیطی شامل اثرات عمر سازه، خزش، خستگی، دمای محیطی و قرارگرفتن در معرض رطوبت و مواد مضر را نیز باید به حساب آورد.

### ۲-۸-۴- نیروی باد

عمر خستگی میراگرها و اجزای آن‌ها شامل آب‌بندها در یک وسیله ویسکوز مایع، باید بررسی شده و نشان داده شود که حداقل به میزان عمر مفید طراحی وسایل می‌باشد. وسایلی که در معرض خرابی در اثر دامنه کم هستند، باید نیروهای باد را با رفتار ارتجاعی خطی تحمل نمایند.

### ۲-۸-۵- بازرسی و جایگزینی

امکان دسترسی برای بازرسی و جایگزینی میراگرها باید فراهم شود.

### ۲-۸-۶- کنترل کیفیت ساخت

برنامه‌ای برای کنترل کیفیت ساخت میراگرها باید توسط مهندس مسئول تهیه شود. این برنامه باید شامل توصیف روند ساخت وسایل، روش بازرسی و آزمایش‌های لازم برای تضمین کیفیت وسایل تولیدی باشد. در شرایط کاملاً محافظه کارانه، برنامه کنترل کیفیت که براساس آزمایش صورت می‌پذیرد باید سازگاری نتایج متفاوت حاصل از یک نمونه خاص تحت آزمایش را تأیید نماید. نتایج هر آزمایش در صورتی معتبر است که اطلاعات حاصله در محدوده مشخصات مورد پذیرش (که براساس نیازهای پروژه تعریف می‌شود) قرار گیرد. ضروری است محدوده مورد پذیرش مشخصات اسمی طراحی در انطباق با رواداری‌هایی باشد که متناسب با مشخصات اسمی طراحی و به صورت میانگین برای ابزارهای ائتلاف انرژی بیان می‌شود. این رواداری‌ها در صورتیکه بر روی متوسط مشخصات مجموعه‌ای از ابزارهای ائتلاف انرژی تعریف شود، به طور معمول بین



$\pm 10\%$  تا  $\pm 15\%$  در نظر گرفته می‌شود، ولی اگر یک ابزار خاص مورد توجه قرار گیرد، این رواداری‌ها تا  $\pm 20\%$  نیز افزایش خواهد یافت.

## ۲-۸-۷- نگهداری

مهندس مسئول باید برنامه زمان‌بندی نگهداری و آزمایش میراگرها را برای تضمین پاسخ قابل اعتماد وسایل در طول دوره عمر مفید طراحی آن‌ها تهیه نماید. میزان نگهداری و آزمایش‌های مربوط باید متناسب با مدت زمان طی شده از شروع به کار گیری وسایل باشد.

## ۲-۹-۹- بازیابی طرح

### ۲-۹-۱- کلیات

بازیابی طرح کلیه ساختمان‌های بهسازی شده‌ای که دارای میراگر هستند، به جز مواردی که توسط ضوابط این بند اصلاح شده است، باید مطابق با ضوابط بخش (۱-۷) انجام شود. بازیابی طراحی سیستم میراگر و برنامه‌های آزمایش‌های مربوطه باید توسط یک گروه مهندسی مستقل صورت گیرد. این گروه باید متشکل از افراد دارای تجربه در زمینه تحلیل لرزه‌ای و نظریه و کاربرد میراگرها باشد. موارد زیر در بازیابی طرح کنترل شود.

۱- طرح اولیه شامل تعیین ابعاد وسایل

۲- آزمایش نمونه‌ها طبق بند (۲-۱۰-۲)

۳- طرح نهایی ساختان بهسازی شده و انجام تحلیل‌های مربوط

۴- برنامه کنترل کیفیت تولید میراگرها



## ۲-۱۰ آزمایش‌های لازم برای میراگرها

### ۲-۱۰-۱ کلیات

روابط نیرو- تغییر مکان و مقادیر میرایی فرض شده در طراحی میراگرها باید توسط آزمایش‌های تشریح شده در این بند قبل از تولید وسایل به منظور نصب در ساختمان تأیید شود. اگر آزمایش‌های تجویز شده در این بند قبل از مرحله‌ی طراحی پروژه انجام گیرند، باید نتایج آن را در طراحی به کاربرد.

آزمایش‌های مشخص شده در این بند باید به این منظور انجام شود که:

۱- منحنی نیرو- تغییر مکان فرض شده برای میراگرها در طراحی را تأیید نماید.

۲- توانایی هر یک از وسایل را در تحمل ارتعاشات شدید ناشی از زلزله نشان دهد.

این آزمایش‌ها را نباید جایگزین برنامه‌ی کنترل کیفیت ساخت وسایل طبق بند (۲-۳-۶-۶) نمود.

مهندس مسئول باید معیارهای پذیرش مشخصی را برای مقادیر سختی و میرایی موثر حاصل از آزمایش نمونه‌ها تهیه نماید. این معیارها باید منعکس کننده مقادیر مفروض در طرحی بوده و تغییرات احتمالی در خواص مصالح را لحاظ نماید و مقادیر حدی عملکرد را که در صورت تجاوز از آن، وسایل مربوطه مردود اعلام می‌شوند، مشخص کند.

مهندس مسئول باید معیارهای پذیرش مشخصی را برای مقادیر سختی و میرایی موثر حاصل از آزمایش نمونه‌های تولید طبق بند (۲-۸-۶) تهیه نماید. نتایج آزمایش نمونه‌ها باید مبنای معیارهای پذیرش مربوط به آزمایش نمونه‌های تولیدی قرار گیرد مگر اینکه مبنای جایگزینی توسط مهندس مسئول در مشخصات فنی طرح قید شود. در این معیارهای پذیرش، باید تأثیر تاریخچه بارگذاری روی پاسخ هر یک از وسایل با مقرر داشتن انجام آزمایش روی وسایل تولید، قبل از آزمایش نمونه‌ها در نظر گرفته شود.

روش‌های ساخت و کنترل کیفیت به کار گرفته شده برای کلیه وسایل تولید شده و نمونه‌های آن‌ها باید یکسان باشد. این روش‌ها باید توسط مهندس مسئول پیش از ساخت نمونه‌های وسایل تصویب شود.



## ۲-۱۰-۲- آزمایش نمونه‌ها

### ۲-۱۰-۲-۱- کلیات

آزمایش‌های زیر روی نمونه‌ها باید به طور جداگانه روی دو وسیله در ابعاد واقعی از هر نوع و اندازه‌ای که در طرح به کار رفته انجام گیرد. به شرط تأیید مهندس مسئول، برگزیدن نمونه‌هایی با ابعاد و اندازه‌هایی که نماینده‌ی ابعاد و اندازه‌ی هر نوع از وسایل است برای انجام آزمایش روی نمونه‌ها مجاز می‌باشد. این کار می‌تواند جایگزین انجام آزمایش روی وسایلی از هر نوع و اندازه شود، به این شرط که روش‌های ساخت و کنترل کیفیت برای وسایلی از هر نوع و اندازه که در ساختمان بهسازی شده به کار رفته، یکسان باشد. نمونه آزمایش شده را نباید در ساختمان به کار برد مگر اینکه توسط مهندس مسئول به طور کتبی تأیید شود.

### ۲-۱۰-۲-۲- ثبت داده‌ها

روابط نیرو- تغییر مکان در هر چرخه از هر آزمایش باید به صورت الکترونیکی ثبت شود.

### ۲-۱۰-۲-۳- دوره و چرخه‌های آزمایش

آزمایش‌های ذکر شده در زیر حداقل تعداد لازم بوده که در آن‌ها هر میراگر باید به منظور شبیه‌سازی بارهای ثقیل وارد بر وسیله، در هنگامی که در ساختمان نصب شده است، و حداکثر درجه حرارت محیطی مورد انتظار، بارگذاری شود.

۱- تعداد چرخه‌های بارگذاری باید به اندازه‌ای باشد که در هنگام وقوع بار باد طرح در طول عمر سازه،

مورد انتظار است، اما کمتر از ۲۰۰۰ چرخه رفت و برگشتی کامل بار (در مورد وسایل وابسته به

تغییر مکان و ویسکو-الاستیک) یا تغییر مکان (در مورد وسایل ویسکوز) تحت دامنه مورد انتظار در

بار باد طراحی، تحت فرکانسی برابر با عکس دوره تناوب اصلی ساختمان بهسازی شده، نباشد.

تبصره: وسایلی که در معرض نیروها و جابجایی‌های ناشی از باد قرار نمی‌گیرند، لازم نیست تحت این

آزمایش‌ها قرار گیرند.



۲- هر وسیله باید تحت ۲۰ چرخه رفت و برگشتی کامل تغییر مکانی برابر با تغییر مکان میراگرها در زلزله سطح خطر-۲ و تحت فرکانسی برابر با عکس دوره تناوب اصلی ساختمان بهسازی شده قرارداداده شود.

تبصره: انجام آزمایش روی وسایل میراگرها به روش‌هایی به جز آنچه در بالا ذکر شده با حفظ شرایط زیر مجاز می‌باشد:

۱- معادل بودن روش پیشنهادی با روش آزمایش چرخه‌ای نشان داده شود.

۲- روش پیشنهادی وابستگی پاسخ میراگرها را به دمای محیط، فرکانس بارگذاری و افزایش درجه حرارت در حین آزمایش را در برگیرد.

۳- روش پیشنهادی توسط مهندس مسئول تأیید شود.

ترتیب و دوره‌های آزمایش میراگرها نباید جزئی از سیستم مقاوم ثقلی را تشکیل دهند، اما ممکن است احتیاج باشد مقداری از بار ثقلی را تحمل نمایند.

۲-۱۰-۲-۴- میراگرهای وابسته به سرعت و یا فرکانس ارتعاش

اگر مشخصات نیرو- تغییرشکل میراگرها در هر تغییر مکانی کوچک‌تر یا مساوی تغییر مکان کل طرح، با تغییر در محدوده فرکانس آزمایش از  $0.5f_1$  تا  $2f_1$ ، بیش از ۱۵٪ تغییر نماید، آزمایش‌های ذکر شده در بند قبل باید به ازای فرکانس‌هایی برابر با  $0.5f_1$  و  $2f_1$  صورت پذیرد.

اگر نمونه‌هایی با مقیاس کاهش یافته برای تعیین کمیت خواص وابسته به نرخ بارگذاری میراگرها استفاده شود، این نمونه‌ها بایداز همان نوع و مصالح و همچنین تولید شده با همان روند تولید و روش کنترل کیفیتی باشند که در مورد نمونه‌های با مقیاس واقعی بکار رفته‌است، همچنین باید تحت فرکانس مقیاس شده‌ای آزمایش شوند که نماینده نرخ بارگذاری نمونه با اندازه واقعی باشد.



#### ۲-۱۰-۲-۵- میراگرهای در معرض تغییر مکان خارج از صفحه

اگر میراگرها (وابسته به سرعت و وابسته به جابجایی) تحت اثر تغییر شکل دوجته قرار داشته باشد، آزمایش‌هایی که قبلاً گفته شد باید هم در تغییر مکان دوجته برابر با صفر و هم در تغییر مکان جانبی حداکثری تحت زلزله سطح خطر ۲- انجام گیرد.

**تبصره:** اگر نمونه‌های با مقیاس کاهش یافته برای تعیین کمی خواص میراگرها در تغییر مکان دوجته به کار گرفته شوند، این نمونه‌ها باید از همان نوع و مصالح و همچنین روش تولید و کنترل کیفیتی باشند که در نمونه‌های با مقیاس واقعی به کار رفته و در تغییر مکان‌های مقیاس شده‌ای آزمایش شوند که معرف تغییر مکان‌های نمونه اصلی باشد.

#### ۲-۱۰-۲-۶- آزمایش وسایل مشابه

میراگرها که اولاً دارای اندازه و مصالح مشابه، و ساختار داخلی، فشارهای داخلی استاتیکی و دینامیکی (در صورت وجود) یکسان بوده و ثانیاً تحت روند تولید و روش کنترل کیفیت یکسانی ساخته شده و قبلاً توسط آزمایشگاه مستقلی تحت سلسله مراتب ذکر شده در بالا آزمایش شده باشند، در صورت وجود شرایط زیر نیازی به آزمایش ندارند.

۱- کلیه اطلاعات آزمایش‌های مربوطه در دسترس مهندس مسئول قرار داده شده و توسط وی تأیید شوند.

۲- سازنده بتواند مشابهت وسایل آزمایش شده قبلی را با وسایل مورد نظر فعلی برای مهندس مسئول اثبات نماید.

۳- استفاده از اطلاعات مربوط به آزمایش‌های قبلی به صورت کتبی توسط مهندس مسئول تأیید شود.

#### ۲-۱۰-۳- تعیین مشخصات منحنی نیرو- تغییر مکان

مشخصات نیرو- تغییر مکان یک میراگر باید براساس آزمایش‌های چرخه‌ای بار و تغییر مکان وسایل نمونه ذکر شده در بند (۲-۱۰-۲) باشد.



چنان که قبلاً نیز عنوان شد، سختی موثر ( $K_{eff}$ ) یک میراگر دارای سختی، باید در هر چرخه تغییر شکل، طبق معادله‌ی (۲-۲) محاسبه شود.

$$K_{eff} = \frac{|F^-| + |F^+|}{|\Delta^+| + |\Delta^-|} \quad (۲-۲ \text{ تکرار})$$

که در آن نیروهای  $F^+$  و  $F^-$  باید به ترتیب در تغییر مکان‌های  $\Delta^+$  و  $\Delta^-$  محاسبه شوند. سختی موثر یک میراگر باید به ازای تغییر مکان‌هایی در آزمایش تعیین شود که در بند (۲-۱۰-۳) شرح داده شده است. میرایی ویسکوز معادل برای یک میراگر ( $\beta_{eff}$ ) دارای سختی، باید برای هر چرخه از تغییر شکل طبق معادله (۳۱-۲) محاسبه شود:

$$\beta_{eff} = \frac{1}{2\pi} \frac{W_D}{k_{eff} \Delta_{ave}^2} \quad (۳۱-۲)$$

که در آن  $K_{eff}$  طبق معادله (۲-۲) تعیین می‌شود و  $W_D$  سطح محصور شده توسط یک چرخه کامل منحنی نیرو- تغییر مکان در یک میراگرها، به ازای تغییر مکان نمونه آزمایشی به میزان  $\Delta_{ave}$  (میانگین مقادیر مطلق تغییر مکان‌های  $\Delta^+$  و  $\Delta^-$ ) است.

## ۲-۱۰-۴- کفایت سیستم

اگر کلیه‌ی شرایط زیر برآورد شوند، عملکرد یک وسیله نمونه آزمایشی اولیه را می‌توان مناسب دانست:

۱- منحنی نیرو- تغییر مکان در آزمایش‌های بند (۲-۱۰-۳) دارای ظرفیت حمل بار، با نمو غیرمنفی باشند.

**تبصره:** میراگرهایی که رفتاری وابسته به سرعت دارند، لازم نیست از ضابطه بالا پیروی نمایند.

۲- در هر آزمایش از آزمایش‌های بند (۲-۱۰-۳)، سختی موثر،  $K_{eff}$ ، یک میراگر نمونه آزمایشی در هر چرخه، به میزانی بیش از  $\pm 15\%$  نسبت به سختی موثر میانگین محاسبه شده روی کلیه چرخه‌های آن آزمایش تغییر نکند.

**تبصره:** حد  $15\%$  توسط مهندس مسئول در مشخصات فنی طرح قابل افزایش است، به این شرط که در تحلیل نشان داده شود که این حد افزایش یافته، اثر حذف کننده‌ای روی پاسخ ساختمان بهسازی شده ندارد.





میراگرهای ویسکوز مایع و سایر وسایلی که دارای سختی موثر نیستند، لازم نیست که از این ضابطه پیروی نمایند.

۳- در هر یک از آزمایش‌های بند (۲-۱۰-۲-۳) حداکثر نیرو و حداقل نیرو در تغییر مکان صفر در یک نمونه آزمایشی در هر چرخه، به میزانی بیش از  $\pm 15\%$  نسبت به نیروهای میانگین حداکثر و حداقلی که روی کلیه سیکل‌های آن آزمایش محاسبه شده تغییر ننماید.

تبصره: حد  $15\%$  توسط مهندس مسئول در مشخصات فنی طرح قابل افزایش است. به این شرط که توسط تحلیل نشان داده شود که این حد افزایش یافته اثر حذف کننده‌ای روی پاسخ ساختمان بهسازی شده ندارد.

۴- در هر یک از آزمایش‌های بند (۲-۱۰-۲-۳)، سطح سیکل ( $W_D$ ) یک نمونه آزمایشی در هر چرخه، به میزانی بیش از  $\pm 15\%$  نسبت به مساحت زیر منحنی چرخه متوسط محاسبه شده روی کلیه چرخه‌های آن آزمایش تغییر ننماید.

تبصره: حد  $15\%$  توسط مهندس مسئول در مشخصات فنی طرح قابل افزایش است. به این شرط که توسط تحلیل نشان داده شود که این حد افزایش یافته، اثر حذف کننده‌ای روی پاسخ ساختمان بهسازی شده ندارد.

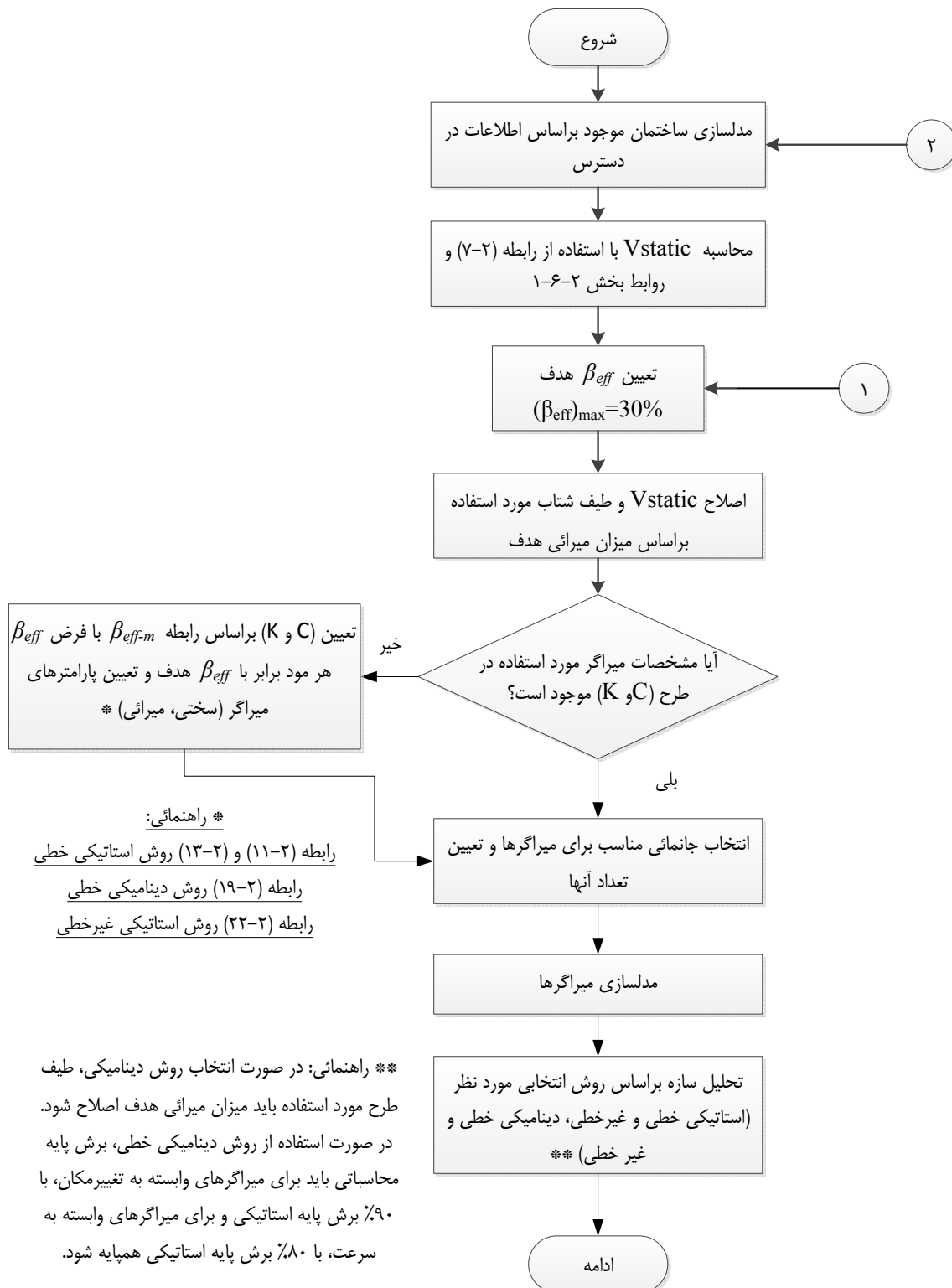
۵- در مورد وسایل وابسته به تغییر مکان، سختی موثر میانگین، میانگین حداکثر و حداقل نیرو در تغییر مکان صفر و میانگین سطح چرخه ( $W_D$ ) که برای هر یک از سلسله آزمایش‌های توصیف شده در بند (۲-۱۰-۳-۲) محاسبه شده، باید بین حدود تعیین شده توسط مهندس مسئول در مشخصات فنی طرح قرار گیرد. سطح چرخه در انتهای آزمایش چرخه‌ای، نباید به میزانی بیش از به علاوه و منهای  $15\%$  نسبت به سطح میانگین  $20$  چرخه‌ی آزمایش تفاوت داشته باشد.

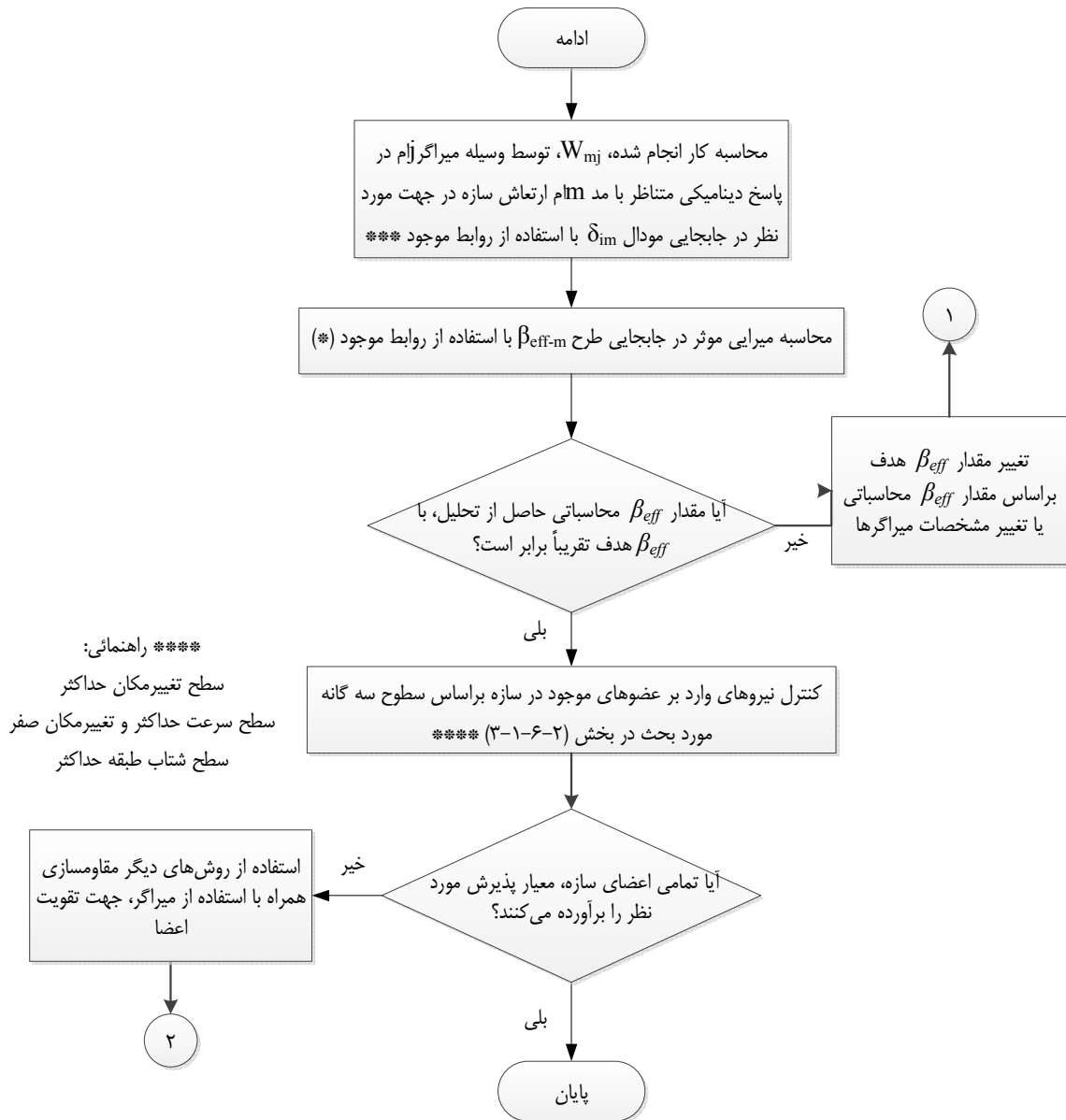
۶- در مورد وسایل وابسته به سرعت، نیروی میانگین حداکثر و حداقل در تغییر مکان صفر، سختی موثر (فقط در مورد وسایل ویسکو-الاستیک) و میانگین سطح چرخه ( $W_D$ ) که برای هر یک از سلسله آزمایش‌های ذکر شده در بند (۲-۱۰-۲-۳) محاسبه شده، باید بین حدود تعیین شده توسط مهندس مسئول در مشخصات فنی طرح قرار گیرد.



## ۱۱-۲ فلوجارت مقاوم‌سازی ساختمان‌ها با استفاده از میراگر

به منظور تفهیم هرچه بهتر مطالب ارائه‌شده در این فصل، روند بهره‌گیری از میراگرها در مقاوم‌سازی ساختمان‌های موجود، در قالب فلوجارت زیر بیان شده‌است.





## فصل سوم

### راهنما و تفسیر

#### ۳-۱ ضوابط عمومی

اجزاء و قطعات ساختمانی باید برای نیرو و تغییرشکل محاسباتی کنترل شده و ضوابط حدی مقاومت و تغییرشکل را برآورده نمایند. این مسئله در سازه‌های دارای ابزارهای اتلاف انرژی نیز صادق است. در این دسته از سازه‌ها، اجزائی که در ترکیب با ابزارهای اتلاف انرژی قرار می‌گیرند، باعث ایجاد قاب نگه‌دارنده ابزارهای اتلاف انرژی<sup>۱</sup> و نقاط اتصال<sup>۲</sup> خواهند شد که نمونه‌ای از این موارد در شکل (۳-۱) ارائه شده‌اند.

اصلی‌ترین دلیل استفاده از ابزارهای اتلاف انرژی در قاب‌های ساختمانی کاهش تغییرمکان و خرابی در قاب است که این کاهش، با افزایش میزان سختی قاب و یا افزودن میرایی (قدرت استهلاک انرژی) به آن میسر می‌شود. از جمله ابزارهای اتلاف انرژی که دارای مشخصات سختی و میرایی به طور همزمان هستند، می‌توان به میراگرهای تسلیم فلزی، اصطکاکی و ویسکو-الاستیک اشاره نمود. در طرف دیگر، میراگرهای ویسکوز که اغلب دارای مشخصه‌های میرایی بوده و از سختی قابل توجهی برخوردار نیستند نیز، توان قابل توجهی در بالابردن قدرت استهلاک انرژی قاب خواهند داشت. در شکل (۳-۲) به طور شماتیک تاثیر هر یک از انواع میراگرها بر پاسخ نیرو-تغییرمکان یک ساختمان نشان داده شده‌است. آنچه از شکل (۳-۲) بر

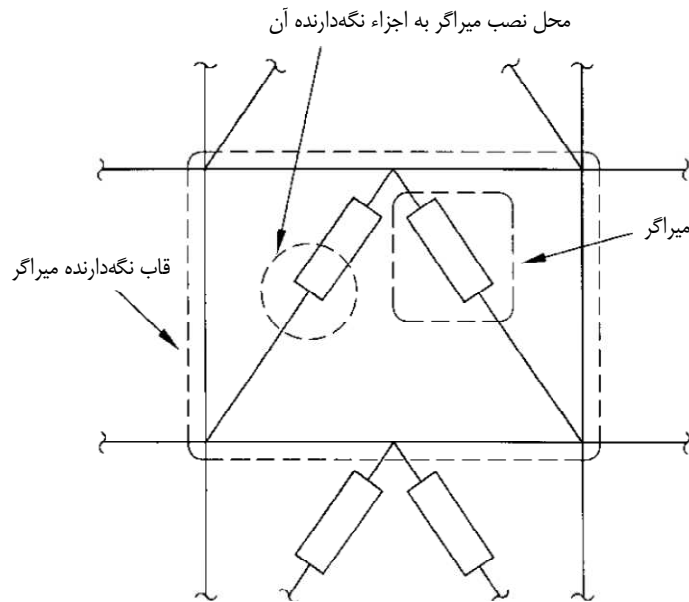
---

<sup>۱</sup> Support framing for energy dissipation devices

<sup>۲</sup> Points of attachments

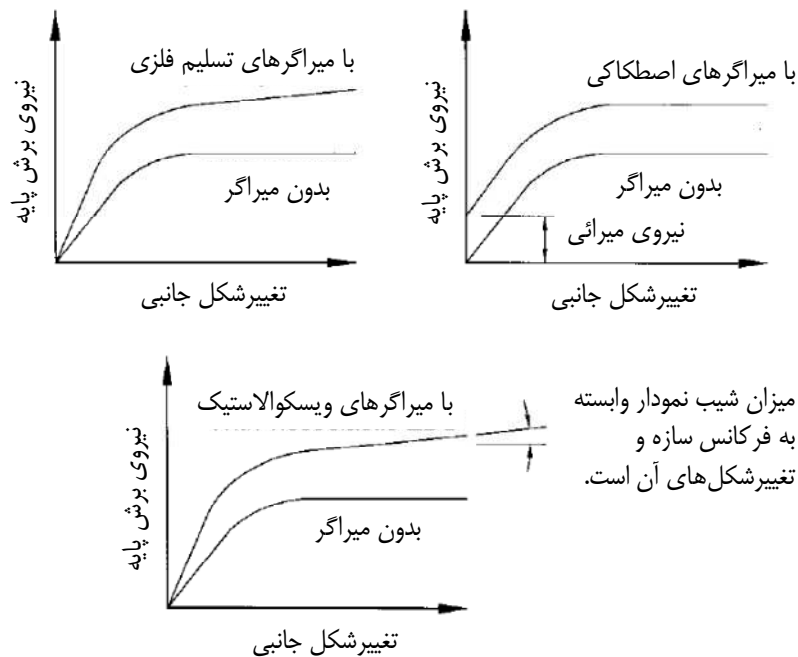


می آید مویید این مطلب است که افزودن میراگرهای ویسکوز، رابطه نیرو-تغییرمکان را تغییر نمی‌دهد به عبارت دیگر، منحنی پاسخ برای شرایط با و بدون میراگر از نظر کلی مشابه است.



شکل (۱-۳) اجزای در ترکیب با ابزارهای اتلاف انرژی

رابطه نیرو-تغییرمکان برای انواع مختلف میراگرها ممکن است به شرایط محیطی (شامل باد، خستگی و دمای بهره‌برداری) و همچنین به شدت بار زلزله، تغییرشکل‌های ماندگار و تغییرشکل‌های دو جهته وابسته باشد. این وابستگی‌ها باید با توجه به مقادیر حدی، که مرتبط با مشخصات مصالح به کار رفته در میراگر است، در تحلیل و طراحی لرزه‌ای مدل در نظر گرفته شود. در نظر گرفتن سختی میراگرها و تکیه‌گاه‌های نگه‌دارنده آنها در مدل ریاضی از اهمیت بالایی برخوردار است. به نحوی که اگر از سختی تکیه‌گاه نگه‌دارنده میراگر صرف نظر شود، ممکن است سختی جانبی ساختمان دست پائین تخمین زده شده و در نهایت، تغییرمکان هدف به صورت دست بالا محاسبه شود. در مقابل، اگر میراگر روی یک تکیه‌گاه نگه‌دارنده انعطاف‌پذیر قرار گرفته باشد و این میراگر به صورت صلب مدل شود، میزان تاثیر میراگر در رفتار پاسخ دست بالا بوده و به نتایج غیرمحافظة کارانه منجر خواهد شد.

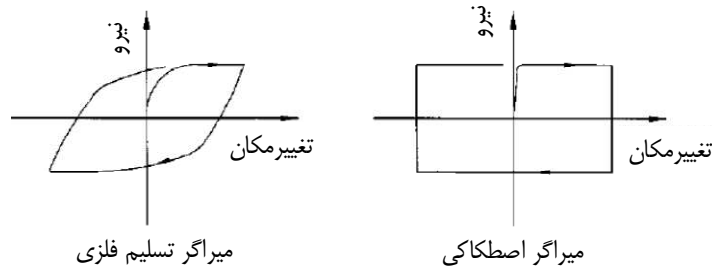


شکل (۳-۲) تاثیر انواع میراگرها بر پاسخ نیرو-تغییر مکان سازه

به کارگیری ابزارهای اتلاف انرژی در ساختمانها، ضمن اینکه باید توجیه علمی و فنی داشته باشد، باید به طور دقیق مورد ارزیابی قرار گرفته و میزان تاثیر حضور این ابزارها در رفتار ساختمان بررسی شده باشد. به همین دلیل، لازم است در ابتدا نسبت به انجام یک تحلیل یا طرح اولیه از ساختمان در شرایط تجهیز با ابزارهای اتلاف انرژی اقدام شود. این تحلیل، با توجه به نوع رفتار ابزارهای اتلاف انرژی و نیاز ساختمان از حیث طراحی یا بهسازی، می تواند به روشهای خطی و غیرخطی (تحلیل طیف پاسخ و یا تاریخچه زمانی) انجام شود.

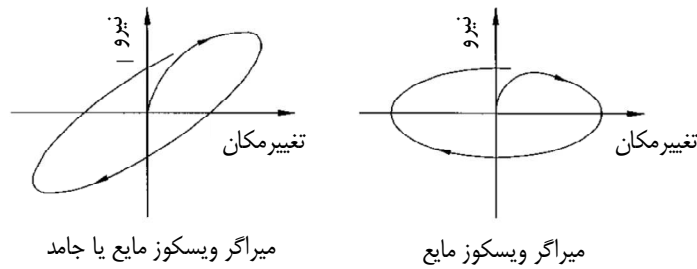
### ۳-۲ مدل سازی میراگرها

میراگرها را می توان به سه دسته میراگرهای وابسته به تغییر مکان، میراگرهای وابسته به سرعت، و سایر میراگرها تقسیم نمود. میراگرهای Metallic-yielding و میراگرهای اصطکاکی در رده میراگرهای وابسته به تغییر مکان قرار می گیرند. در شکل (۳-۳) نمایی از رابطه نیرو-تغییر مکان برای این میراگرها ارائه شده است.



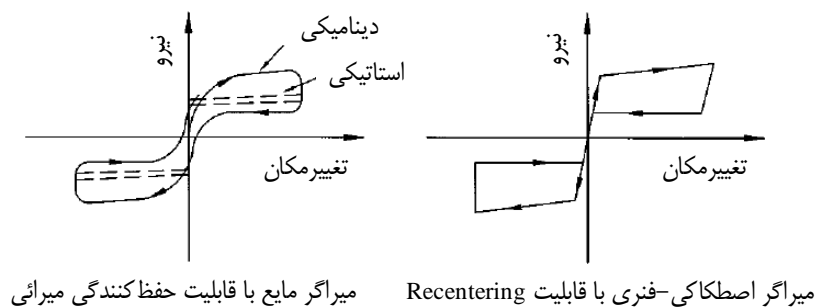
شکل (۳-۳) نمودار چرخه‌ای ایده‌آل بار-تغییر مکان برای میراگرهای وابسته به تغییر مکان

میراگرهای ویسکوالاستیک جامد و میراگرهای ویسکوز که با فشار سیال در یک پیستون کار می‌کنند را می‌توان در رده میراگرهای وابسته به سرعت دسته‌بندی کرد. در شکل (۳-۴) نمودار ایده‌آلی از پاسخ چرخه‌ای بار-تغییر مکان این میراگرها ارائه شده‌است.



شکل (۳-۴) نمودار چرخه‌ای ایده‌آل بار-تغییر مکان برای میراگرهای وابسته به سرعت

سایر میراگرها دارای مشخصه‌هایی هستند که نمی‌توان آنها را در رده میراگرهای ذکر شده در شکل‌های (۳-۳) و (۳-۴) دانست. از این نمونه می‌توان به میراگرهای shape-memory alloy، friction-spring، assemblies with recentering capability، و fluid resorting force-damping devices اشاره نمود. در شکل (۳-۵) نمایی از رفتار بار-تغییر مکان این میراگرها ارائه شده‌است.



شکل (۳-۵) نمودار چرخه‌ای ایده‌آل بار-تغییر مکان برای میراگرهای دارای قابلیت Recentering





لازم به ذکر است که میراگرهای shape-memory alloy می‌توانند با اعمال تغییرات ساختاری، منحنی‌های پاسخ چرخه‌ای مشابه آنچه در شکل (۳-۳) ارائه شده است را از خود نشان دهند.

### ۱-۲-۳ میراگرهای وابسته به تغییر مکان

میراگرهای وابسته به تغییر مکان رفتار چرخه‌ای دو یا سه خطی، به صورت الاستوپلاستیک و یا rigid-plastic (اصطکاک) خواهند داشت.

### ۲-۲-۳ میراگرهای وابسته به سرعت

#### الف) میراگرهای جامد ویسکوالاستیک

این میراگرها عموماً از لایه‌های ویسکوالاستیک پلیمری ساخته شده‌اند. این میراگرها رفتار ویسکوالاستیک جامد از خود نشان می‌دهند که دارای مشخصات دینامیکی وابسته به فرکانس بار لرزه‌ای، دما و شدت دامنه حرکت است. رابطه ساده بین نیرو و تغییر مکان برای این میراگرها، تحت بارگذاری سینوسی با فرکانس چرخه‌ای  $\omega$  در شکل (۳-۶) نشان داده شده است. در این سیستم، نیرو از رابطه زیر حاصل خواهد شد:

$$F = k_{eff} D + C\dot{D} \quad (۱-۳)$$

و سختی موثر در این میراگر از رابطه زیر بدست خواهد آمد:

$$k_{eff} = \frac{|F^+| + |F^-|}{|D^+| + |D^-|} \quad (۲-۳)$$

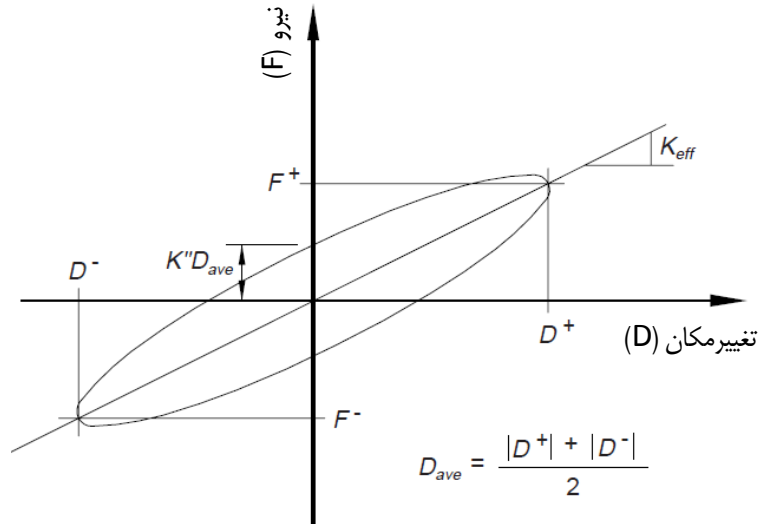
و همچنین، ضریب میرایی میراگر از رابطه زیر بدست خواهد آمد:

$$C = \frac{W_D}{\pi\omega D_{ave}^2} \quad (۳-۳)$$

که در آن،  $D_{ave}$  مقدار متوسط قدر مطلق مقادیر  $D^+$  و  $D^-$  است،  $W_D$  سطح زیر منحنی یک چرخه بارگذاری (از  $D^+$  تا  $D^-$ ) است. سختی موثر، همچنین به عنوان سختی برشی ذخیره شده نیز شناخته می‌شود. ضریب میرایی نیز می‌تواند براساس میزان افت سختی یا  $K''$  به صورت زیر معرفی شود:



$$C = \frac{K''}{\omega} \quad (۳-۴)$$

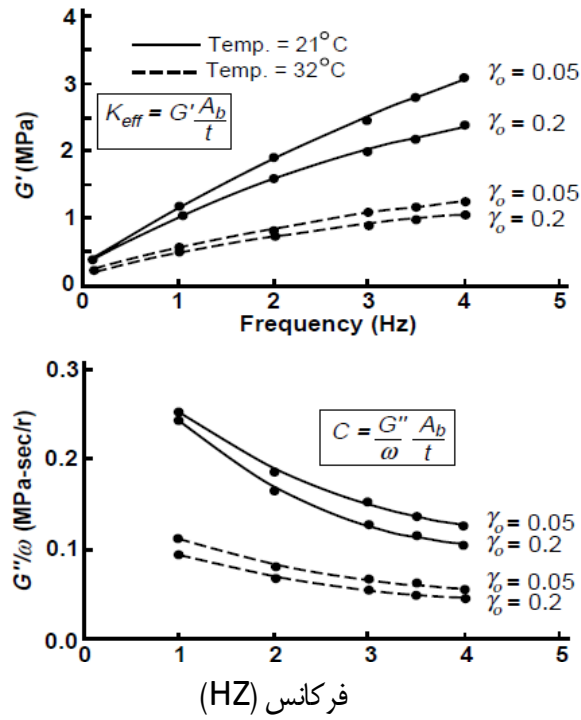


شکل (۳-۶) رابطه ایده‌آل بار-تغییر مکان برای میراگر Viscoelastic solid

سختی و میرایی موثر معمولاً به فرکانس، دما و شدت حرکت وابسته‌اند. در شکل (۳-۷) مقادیر نرمال شده از این پارامتر براساس پارامترهای دیگر، براساس مطالعات آزمایشگاهی روی یک پلیمر ویسکوالاستیک نشان داده شده‌است. لازم به توجه است که وابستگی پلیمرهای ویسکوالاستیک به دما و فرکانس به عنوان تابعی از مشخصات ترکیبی پلیمر شناخته می‌شود. نتایجی که در شکل (۳-۷) نشان داده شده‌است بیانگر ویژگی تمام میراگرهای ویسکوالاستیک جامد نیست. مقادیر نرمال شده در این نمودار، شامل  $G'$  برابر با مدول برشی و  $G''$  افت مدول برشی است.

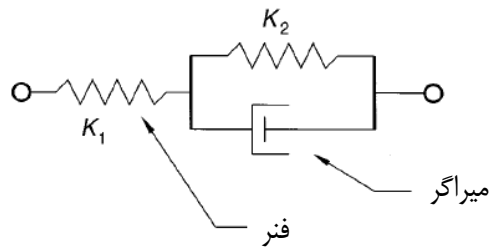
رفتار ویسکوالاستیک جامد می‌تواند با استفاده از مدل‌های پیشرفته ویسکوالاستیسیته، در محدوده وسیعی از فرکانسها مدل شود. مدل‌های ساده‌تر قادر به مدنظر قرار دادن رفتار در محدوده‌های مشخصی از فرکانس هستند. به عنوان مثال، یک مدل استاندارد خطی در دمای ۲۱ درجه در شکل (۳-۸) نشان داده شده‌است. نتایج این مدل که بر اساس مقادیر  $G_1=5.18$  MPa و  $G_2=0.48$  MPa و  $\eta_2=0.31$  MPa-sec/rad استخراج شده‌اند، در شکل (۳-۹) ارائه شده‌است. در این نتایج:

$$G_1 = \frac{K_1 t}{A_b}, \quad G_2 = \frac{K_2 t}{A_b}, \quad \eta_2 = \frac{C_2 t}{A_b} \quad (۳-۵)$$

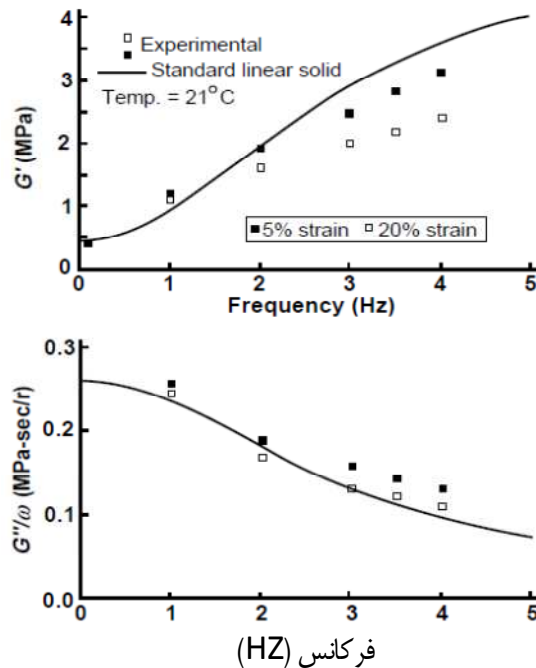


شکل (۷-۳) سختی موثر نرمال شده ( $G'$ ) و ضریب میرایی ( $G''/\omega$ ) برای میراگر ویسکوالاستیک جامد

در این رابطه همچنین،  $K_1$ ،  $K_2$  و  $C_2$  برابر با ثابتهای فنر و میراگر برای مدل خطی هستند،  $A_b$  ناحیه تماسی میراگر و  $t$  ضخامت مصالح ویسکوالاستیک در میراگر است.



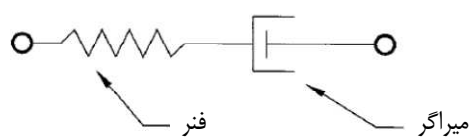
شکل (۸-۳) مدل ویسکوالاستیک برای میراگر



شکل (۳-۹) مشخصات میراگر Viscoelastic جامد تخمین زده شده براساس مدل خطی

### ب) میراگرهای دارای سیال ویسکوالاستیک

میراگرهای با سیال ویسکوالاستیک که با ایجاد برش در سیال ویسکوالاستیک کار می‌کنند، رفتاری از خود نشان می‌دهند که مشابه میراگرهای ویسکوالاستیک جامد است، به جز آنکه در این میراگرها سختی موثر تحت بارهای استاتیکی برابر با صفر است. میراگرهای دارای سیال ویسکوالاستیک و میراگرهای ویسکوالاستیک جامد، براساس نسبت میزان افت سختی به سختی موثر، در شرایطی که فرکانس بارگذاری به صفر نزدیک می‌شود، قابل تشخیص خواهند بود. این نسبت در میراگرهای با سیال ویسکوالاستیک به بینهایت و در میراگرهای ویسکوالاستیک جامد به صفر میل خواهد کرد. رفتار این میراگرها را می‌توان با مدل‌های پیشرفته ویسکوالاستیک مدل کرد. هرچند، این مدل‌ها در بسیاری از موارد با مدل ماکسول، که در شکل (۳-۱۰) نشان داده شده است قابل مدلسازی است.



شکل (۳-۱۰) مدل ماکسول برای میراگرهای دارای سیال ویسکوالاستیک



### ج) میراگرهای با سیال ویسکوز

رفتار ویسکوز خالص می‌تواند با اعمال فشار روی یک سیال درون پیستون ایجاد شود. میراگرهای دارای سیال ویسکوز مقداری سختی در مقادیر فرکانس بالای بارگذاری چرخه‌ای از خود نشان می‌دهند. میراگرهای دارای سیال ویسکوز خطی، که سختی‌ای در محدود فرکانس  $0.5f_1$  تا  $2.0f_1$  از خود نشان می‌دهند، باید به عنوان میراگرهای با سیال ویسکوز مدل شوند که در آنها،  $f_1$  فرکانس اصلی ساختمان خواهد بود. محدوده فرکانس  $0.5f_1$  تا  $2.0f_1$  به نحوی تعریف می‌شود که در آن،  $0.5f_1$  به عنوان حد پائین و برابر با کاهش یک-چهارمی در سختی جانبی شناخته می‌شود. این کاهش همانند یک حد بالا ناشی از ظرفیتهای تغییرشکلی مرتبط با ساختار فعلی خواهد بود. حد  $2.0f_1$  نیز به عنوان حد بالا و بیانگر این مسئله است که مولفه‌ها و اجزاء ساختمانی که در مدل ریاضی وارد نشده‌اند، دارای سختی‌هایی خواهند بود که سختی کلی بیشتر از  $f_1$  ایجاد خواهند کرد.

در صورت عدم وجود سختی در بازه  $0.5f_1$  تا  $2.0f_1$ ، نیروی  $F$  در میراگر دارای سیال ویسکوز می‌تواند از رابطه زیر محاسبه شود:

$$F = C_0 |\dot{D}|^\alpha \operatorname{sgn}(\dot{D}) \quad (۳-۶)$$

فرم ساده‌سازی شده از میراگر با سیال ویسکوز، میراگر با سیال خطی است که در آن، مقدار توان  $\alpha$  (توان میرائی) برابر با  $1/0$  خواهد بود. مقدار متداول برای این توان بین  $0/5$  تا  $۲/0$  تعریف می‌شود و جزئیات محاسباتی آن در بخش ۳-۳-۲-۴ مورد توجه قرار می‌گیرد.

### ۳-۲-۳ سایر میراگرها

سایر میراگرها، همانند میراگرهایی که رفتار آنها در شکل (۳-۵) نمایش داده شده‌اند، نیازمند مدلسازی‌هایی متفاوت از روشهای اشاره شده هستند. این مدلسازی‌ها را می‌توان در مراجع مرتبط یافت.



### ۳-۳ طراحی ساختمان‌های جدید با استفاده از میراگرها

به طور کلی، در سازه‌هایی که استفاده از ابزارهای اتلاف انرژی مورد توجه قرار می‌گیرد، تامین یک سیستم مقاوم در برابر زلزله که توان فراهم آوردن یک مسیر انتقال بار کامل را داشته باشد، ضروری است. این سیستم باربر جانبی باید بر اساس ویژگیهای ساختمان و منطقه و با در نظر گرفتن تمامی محدودیت‌های ارتفاع، گروه بندی طرح لرزه‌ای و نامعینی و نیز جزئیات اجرایی موجود انتخاب شده باشد. علاوه بر این، توجه به نکات زیر در طراحی سازه‌های دارای میراگر ضروری است:

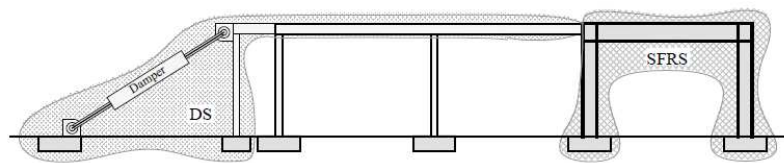
۱) سیستم مقاوم در برابر بار لرزه‌ای بدون احتساب سیستم میراگر، باید به گونه‌ای طراحی شود که مقاومتی کمتر از ۷۵ درصد مقاومت مورد نیاز برای حالت بدون حضور میراگر را دارا باشد (برای سازه‌های نامنظم شدید در ارتفاع یا پلان این محدودیت ۱۰۰ درصد است). طراحی سیستم باربر جانبی برای حداقل ۸۰ درصد مقاومت مورد نیاز در حالت بدون میراگر، ضمن آنکه موجب افزایش ایمنی در مقابل مسائل ناشی از سوء عملکرد میراگر خواهد بود، باعث ایجاد یک سیستم ترکیبی خواهد شد که با دارا بودن سختی و مقاومت کافی، باعث کنترل پاسخ تغییر مکان جانبی می‌شود.

۲) سیستم میراگر (شامل تمامی اجزاء میراگر و قطعات نگهدارنده آن) باید محدودیت‌های تغییر مکانهای نسبی را در تمامی ساختمانها (منظم و غیرمنظم) برآورده نماید. این سیستم، همچنین، باید برای نیروهای واقعی (کاهش نیافته) زلزله و نیز تغییر مکانهای واقعی طراحی شود. برای اعضای مشخصی از سیستم میراگر (مثل اتصالات یا اعضای که از طریق آنها ابزار میراگر قاب بندی می‌شوند)، به غیر از ابزار میراگر، رسیدن به حد تسلیم محدود، مجاز است به شرط آنکه این وضعیت، بر عملکرد سیستم میراگر تاثیر نگذاشته و مقادیر کنترلی نیرو و تغییر شکل در اعضا، از مقادیر مجاز برای اعضای سازه‌های متداول که توسط استاندارد تعیین می‌شود تجاوز ننماید.

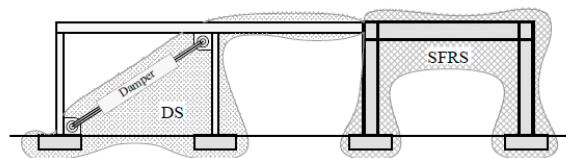
۳) علی‌رغم تشابه احتمالی در برخی اجزاء، سیستم میراگر به طور مجزای از سیستم مقاوم در برابر بارهای لرزه‌ای تعریف می‌شود. همانگونه که در شکل (۳-۱۱) نشان داده شده است، سیستم میراگر می‌تواند عضو مشترکی با سازه اصلی نداشته باشد، یا برخی اعضا آن با اعضا قاب نگه دارنده مشترک باشند، و یا اینکه



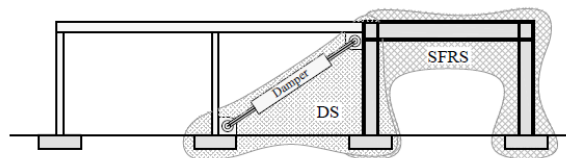
تمامی اجزاء آن با اجزاء سیستم مقاوم در برابر بار زلزله مشترک باشد. در شرایطی که یک یا چند عضو مشترک بین این دو سیستم وجود داشته باشد، این اعضای مشترک باید برای ترکیب نیرو حاصل از دو سیستم طراحی شود. در شرایطی که سیستم میراگر و قاب نگه دارنده عضو مشترکی نداشته باشند، نیروهای میراگر باید محاسبه شده و به اعضای قاب مقاوم در برابر نیروی زلزله انتقال داده شود.



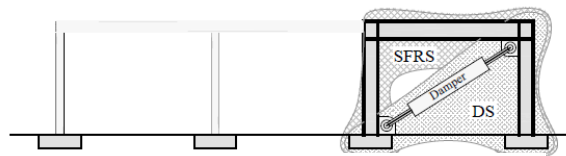
میراگرهای تعبیه شده در خارج سازه



میراگرهای داخلی - بدون عضو مشترک با سازه



میراگرهای داخلی - با تعدادی عضو مشترک با سازه



میراگرهای داخلی - دارای عضوهای مشترک با سازه

شکل (۳-۱۱) سیستم میراگر و قاب نگهدارنده آن به همراه قاب باربر جانبی سازه

### ۳-۳-۱ مقادیر طیفی پاسخ و طرح براساس ساختگاه

پارامترهای مرتبط با شرایط ساختگاه، که در فرآیند تحلیل سازه‌های دارای میراگر مورد استفاده قرار می‌گیرند، به شرح زیر معرفی شده و در دستورالعمل حاضر به کار می‌روند.

الف) مقادیر طیفی پاسخ:

شتاب طیفی پاسخ متناظر با زلزله حداکثر ساختگاه ( $MCE_R$ )، در دوره تناوب‌های مختلف با پارامترهای زیر

معرفی می‌شود:



$S_{M1}$ : پارامتر شتاب طیف پاسخ ( $MCE_R$ ) با میرایی ۵٪ در دوره تناوب ۱ ثانیه، تنظیم شده برای اثرات نوع خاک محل است.

$S_{MS}$ : پارامتر شتاب طیف پاسخ ( $MCE_R$ ) با میرایی ۵٪ در دوره تناوب های کوچک، تنظیم شده برای اثرات نوع خاک محل است.

این پارامترها به طور کلی براساس روابط زیر تعیین می شوند:

$$S_{MS} = F_a S_s \quad (۷-۳)$$

$$S_{M1} = F_v S_1 \quad (۸-۳)$$

که در آنها،

$S_1$ : پارامتر شتاب طیفی پاسخ ( $MCE_R$ ) نگاشت شده در دوره تناوب برابر با ۱ ثانیه است و

$S_s$ : پارامتر شتاب طیفی پاسخ ( $MCE_R$ ) نگاشت شده در دوره تناوب های کوتاه است.

پارامترهای  $S_1$  و  $S_s$  باید براساس شرایط ساختگاه تعیین شوند. در شرایطی که  $S_1$  کوچکتر یا مساوی ۰/۰۴ باشد و  $S_s$  کوچکتر یا مساوی ۰/۱۵ باشد، می توان ساختمان را در ناحیه با خطر لرزه پذیری A در نظر گرفت. علاوه بر این، ضرایب متناظر با ساختگاه که با  $F_a$  و  $F_v$  معرفی می شوند، براساس جداول زیر تعیین می شوند. در شرایطی که  $S_1 > 0.5$  باشد، مقادیر  $F_v$  براساس جداول زیر متناظر با شرایط کشور خواهد بود و امکان استفاده از طیف طرح استاندارد ۲۸۰۰ وجود خواهد داشت. در غیر اینصورت و براساس شروط مندرج در بند ۱-۳-۳-۱ از دستورالعمل، استفاده از روش طیف طرح ویژه ساختگاه الزامی است.



جدول (۱-۳) ضرایب  $F_a$  براساس مشخصات ساختگاه

شتاب طیفی پاسخ ( $MCE_R$ ) نگاشت شده در دوره تناوب های کوتاه					نوع خاک
$S_s \geq 1.25$	$S_s = 1.0$	$S_s = 0.75$	$S_s = 0.5$	$S_s \leq 0.25$	
۰٫۸	۰٫۸	۰٫۸	۰٫۸	۰٫۸	A
۱٫۰	۱٫۰	۱٫۰	۱٫۰	۱٫۰	B
۱٫۰	۱٫۰	۱٫۱	۱٫۲	۱٫۲	C
۱٫۰	۱٫۱	۱٫۲	۱٫۴	۱٫۶	D
۰٫۹	۰٫۹	۱٫۲	۱٫۷	۲٫۵	E
براساس ضوابط مندرج در بند ۱-۳-۳-۱ دستورالعمل					F

جدول (۲-۳) ضرایب  $F_v$  براساس مشخصات ساختگاه

شتاب طیفی پاسخ ( $MCE_R$ ) نگاشت شده در دوره تناوب برابر با ۱ ثانیه					نوع خاک
$S_s \geq 0.5$	$S_s = 0.4$	$S_s = 0.3$	$S_s = 0.2$	$S_s \leq 0.1$	
۰٫۸	۰٫۸	۰٫۸	۰٫۸	۰٫۸	A
۱٫۰	۱٫۰	۱٫۰	۱٫۰	۱٫۰	B
۱٫۳	۱٫۴	۱٫۵	۱٫۶	۱٫۷	C
۱٫۵	۱٫۶	۱٫۸	۲٫۰	۲٫۴	D
۲٫۴	۲٫۴	۲٫۸	۳٫۲	۳٫۵	E
براساس ضوابط مندرج در بند ۱-۳-۳-۱ دستورالعمل					F

(ب) مقادیر طیفی طرح:

شتاب طیفی طرح متناظر با دوره تناوب های مختلف با پارامترهای زیر معرفی می شود:

$S_{D1}$ : متناظر با شتاب پاسخ طیفی زلزله طرح در دوره تناوب برابر با ۱ ثانیه است.

$S_{DS}$ : متناظر با شتاب پاسخ طیفی زلزله طرح در دوره تناوب های کوتاه است.

این پارامترها از رابطه های زیر بدست می آیند:

$$S_{DS} = \frac{2}{3} S_{MS} \quad (۹-۳)$$

$$S_{D1} = \frac{2}{3} S_{M1} \quad (۱۰-۳)$$



## ۳-۳-۲ روشهای تحلیل

### ۳-۳-۱ کلیات

روش های تحلیل استاتیکی خطی و تحلیل طیف پاسخ را می توان برای طراحی سازه های دارای میراگر که مشخصات پیکربندی مناسبی داشته باشند (برای مثال، حداقل دو ابزار میراگر در هر طبقه برای مقاومت در برابر پیچش منظور شده باشد) به کار برد. در چنین مواردی چنانچه سازه در سائیتی که مقدار  $S_1$  در آن مساوی یا بیش از  $0.6$  باشد، ضمن تحلیل خطی، نیازمند انجام یک تحلیل اضافی تاریخچه زمانی غیرخطی به منظور تخمین حداکثر پاسخ سازه خواهد بود.  $S_1$  پارامتر شتاب طیفی پاسخ ( $MCE_R$ ) نگاشت شده در دوره تناوب برابر با  $1$  ثانیه است که جزئیات محاسباتی آن در ادامه ذکر می شود.

مشابه سازه های متداول، سازه های دارای میراگر نیز حین لرزش های شدید زمین دچار تسلیم می شوند و عملکرد آنها می تواند به شدت از پاسخ مودهای بالاتر تاثیر پذیر باشد. به همین دلیل استفاده از روشهای تحلیل غیرخطی (Pushover) با استفاده از سختی موثر و مشخصات میرائی موثر مود اول، در این سازه ها، مورد توجه قرار می گیرد. الزامات مورد بحث در دستورالعمل حاضر که برای مدلسازی غیرخطی سازه های دارای میراگر ارائه شده اند، به منظور وارد کردن اثرات تقاضای شکل پذیری (پاسخ بعد از تسلیم) و پاسخ مودهای بالاتر سازه دارای میراگر، به صورت غیر مستقیم در تحلیل و طراحی ارائه شده است. به طور کلی، روشهای طیف پاسخ و بار جانبی معادل که در دستورالعمل حاضر ارائه شده است شامل چندین ساده سازی و محدودیت مطابق زیر است:

۱. با استفاده از روش تجزیه مودی میتوان سازه چند درجه آزادی دارای سیستم میراگر را به سیستم های یک درجه آزادی معادل تبدیل نمود. در این شرایط فرض بر این است که مکانیزم خرابی سازه یک مکانیزم یک درجه آزادی است و لذا توزیع تغییر مکان نسبی در ارتفاع، منطبق بر شکل مود اول یا اشکال دیگر از جمله مثلث وارونه، با تخمین درستی همراه خواهد بود. این روش را، در عین دقت و سادگی، نمی توان با قطعیت برای ساختمان های دارای تسلیم شدگی یا ساختمان های با نسبت میرایی غیر مشخص به کار برد.



۲. پاسخ یک سیستم یک درجه آزادی غیر خطی را می توان با استفاده از مشخصات معادل خطی و طیف پاسخ ۵ درصد تخمین زد. طیف پاسخ متناظر با میرایی بیشتر از ۵ درصد را می توان با استفاده از ضرایب اصلاح میرایی تعیین نمود. علاوه براین، نیروهای وابسته به سرعت را می توان با استفاده از سرعت مودی و اطلاعات مودی متناظر با آن، و یا با اعمال فاکتورهای اصلاحی بر آنها به دست آورد.

۳. پاسخ غیر خطی سازه را می توان با یک رابطه هیستریزس دو خطی، دارای سختی ثانویه صفر (رفتار الاستو-پلاستیک) مدلسازی کرد.

۴. مقاومت تسلیم سازه می تواند با تحلیل پلاستیک سازه یا با استفاده از حداقل برش پایه لرزه ای و مقادیر  $R$ ،  $\Omega_0$ ،  $C_d$  حاصل شود.

۵. در روش نیروی جانبی معادل باید اثرات مودهای بالاتر را در نظر گرفت تا تاثیر آنها بر نیروهای وابسته به سرعت به حساب آورده شود.

روش های طیف پاسخ و بارجانبی معادل که در دستورالعمل حاضر ارائه شده اند، هر دو تخمین های محافظه کارانه ای از نیروی میراگر و عکس العمل های اعضاء بدست می دهد و در قیاس با نتایج تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی دینامیکی از دقت قابل قبولی برخوردارند.

### ۳-۲-۲ تحلیل خطی

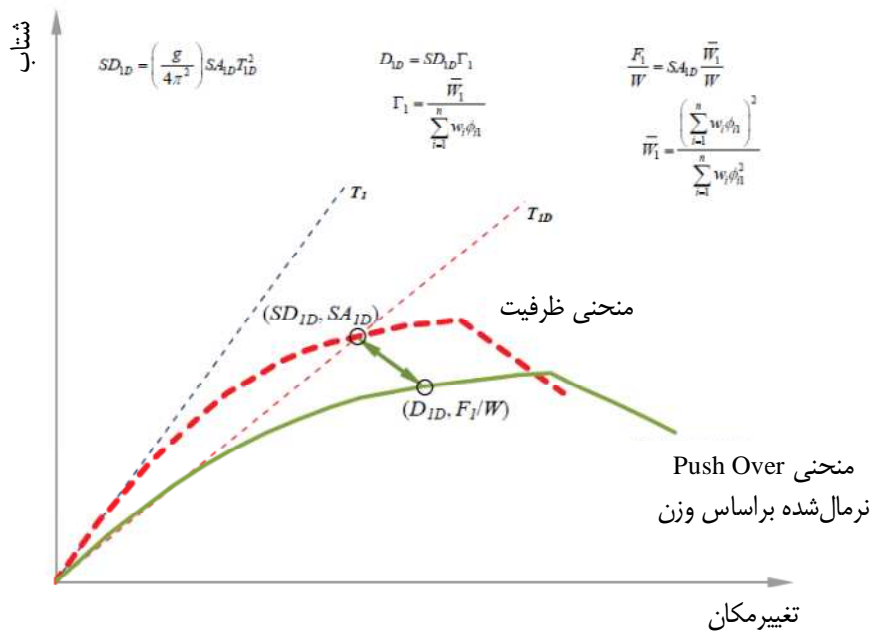
تحلیل خطی به دو روش عمده روش استاتیکی خطی یا بار معادل، و روش دینامیکی خطی یا طیف پاسخ انجام می شود. این روش ها به طور کامل در فصل اول دستورالعمل حاضر ارائه شده است. در اینجا و به منظور بیان جزئیات این روش ها و مبانی محاسباتی آنها، به اختصار به برخی ویژگی های آنها، اشاره می شود.

در تحلیل به روش بار معادل جانبی، پاسخ سازه با دو مود اصلی تعریف می شود: اول، مود اصلی سازه و دوم، مودهای باقیمانده. مودهای باقیمانده مفهومی است که برای تخمین اثرات ترکیبی مودهای بالاتر به کار می رود. از آنجا که معمولاً سرعت مودال در درجه دوم اهمیت نسبت به تغییرمکان مودال قرار داشته و



مودهای بالاتر نقش بیشتری در تعیین سرعت دارند، لذا استفاده از مودهای بالاتر در طراحی پاسخ‌های وابسته به سرعت میراگرها حائز اهمیت است. برای تحلیل به روش طیف پاسخ، اثرات مودهای بالاتر به طور مجزا در نظر گرفته می‌شوند.

در هر دو روش بار جانبی معادل و طیف پاسخ، پاسخ در مود اصلی در جهت مورد انتظار، براساس رفتار و مشخصات غیرخطی (pushover) سازه تعیین می‌شود. مشخصات غیرخطی، که براساس برش پایه و تغییرمکان بام تعریف می‌شوند به ظرفیت ساختمان وابسته اند که خود به طور خاص به پارامترهای مودی از جمله میزان جرم‌های مودی مرتبط است (شکل ۳-۱۲).

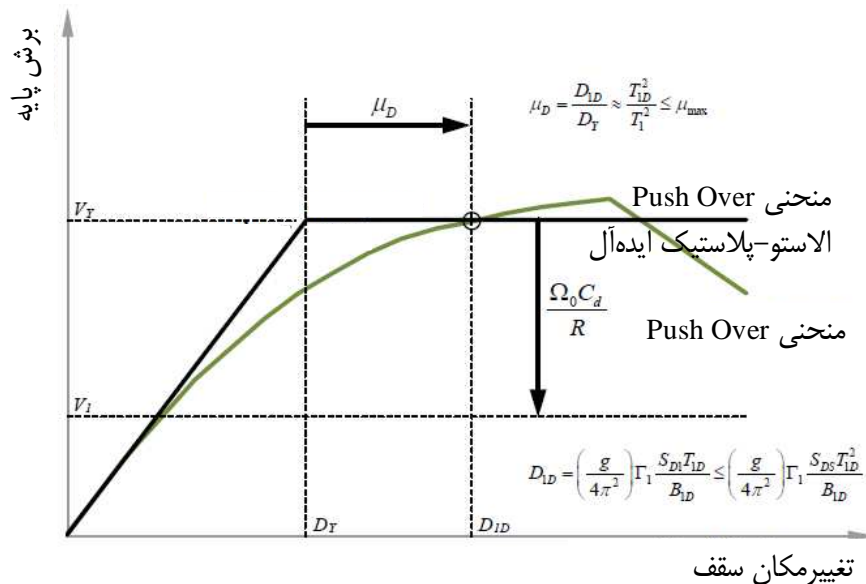


شکل (۳-۱۲) منحنی Pushover و ظرفیت

در شرایطی که از روش‌های تحلیل خطی استفاده می‌شود، شکل‌های مودی مشخص نیست. لذا استفاده از یک فرم الاستو-پلاستیک مناسب است (شکل ۳-۱۳). منحنی pushover ایده‌آل‌سازی شده در یک نقطه با منحنی pushover دقیق مشترک است و این نقطه متناظر با تغییرمکان زلزله طرح یا  $D_{1D}$  است. منحنی ایده‌آل‌سازی شده، امکان تعریف نیاز شکل‌پذیری را براساس زلزله طرح،  $\mu_D$  فراهم می‌کند و این نیاز را با نسبت تغییرمکان طرح،  $D_{1D}$ ، به تغییرمکان تسلیم،  $D_Y$ ، مشخص می‌نماید. این ضریب شکل‌پذیری، که برای



محاسبه پارامترهای مختلف طراحی به کار می‌رود، نباید از میزان ظرفیت شکل‌پذیری سیستم مقاوم در برابر زلزله،  $\mu_{max}$  که با استفاده از پاسخ conventional سازه محاسبه می‌شود، تجاوز نماید.



شکل (۳-۱۳) منحنی ایده‌آل سازی شده Pushover مورد استفاده در تحلیل خطی

اجزاء یک سیستم میرایی برای نیروهای مود اصلی حاصل از زلزله طرح و متناظر با برش پایه  $V_T$  طراحی می‌شوند، مگر آنکه سیستم میراگر به تنهایی طراحی شده باشد و آزمون‌های نمونه برای پاسخ در زلزله حداکثر انجام شده باشد. اجزاء سیستم مقاوم در برابر زلزله برای برش پایه متناظر با مودهای باقیمانده،  $V_1$ ، طراحی می‌شوند که در این شرایط، کاهش نیروها براساس ضریب تشدید مقاومت ( $\Omega_0$ ) انجام می‌شود و با ضرب در  $C_d/R$  اثر تحلیل الاستیک در آن وارد می‌شود. اعمال کاهش در نیروها با استفاده از ضریب مذکور، به دلیل تعریف مقادیری برای  $C_d$  که از مقدار  $R$  کمتر است، ضروری است. در شرایطی که این دو مقدار با هم برابر بوده و سازه تحت شرایط الاستیک دارای میرایی ۵ درصد باشد، هیچ گونه اصلاحاتی در مقادیر نیرویی لازم نخواهد بود. از آنجاکه روش تحلیل بر محاسبه تغییر مکان‌های نسبی واقعی در طبقات و تغییر مکان‌های سیستم میراگر (فارغ از تغییر مکان‌هایی که برای شرایط الاستیک در برش پایه کاهش یافته محاسبه شده و سپس با ضریب  $C_d$  اصلاح شده است) استوار است، اعمال یک قضاوت مهندسی مورد نیاز خواهد بود. با توجه به اینکه تغییر مکان‌های نسبی واقعی در طبقات قابل محاسبه هستند، لذا حداکثر میزان



تغییر مکان‌های جانبی طبقات که براساس روابط مندرج در استاندارد ۲۸۰۰۵ ویرایش ۴ تعیین شده‌است، باید پیش از استفاده در ضریب  $R/C_d$  ضرب شوند.

محاسبه نیروها در اعضای ساختمان دارای میراگرهای وابسته به سرعت، به دلیل اینکه مولفه ویسکوز نیروها به طور مستقیم در نظر گرفته نشده‌است، فرآیند پیچیده‌ای خواهد داشت. با توجه به عدم هم‌زمانی رخدادن مقادیر حداکثر تغییر مکان، سرعت و شتاب، حداکثر نیروی اعضا ممکن است در یکی از سه حالت کلی حداکثر تغییر مکان، حداکثر سرعت و حداکثر شتاب رخ دهد. تمامی این سه سطح باید برای سازه‌های دارای میراگرهای وابسته به سرعت کنترل شوند. برای سیستم‌های میراگر وابسته به تغییر مکان، سطوح اول و دوم تعیین کننده‌اند و امکان صرف‌نظر از سطح سوم وجود دارد.

نیروهای ویسکوز در وضعیت حداکثر سرعت، بیشترین مقدار خود را خواهند داشت. مولفه‌های افقی این نیروهای ویسکوز با نیروهای اینرسی خنثی می‌شوند به نحوی که تغییر مکان‌های جانبی برابر با صفر می‌شود. نیروهای ویسکوز باعث بوجود آمدن نیروهای محوری در ستونهای نگه‌دارنده میراگرهای ویسکوز می‌شوند. شدت این نیروهای محوری به (الف) مقدار میرائی افزوده‌شده به واسطه میراگرها و (ب) تعداد میراگرهایی که برای رسیدن به سطح میرائی هدف مورد استفاده قرار گرفته‌اند وابسته است.

وضعیت متناظر با بیشترین شتاب، به این صورت تعیین می‌شود که فرض بر آن است که ساختمان تحت حرکت هارمونیک با فرکانس  $f_1$  و دامنه‌ای متناظر با حداکثر تغییر مکان نسبی قرار دارد. در این شرایط، حداکثر شتاب برابر خواهد بود با میزان شتاب متناظر با بیشترین تغییر مکان  $(C_{mFV} + 2\beta_{eff} C_{mFD})$ . براساس تحقیقات موجود، این رابطه نتایج قابل قبولی ارائه می‌دهد. لازم به ذکر است که استفاده از فرض  $C_{mFV} = C_{mFD} = 1$  به نتایج محافظه‌کارانه‌ای در خصوص نیروی اعضا منجر خواهد شد. ضرایب نیرویی  $C_{mFD}$  و  $C_{mFV}$  برای ترکیب آثار سطوح حداکثر تغییر مکان و حداکثر سرعت در محاسبه نیروها در سطح حداکثر شتاب، تعریف و استفاده می‌شوند. این ضرایب، به صورت عددی و در قالب جداولی براساس محاسبات عددی پیشنهادی توسط Ramirez et al. (2001) ارائه شده‌اند و برای رفتار غیرخطی ویسکوز و رفتار غیرالاستیک سازه‌ای معتبرند. نحوه محاسبه این ضرایب نیز به شرح اشاره شده در بند ۳-۳-۲-۴ می‌باشد.



### ۳-۲-۳-۳ روشهای غیرخطی

به عنوان یک اصل ابتدائی در ورود به تحلیل سازه‌ها در محدوده غیرخطی توجه به این مورد ضروری است که در شرایطی که سیستم مقاوم در برابر زلزله به طور ذاتی الاستیک است (به عنوان مثال، مقاومتی بیشتر از ۵۰ درصد نیاز مقاومتی داشته باشد)، تنها وارد کردن مشخصات غیرخطی میراگرها در مدل‌های تحلیلی مورد نیاز خواهد بود. در حالیکه در شرایطی که سیستم مقاوم در برابر زلزله به حد تسلیم رسیده باشد، تمامی مشخصه‌های رفتاری پس از تسلیم اجزاء سازه‌ای باید در مدلسازی ساختمان وارد شوند.

پاسخ کاهش یافته ساختمان‌های دارای سیستم میراگر با ضریب میرائی  $B$  شناخته می‌شود که براساس میزان میرائی موثر  $\beta$  در مود مورد انتظار تعیین شده‌است. در این شرایط، میزان میرائی موثر متناظر با مود اصلی سازه دارای میراگر، براساس مشخصات غیرخطی پاسخ نیرو-تغییر مکان سازه تعریف می‌شود. برای بهره‌گیری از این روش در تحلیل‌های غیرخطی، مشخصات غیرخطی سازه شامل ضریب تشدید مقاومت ( $\Omega_0$ ) و سایر پارامترها در محاسبات وارد می‌شود.

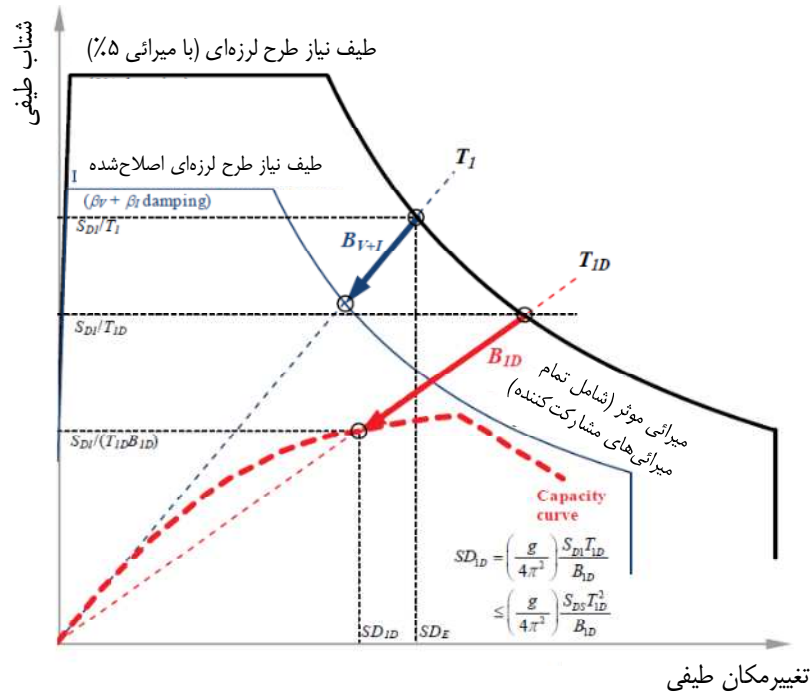
شکل (۳-۱۴) کاهش پدید آمده در پاسخ زلزله طرح در مود اصلی سازه به دلیل افزایش در میرائی موثر آن مود (که با  $B_{ID}$  نشان داده می‌شود) را نشان می‌دهد. منحنی ظرفیت ارائه شده، بیانگر رفتار غیرخطی ساختمان در مود اصلی است که براساس رابطه بین شتاب و تغییر مکان طیفی تعریف می‌شود. کاهش ناشی از تاثیر میرائی در دوره تناوب موثر مود اصلی ارتعاش اعمال می‌شود. به طور کلی، میرائی موثر ترکیبی از سه مولفه زیر است:

۱- میرائی ذاتی ( $\beta_I$ ): میرائی ذاتی یک ساختمان در لحظه تسلیم یا پیش از آن، بدون در نظر گرفتن حضور میراگرها. این مقدار به طور معمول و در شرایط بحرانی، برابر با ۵ درصد برای ساختمان‌های بدون ابزارهای اتلاف انرژی معرفی می‌شود.

۲- میرائی هیستریزیس ( $\beta_H$ ): میرائی پس از تسلیم سیستم مقاوم در برابر زلزله و اجزاء نگه‌دارنده میراگر است که براساس دامنه تغییر مکانی (amplitude) مورد نظر تعیین می‌شود (در شرایط بحرانی مثل شرایط تسلیم و قبل از آن، برابر با صفر در نظر گرفته می‌شود).



۳- میرائی سیستم اتلاف انرژی ( $\beta_v$ ): میرائی ویسکوز سیستم اتلاف انرژی (برای میراگرهای وابسته به تغییر مکان، باید براساس دامنه پاسخ در تغییر مکان تسلیم سازه تعیین شود).



شکل (۳-۱۴) کاهش پاسخ سازه به دلیل کاهش میرائی موثر

هر دو بخش میرائی هیستریزیس و میرایی متناظر با سیستم اتلاف انرژی، وابسته به دامنه تغییر مکانی هستند و مشارکت نسبی آنها در مقایسه با میزان میرائی کل موثر، با میزان پاسخ بعد از تسلیم سازه تغییر می‌کند. به عنوان مثال، با افزودن میراگرها به یک ساختمان، میزان تغییر مکان پس از تسلیم سازه کاهش می‌یابد و در نتیجه، میزان میرائی هیستریزیس که توسط سیستم مقاوم در برابر زلزله ایجاد شده است نیز کاهش خواهد یافت. در شرایطی که تغییر مکان به میزان تغییر مکان تسلیم کاهش می‌یابد، مولفه هیستریزیس از میرائی موثر برابر صفر است و میزان میرایی موثر برابر با میرائی ذاتی سازه به علاوه میرایی متناظر با ابزارهای اتلاف انرژی است. در شرایطی که هیچ سیستم اتلاف انرژی‌ای در سازه استفاده نشده باشد، میرائی موثر به سادگی برابر با میرائی ذاتی سازه (در حدود ۵ درصد) تعیین می‌شود.





مقدار میرائی موثر در یک ساختمان باید به نحوی محاسبه شود که با منحنی نیاز طراحی در انطباق باشد. به طور کلی، میرائی موثر باید مستقل از سطح تغییرمکانی متناظر با تغییرشکل‌های سیستم قاب ساختمانی باشد.

میزان میرائی موثر با فرض رفتار ایده‌آل دو خطی برای سازه در بارگذاری چرخه‌ای بدست می‌آید که با نیاز شکل‌پذیری موثر،  $\mu$ ، در ارتباط است. میرایی موثر با استفاده از ضریب ارزیابی چرخه‌های هیستریزیس،  $q_H$ ، که با تقسیم سطح واقعی زیر حلقه‌های بارگذاری بر سطح زیر حلقه‌های دوخطی ایده‌آل معرفی می‌گردد، تعیین می‌شود. به طور کلی، مقدار این ضریب کمتر از (۱) است. قواعد محاسباتی موجود در مراجع اصلی بسیار پیچیده است ولی به صورت محافظه‌کارانه می‌توان آنرا از رابطه زیر بدست آورد:

$$\beta_{eff} = \frac{W_D}{4\pi W_k} + \beta \quad (11-3)$$

که در آن،  $W_D$  میزان انرژی مستهلک‌شده در ساختمان ب (با در نظر گرفتن حضور میراگرها) در یک چرخه حرکت است. عبارت  $W_k$  نیز میزان انرژی کرنشی ذخیره‌شده در ساختمان در تغییرمکانی برابر با تغییرمکان متناظر با  $W_D$  است.

### ۳-۲-۴ تخمین سرعت و شتاب حداکثر در سیستم‌های دارای میراگر ویسکوز

در روش‌های تحلیلی تکراری، در ابتدا مقدار جابه‌جایی  $D$  فرض شده و سپس مقدار میرایی و دوره تناوب موثر متناظر با آن تخمین زده می‌شود. در مرحله بعد، با استفاده از طیف طراحی مقداری برای  $D$  تعیین می‌شود که با مقدار مفروض اولیه مقایسه می‌شود. در این حالت، شرط لازم برای تائید محاسبات این است که تغییرمکان محاسبه شده از میزان تغییرمکان محاسبه شده برای شرایط ارتجاعی کمتر نشود. با تغییر گام به گام مقدار تغییرمکان  $D$  و تکرار محاسبات، مقدار حداکثر جابه‌جایی  $D$  و شتاب  $A$  یا  $(A + A_d)$  در جابه‌جایی حداکثر تعیین می‌شود. علاوه بر تعیین میزان جابه‌جائی حداکثر، در شرایطی که از سیستم‌های دارای میراگر ویسکوز استفاده می‌شود، تعیین حداکثر سرعت برای محاسبه حداکثر نیروی میراگر و حداکثر شتاب، که



معمولاً بزرگتر از  $A$  است و در جابه‌جایی‌های کوچکتر از  $D$  اتفاق می‌افتد، لازم است. حداکثر سرعت در این روش به صورت شبه سرعت و از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$V = \left( \frac{2\pi}{T_{eff}} \right) D \quad (12-3)$$

حداکثر شتاب را می‌توان براساس فرآیند توسعه داده شده توسط Tsopelas و همکاران که در FEMA 1997 هم به کار رفته تعیین نمود. در این شرایط، با فرض سیستم ارتجاعی خطی با میراگر ویسکوز غیرخطی، سازه با سختی  $K$  و جرم  $m$ ، تحت نوسان هامونیک با فرکانس طبیعی  $\omega_n$  و دامنه  $D$  در نظر گرفته می‌شود. بدین ترتیب شرایط جابجائی عبارت خواهد بود از:

$$u = D \cos \omega_n t \quad (13-3)$$

و برای سرعت می‌توان رابطه زیر را تعریف نمود:

$$\dot{u} = -D \omega_n \sin \omega_n t \quad (14-3)$$

با در نظر گرفتن ترکیب نیروی بازگرداننده و نیروی میراگر، تعادل نیرویی به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$F = ku + C_N | \dot{u} |^\alpha \operatorname{sgn}(\dot{u}) \quad (15-3)$$

که در آن  $C_N$  ضریب میرائی و  $\alpha$  توان میرائی است. رابطه (۱۵-۳) را می‌توان به صورت زیر بازنویسی نمود:

$$\frac{F}{m\omega_n^2 D} = -\frac{2\pi}{\lambda} \beta_V \sin^\alpha \omega_n t + \cos \omega_n t \quad (16-3)$$

در رابطه فوق مقادیر  $\lambda$ ،  $\beta_V$  و  $\omega_n$  به شرح زیر تعیین می‌شوند:

$$\beta_V = \frac{C_N \lambda}{2\pi m} D^{\alpha-1} \left( \frac{2\pi}{T_e} \right)^{\alpha-2} \quad (17-3)$$

$$\lambda = 4.2^\alpha \frac{\Gamma^2(1+\alpha/2)}{\Gamma(2+\alpha)} \quad (18-3)$$

$$\omega_n = \left( \frac{k}{m} \right)^{1/2} = \frac{2\pi}{T_e} \quad (19-3)$$

$$T_e = 2\pi \left( \frac{D_y}{A_y} \right)^{1/2} \quad (20-3)$$



در این روابط،  $A_y$  و  $D_y$  شتاب و تغییر مکان متناظر با تسلیم سیستم یک درجه آزادی،  $T_e$  دوره تناوب الاستیک سازه یک درجه آزادی و  $\Gamma$  تابع گاما (gamma function) است. برای مقادیر مختلف  $\alpha$  مقدار  $\lambda$  در جدول (۳-۳) قابل استخراج است.

جدول (۳-۳) مقادیر ضرایب اصلاح حاصل از مطالعات رامیرز و همکاران (۲۰۰۱)

ضریب میرائی موثر										دوره تناوب موثر (ثانیه)
۱/۰۰	۰/۹۰	۰/۸۰	۰/۷۰	۰/۶۰	۰/۵۰	۰/۴۰	۰/۳۰	۰/۲۰	۰/۱۰	
۰/۴۹	۰/۵۴	۰/۵۸	۰/۵۸	۰/۶۰	۰/۶۳	۰/۶۷	۰/۶۹	۰/۷۰	۰/۷۲	۰/۳
۰/۶۱	۰/۶۲	۰/۶۴	۰/۶۵	۰/۶۷	۰/۶۹	۰/۷۰	۰/۷۳	۰/۷۳	۰/۷۵	۰/۵
۰/۹۵	۰/۹۳	۰/۹۲	۰/۹۰	۰/۸۹	۰/۸۸	۰/۸۶	۰/۸۶	۰/۸۳	۰/۸۲	۱/۰
۱/۲۰	۱/۱۷	۱/۱۴	۱/۱۲	۱/۰۹	۱/۰۵	۱/۰۴	۱/۰۰	۰/۹۸	۰/۹۵	۱/۵
۱/۴۱	۱/۳۸	۱/۳۴	۱/۳۰	۱/۲۷	۱/۲۳	۱/۱۹	۱/۱۶	۱/۱۲	۱/۰۸	۲/۰
۱/۵۹	۱/۵۴	۱/۴۸	۱/۴۲	۱/۳۶	۱/۳۰	۱/۲۴	۱/۱۷	۱/۱۱	۱/۰۵	۲/۵
۱/۷۵	۱/۶۷	۱/۵۸	۱/۵۰	۱/۴۲	۱/۳۳	۱/۲۵	۱/۱۷	۱/۰۸	۱/۰۰	۳/۰
۱/۷۵	۱/۶۷	۱/۶۰	۱/۵۲	۱/۴۵	۱/۳۷	۱/۳۰	۱/۲۲	۱/۱۵	۱/۰۹	۳/۵
۱/۸۱	۱/۸۱	۱/۷۰	۱/۶۰	۱/۴۹	۱/۳۸	۱/۲۴	۱/۱۵	۱/۰۵	۰/۹۵	۴/۰

همانطور که در شکل (۳-۱۵) ملاحظه می‌شود، در سیکل در نظر گرفته شده سرعت منفی است و حداکثر مقدار  $F$  در زمان  $t^*$  اتفاق می‌افتد که این زمان با حل معادله مشتق سمت راست رابطه (۳-۱۶) نسبت به زمان برابر صفر بدست می‌آید:

$$\frac{\sin^{2-\alpha} \omega_n t^*}{\cos \omega_n t^*} = - \frac{2\pi \alpha \beta_V}{\lambda} \quad (۳-۲۱)$$

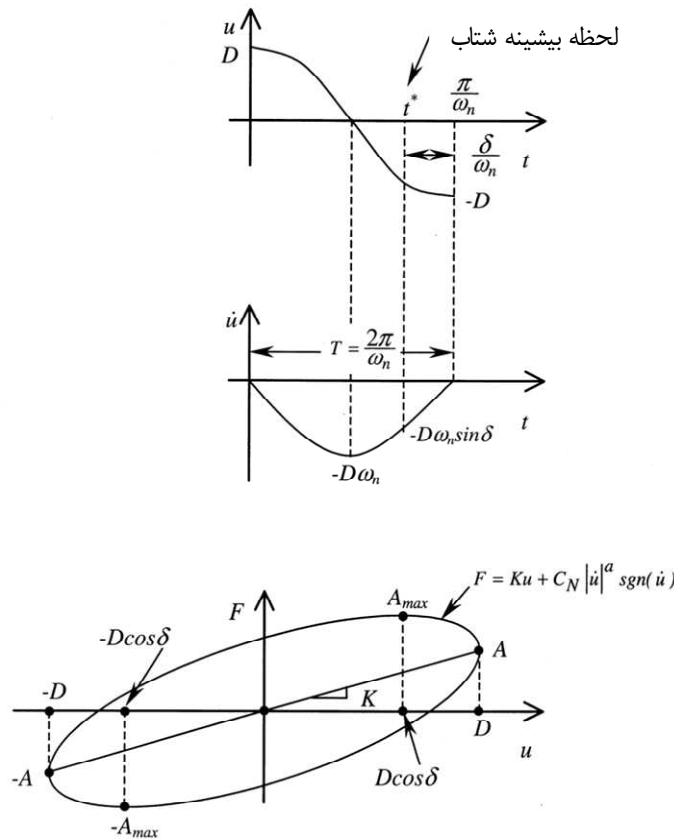
برای بدست آوردن زمان  $t^*$  معادله فوق را فقط برای حالت میراگرهای ویسکوز خطی با  $\alpha = 1$  می‌توان به صورت دقیق حل نمود. هرچند یک راه حل تقریبی با انجام فرض زیر قابل استخراج است (به شکل (۳-۱۵) مراجعه شود):

$$\omega_n t^* = \pi - \delta \quad (۳-۲۲)$$

در این رابطه  $\delta$  یک تاخیر فاز کوتاه مطابق شکل (۳-۱۵) می‌باشد. این فرض در شرایطی که مقدار  $\alpha$  کوچک است ( $\alpha = 0$  و  $\delta = 0$ )، فرض مناسبی است و تاخیر فاز مورد اشاره از رابطه زیر قابل تعیین است:



$$\delta = \left( \frac{2\pi \alpha \beta_V}{\lambda} \right)^{\frac{1}{2-\alpha}} \quad (23-3)$$



شکل (۱۵-۳) جابه‌جایی هارمونیک در سازه با میراگر ویسکوز غیرخطی و رابطه نیرو تغییر مکان

برای ابزارهای میرایی ویسکوز، تاخیر فاز  $\delta$  می‌تواند به صورت دقیق از رابطه زیر تعیین شود:

$$\delta = \tan^{-1}(2\beta_V) \quad (24-3)$$

لازم به تاکید است که رابطه (۲۳-۳) حتی برای میراگر ویسکوز خطی هم تقریب‌های خوبی ارائه می‌کند.

در حالت  $\alpha = 1$  و  $\lambda = \pi$  مطابق رابطه (۲۳-۳) داریم  $\delta = 2\beta_V$ . در مقایسه با رابطه (۲۴-۳)، استفاده از

رابطه (۲۳-۳) برای  $\beta_V = 0.15$  در حدود ۳ درصد و برای  $\beta_V = 0.25$  در حدود ۷ درصد خطا دارد.

بدین ترتیب، حداکثر شتاب از جایگذاری رابطه (۲۲-۳) و (۲۳-۳) در رابطه (۱۶-۳) محاسبه می‌شود.

$$A_{\max} = A \left( C_{mFD} + \frac{2\pi\beta_V}{\lambda} C_{mFV} \right) \quad (25-3)$$



که در این رابطه:

$$C_{mFD} = \cos \delta \quad (26-3)$$

و

$$C_{mFV} = (\sin \delta)^\alpha \quad (27-3)$$

پارامترهای  $C_{mFD}$  و  $C_{mFV}$  ضرایب بار مورد استفاده برای محاسبه پاسخ در زمان حداکثر شتاب هستند که به کمک آن‌ها، به ترتیب اثر لحظه‌ای حداکثر تغییر مکان و حداکثر سرعت در محاسبه پاسخ وارد می‌شود. پارامتر  $\delta$  مورد بحث در دو رابطه (۲۶-۳) و (۲۷-۳) از رابطه (۲۳-۳) تعیین می‌شود که در آن  $\beta_V$  با  $\beta_{veff}$  جایگزین می‌شود. در میراگرهای ویسکوز خطی و هیستریزیس الاستوپلاستیک، مقدار  $\alpha$  برابر با ۰/۰۰۵ تعیین می‌شود. لازم به تاکید است که در این فرمول‌بندی، میرایی ذاتی سیستم مرکب به دلیل افزایش سختی در شرایط ارتجاعی، کاهش می‌یابد از این رو می‌توان مقدار  $T_{eff}$  را با فرض  $A_d = 0$  محاسبه نمود.

$$\beta_{veff} = \beta_i + \beta_V \left( \frac{T_{eff}}{T_e} \right)^{2-\alpha} \quad (28-3)$$

$$T_{eff} = 2\pi \left( \frac{D}{A + A_d} \right)^{1/2} \quad (29-3)$$

$$A = A_y + \alpha \frac{A_y}{D_y} (D - D_y) \quad (30-3)$$

لازم به ذکر است که در رابطه (۲۶-۳) برای تعیین سهم نیروی بازگرداننده یا نیرویی ارتجاعی در شتاب حداکثر ارائه شده است و مقدار ضریب حاصل از آن، برای رفتار ارتجاعی وقتی  $D < D_y$  است معتبر است. در شرایطی که رفتار در محدوده غیر ارتجاعی مورد بحث قرار می‌گیرد، ضریب  $C_{mFD}$  افزایش یافته تا در نهایت به حداکثر مقدار یک (۱) همگرا می‌شود. به عبارت دیگر شتاب حداکثر همانطور که در شکل (۳-۱۵) ملاحظه می‌شود در مقدار  $u = D \cos \delta$  اتفاق می‌افتد. همچنین، نسبت میرایی ویسکوز موثر با رفتار غیرارتجاعی افزایش می‌یابد، در نتیجه می‌توان نشان داد که:



$$A_{\max} = A \left( C_{mFD} + \frac{2\pi\beta_{veff}}{\lambda} C_{mFV} \right) \quad (31-3)$$

که در آن:

$$\text{if } D < D_y, \quad C_{mFD} = \cos \delta$$

$$\text{if } D > D_y \text{ and } \mu \cdot \cos \delta < 1 \quad C_{mFD} = \mu \cdot \cos \delta \quad (32-3)$$

$$\text{if } D > D_y \text{ and } \mu \cdot \cos \delta \geq 1, \quad C_{mFD} = 1.0$$

$$\mu = \frac{D}{D_y} \quad (33-3)$$

### ۳-۴ بهسازی لرزه‌ای ساختمان‌های موجود با استفاده از میراگرها

مدلسازی و تحلیل سازه‌های موجود که با استفاده از ابزارهای اتلاف انرژی بهسازی خواهند شد، در برگیرنده ضوابطی است که به طور کامل در فصل دوم دستورالعمل حاضر ارائه شد. در این بخش، به جزئیات مرتبط با روش‌های تحلیل که ممکن است در مورد این سازه‌ها به کار رود، و مبانی محاسباتی متناظر با آن‌ها، اشاره می‌شود.

#### ۳-۴-۱ روش‌های تحلیل خطی

سختی میراگر و تکیه‌گاه نگه‌دارنده آن باید در مدلسازی ریاضی مدنظر قرار گیرد تا بتوان مشخصات دینامیکی دقیق ساختمان را استخراج نمود. با حذف اثر سختی اضافه شده به ساختمان ناشی از حضور میراگر ممکن است تغییر مکان طیفی مورد نیاز به طور دست بالا، نیروهای طیفی مورد نیاز به طور دست پائین و ضرایب میرایی مودی به صورت غلط تخمین زده شوند. سختی سکانتی باید برای خطی‌سازی رفتار میراگر به کار رود. این فرض یک فرض محافظه کارانه است زیرا تغییر مکان‌ها دست بالا تقریب زده خواهند شد و مزایای بهره‌گیری از میراگر به صورت دست پائین ارزیابی خواهند شد. علاوه بر این، مدل تحلیلی برای ساختمان باید توزیع میراگرها را در پلان و در ارتفاع مدنظر قرار دهد تا بتوان ارزیابی دقیقی از مسیر بار و نیروهای طراحی در اعضای نزدیک به میراگر انجام داد.



رفتار میراگرهای وابسته به سرعت ممکن است به فرکانس بارگذاری، درجه حرارت، تغییرشکل یا کرنش، سرعت، میزان سربار و بارهای دوجبهته وابسته باشد. این وابستگی باید در مرحله تحلیل با انجام تحلیل‌های متعدد روی ساختمان و با تغییر در پارامترهای تعیین کننده مورد توجه قرار گیرد.

### ۳-۴-۱-۱ روش خطی استاتیکی

#### الف) میراگرهای وابسته به تغییرمکان

دو محدودیت اصلی در استفاده از روش خطی استاتیکی در بهسازی لرزه‌ای سازه موجود در بهره‌گیری از میراگرهای وابسته به تغییرمکان وجود دارد. اولین محدودیت عبارتست از:

"نسبت حداکثر مقاومت در هر طبقه، در راستای مورد نظر، به نیاز طراحی برای برش که از روابط (۲-۸) محاسبه شده‌است، باید در محدوده بین ۸۰ تا ۱۲۰ درصد مقدار متوسط نسبت مورد اشاره باشد. حداکثر مقاومت طبقه باید مشارکت تمام اجزاء، المانها و میراگرها را در بر گیرد."

این محدودیت به این منظور بنا نهاده شده تا از رخدادن تسلیم در طبقات یک قاب ساختمانی به صورت یکنواخت اطمینان حاصل شود و از تمرکز خرابی در یک یا چند طبقه خاص پرهیز شود. انجام تحلیل پلاستیک برای طبقات ساختمان (شامل میراگرها و ابزارهای اتلاف انرژی) بهترین روش توصیه شده برای محاسبه مقاومت حداکثر هر طبقه است.

محدودیت دوم عبارتست از:

"حداکثر مقاومت ایجاد شده توسط تمام میراگرها در یک طبقه، در راستای مورد نظر، نباید از ۵۰ درصد مقاومت ایجاد شده توسط سایر اجزای طبقه تجاوز کند. لازم به ذکر است که این مقاومت باید در تغییرمکانهای ناشی از زلزله سطح خطر ۲ محاسبه شوند. آثار محیطی و عمر اجزا باید در محاسبه مقاومت حداکثر میراگرها مورد توجه قرار گیرد."

این محدودیت به این منظور تعریف شده است که تاثیر میراگرها در پاسخ کلی یک ساختمان را محدود نماید. به عبارت دیگر، محدودیت دوم مقاومت میراگرها را در هر طبقه به حدود یک-سوم مقاومت کل آن طبقه از قاب ساختمانی با حضور میراگرها، تقلیل می‌دهد.



براساس محدودیت ۳۰ درصد در نظر گرفته شده برای حداکثر میرائی ویسکوز موثر تامین شده در ساختمانها (که ناشی از میرایی ذاتی و میرایی حاصل از میراگر است)، میزان میرائی افزوده شده به واسطه میراگرهای وابسته به تغییر مکان، به این منظور به کار گرفته می شود که بارهای pseudo lateral متناظر با معادله (۸-۲) با استفاده از ضرایب اصلاح ارائه شده در جدول (۱-۲) کاهش داده شود. محاسبات مرتبط با تاثیر میرائی به صورت زیر در نظر گرفته می شود:

۱- بار pseudo lateral اصلاح شده، براساس مقدار بار  $V$  محاسبه شده از رابطه (۸-۲) و با در نظر گرفتن ضریب اصلاح میرائی  $B$  (که به عنوان  $B_s$  یا  $B_1$  و متناظر با میرائی موثر در نظر گرفته شده برای ساختمان، براساس جدول (۱-۲) تعیین می شود) تخمین زده می شود.

۲- نیروهای افقی براساس روابط (۸-۲) برای توزیع  $V$  اصلاح شده، تعیین می شوند.

۳- تغییر مکان جانبی  $\delta_i$  در تراز کف  $i$  با تحلیل خطی مدل ریاضی، که بارهای افقی  $F_x$  در آن وارد شده است، محاسبه می شود.

۴- با مشخص بودن مقادیر  $\delta_i$ ، میزان میرائی موثر،  $\beta_{eff}$ ، با استفاده از رابطه زیر تخمین زده می شود.

$$\beta_{eff} = \beta + \frac{\sum W_j}{4\pi W_k} \quad (3-34)$$

که در آن،  $\beta$  میرائی قاب ساختمانی است و در صورتیکه براساس محاسبات دقیق تعیین نشده باشد، برابر با ۰/۰۵ در نظر گرفته می شود،  $W_j$  کاری است که توسط میراگر زام در یک چرخه کامل و در تغییر مکان متناظر با طبقه  $i$ ام،  $\delta_i$  انجام می شود و جمع آن روی تمام میراگرها ( $j$ ) برای هر طبقه انجام می شود،  $W_k$  نیز حداکثر انرژی کرنشی در قاب است که از رابطه زیر بدست می آید:

$$W_k = \frac{I}{2} \sum_i F_i \delta_i \quad (3-35)$$

۵- گامهای ۱ تا ۴ به نحوی تکرار می شوند که مقدار میرائی موثر فرض شده در ابتدای محاسبات (گام ۱) برابر با میزان میرایی موثر حاصل شده از محاسبات گام ۴ باشد.





### ب) میراگرهای وابسته به سرعت

در استفاده از روش تحلیل خطی استاتیکی برای بهسازی لرزه‌ای ساختمان‌های موجود با استفاده از میراگرهای وابسته به سرعت، محدودیتی به این شرح وجود دارد:

"حداکثر مقاومت میراگر در یک طبقه، در راستای مورد نظر، نباید از ۵۰ درصد مقاومت سایر اجزای سازه در آن طبقه تجاوز نماید. لازم به ذکر است که مقاومت مورد اشاره براساس تغییرمکانهای ایجادشده در زلزله سطح خطر ۲ محاسبه شده‌اند. آثار محیطی و عمر قطعات باید در محاسبات مرتبط با میراگر لحاظ شود." این محدودیت از این جهت وارد شده است که بتواند تاثیر میراگر روی پاسخ ساختمان را محدود نماید. به عبارت دیگر، این محدودیت، مشارکت مقاومت میراگر را در مقاومت یک طبقه به یک-سوم مقاومت آن طبقه (ضمن در نظر گرفتن میراگرها) تقلیل می‌دهد.

براساس محدودیت ۳۰ درصد در نظر گرفته شده برای حداکثر میرایی ویسکوز موثر تامین شده در ساختمانها (که ناشی از میرایی ذاتی و میرایی حاصل از میراگر است)، میزان میرایی افزوده شده به واسطه میراگرهای وابسته به سرعت، به این منظور به کار گرفته می‌شود که بارهای pseudo lateral متناظر با معادله (۸-۲) با استفاده از ضرایب اصلاح ارائه شده در جدول (۱-۲) دستورالعمل کاهش داده شود. محاسبات مرتبط با تاثیر میرایی به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود:

۱- بار pseudo lateral اصلاح شده، براساس مقدار بار  $V$  محاسبه شده از رابطه (۸-۲) و با در نظر گرفتن ضریب اصلاح میرایی  $B$  (که به عنوان  $B_s$  یا  $B_1$  و متناظر با میرایی موثر در نظر گرفته شده برای ساختمان، براساس جدول (۱-۲) تعیین می‌شود) تخمین زده می‌شود.

۲- نیروهای افقی براساس روابط (۸-۲) برای توزیع برش  $V$  اصلاح شده، تعیین می‌شوند.

۳- تغییرمکان جانبی  $\delta_i$  در تراز کف  $i$  با تحلیل خطی مدل ریاضی، که بارهای افقی  $F_x$  در آن وارد شده است، محاسبه می‌شود.

۴- با مشخص بودن مقادیر  $\delta_i$ ، میزان میرایی موثر،  $\beta_{eff}$ ، با استفاده از رابطه زیر تخمین زده می‌شود.



$$\beta_{eff} = \beta + \frac{\sum_j W_j}{4\pi W_k} \quad (3-36)$$

که در آن،  $\beta$  میرائی قاب ساختمانی است و در صورتیکه براساس محاسبات دقیق تعیین نشده باشد، برابر با ۰/۰۵ در نظر گرفته می‌شود،  $W_j$  کاری است که توسط میراگر زام در یک چرخه کامل و در تغییرمکان متناظر با طبقه  $i$ ام،  $\delta_i$ ، انجام می‌شود و جمع آن روی تمام میراگرها ( $j$ ) برای هر طبقه انجام می‌شود،  $W_k$  نیز حداکثر انرژی کرنشی در قاب است که از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$W_k = \frac{1}{2} \sum_i F_i \delta_i \quad (3-37)$$

$$W_j = \frac{2\pi^2}{T} C_j \delta_{ij}^2 \quad (3-38)$$

کار انجام شده توسط میراگر  $z$  در یک چرخه کامل از رابطه (۳-۳۸) تعیین می‌شود که در آن،  $T$  زمان تناوب اصلی ساختمان با در نظر گرفتن سختی میراگرهای وابسته به سرعت است،  $C_j$  مقدار ثابت میرائی برای میراگر  $z$  است و  $\delta_{ij}$  تغییرمکان نسبی بین لبه های میراگر  $z$  است.

۵- گامهای ۱ تا ۴ باید تا زمانی تکرار شوند که مقدار میرائی موثر فرض شده در ابتدای محاسبات (گام ۱) برابر با میزان میرایی موثر حاصل شده از محاسبات گام ۴ باشد.

محاسبه نیروها در اعضای ساختمان دارای میراگرهای وابسته به سرعت، به دلیل اینکه مولفه ویسکوز نیروها به طور مستقیم در نظر گرفته نشده است، فرآیند پیچیده‌ای خواهد داشت. با توجه به عدم هم‌زمانی رخدادن مقادیر حداکثر تغییرمکان، سرعت و شتاب، حداکثر نیروی اعضا ممکن است در یکی از سه حالت کلی حداکثر تغییرمکان، حداکثر سرعت و حداکثر شتاب رخ دهد. تمامی این سه سطح باید برای سازه‌های دارای میراگرهای وابسته به سرعت کنترل شوند. برای سیستم‌های میراگر وابسته به تغییرمکان، سطوح اول و دوم تعیین کننده‌اند و امکان صرف نظر از سطح سوم وجود دارد.

نیروهای ویسکوز در وضعیت حداکثر سرعت، بیشترین مقدار خود را خواهند داشت. مولفه های افقی این نیروهای ویسکوز با نیروهای اینرسی خنثی می‌شوند به نحوی که تغییرمکان‌های جانبی برابر با صفر می‌شود.



نیروهای ویسکوز باعث بوجود آمدن نیروهای محوری در ستونهای نگه‌دارنده میراگرهای ویسکوز می‌شوند. شدت این نیروهای محوری به (الف) مقدار میرائی افزوده‌شده به واسطه میراگرها و (ب) تعداد میراگرهایی که برای رسیدن به سطح میرای هدف مورد استفاده قرار گرفته‌اند وابسته است.

وضعیت متناظر با بیشترین شتاب، به این صورت تعیین می‌شود که فرض بر آن است که ساختمان تحت حرکت هارمونیک با فرکانس  $f_1$  و دامنه‌ای متناظر با حداکثر تغییرمکان نسبی قرار دارد. در این شرایط، حداکثر شتاب برابر خواهد بود با میزان شتاب متناظر با بیشترین تغییرمکان  $(C_{mFV} + 2\beta_{eff}C_{mFD})$ . براساس تحقیقات موجود، این رابطه نتایج قابل قبولی ارائه می‌دهد. لازم به ذکر است که استفاده از فرض  $C_{mFD} = C_{mFV} = 1$  به نتایج محافظه‌کارانه‌ای در خصوص نیروی اعضا منجر خواهد شد. ضرایب نیرویی  $C_{mFD}$  و  $C_{mFV}$  برای ترکیب آثار سطوح حداکثر تغییرمکان و حداکثر سرعت در محاسبه نیروها در سطح حداکثر شتاب، تعریف و استفاده می‌شوند. این ضرایب، به صورت عددی و در قالب جداولی براساس محاسبات عددی پیشنهادی توسط Ramirez et al. (2001) ارائه شده‌اند و برای رفتار غیرخطی ویسکوز و رفتار غیرالاستیک سازه‌ای معتبرند. نحوه محاسبه این ضرایب نیز به شرح اشاره شده در بند ۳-۵-۲ می‌باشد.

### ۳-۴-۱-۲ روش دینامیکی خطی

اصلی‌ترین تاثیر افزودن میرائی و سختی به سازه، با استفاده از میراگرها، کاهش در تغییرمکان ناشی از (۱) کاهش در دوره تناوب اصلی ساختمان و (۲) نیازهای نیروئی کمتر ناشی از میرائی بیشتر خواهد بود.

### الف) میراگرهای وابسته به تغییرمکان

به منظور محاسبه ضرایب میرائی مودال می‌توان معادله (۳-۲) را با استفاده از ارائه تخمین‌هایی از کار انجام‌شده با میراگرها و انرژی کرنشی مودال مرتبط اصلاح نمود. با توجه به اینکه تغییرمکان ساختمان با تغییرمکان مود اول شناخته می‌شود، در این روش میرائی مود اول به نحوی اصلاح می‌شود که بیانگر میزان انرژی تلف شده توسط میراگر باشد و از تاثیر استفاده از میراگر در مودهای دیگر صرفنظر می‌شود.



### ب) میراگرهای وابسته به سرعت

معادلات (۳-۳۶) تا (۳-۳۸) برای محاسبه ضرایب میرائی مودالی که بیانگر میرایی افزوده شده به سازه دارای میراگر هستند، به کار می‌روند. نیروهای طراحی لرزه‌ای باید با استفاده از ضرایب میرائی مودال اصلاح شده تعیین شوند. با توجه به اینکه تغییرمکان سازه بیشترین نزدیکی را به تغییرمکان مود اول دارد، بهترین راه، روشی است که در آن، ضریب میرایی مود اول به نحوی اصلاح شود که میزان انرژی تلف شده بواسطه استفاده از میراگرها مدنظر قرار گرفته و از آثار و مزایای بهره‌گیری از میراگرها، در موده‌های دیگر صرفنظر شود.

### ۳-۴-۲ روش‌های غیرخطی

#### ۳-۴-۲-۱ روش استاتیکی غیرخطی

روش متداول برای انجام تحلیل غیرخطی استاتیکی روش تغییرمکان هدف است. به علاوه، در سازه‌های دارای میراگر می‌توان از روش منحنی‌های ظرفیت نیز (در موارد خاص) استفاده کرد. اصلی‌ترین تفاوت این دو روش در تعیین مقدار تغییرمکان هدف است. در روش تغییرمکان هدف، این تغییرمکان با استفاده از مجموعه‌ای از ضرایب و با یک تخمین خطی روی تغییرمکان مود اول ساختمان محاسبه می‌شود. روش طیف ظرفیت روشی تکراری است که تغییرمکان هدف را به عنوان نقطه مشترک دو منحنی ظرفیت طیفی (spectral capacity curve) که از نظر مفهومی مشابه منحنی pushover است، و منحنی نیاز طراحی تعیین می‌نماید. منحنی نیاز طراحی از طیف پاسخ الاستیک با فرض میرایی متناظر با انرژی تلف شده در یک چرخه بارگذاری تا تغییرمکان هدف تعریف می‌شود.

#### ۳-۴-۲-۱-۱ روش تغییرمکان هدف

#### الف) میراگرهای وابسته به تغییرمکان

مزایای بهره‌گیری از میراگرهای وابسته به تغییرمکان در افزایش سختی ساختمان و کاهش تغییرمکان هدف همراه با کاهش در زمان تناوب  $T_e$  مشهود است.



محاسبه تغییرمکان هدف براساس رابطه آماری بین تغییرمکان یک سیستم الاستیک یک درجه آزادی (SDOF) و تغییرمکان سیستم غیرالاستیک مشابه آن تعریف می‌شود. بدیهی است که اتلاف انرژی چرخه‌ای در سیستم غیرالاستیک باعث کاهش در تغییرمکان متناظر با سیستم الاستیک مشابه آن می‌شود. همانطور که اشاره شد، میزان انرژی مستهلک شده در یک میراگر وابسته به تغییرمکان مشابه با مقدار انرژی مستهلک شده در یک shear link در یک مهاربند هم‌محور است. در shear link مهاربند هم‌محور، استهلاک انرژی در لینک برشی به طور مستقیم در محاسبه تغییرمکان هدف لحاظ نشده است. علاوه بر این، افزایش سختی و کاهش دوره تناوب ناشی از افزودن قاب مهاربندی شده به نیازهای تغییرمکانی کمتری منجر می‌شود. چنین منطقی در میراگرهای وابسته به تغییرمکان نیز به کار گرفته می‌شود.

#### ب) میراگرهای وابسته به سرعت

تغییرمکان هدف به دلیل میرایی افزوده شده در سیستم ناشی از حضور میراگرهای وابسته به سرعت کاهش می‌یابد. محاسبه تاثیرات میرایی می‌تواند به شرح زیر باشد:

- ۱) میرایی موثر در ساختمان، شامل میرایی افزوده شده توسط میراگرها، به صورت اولیه حدس زده می‌شود.
- ۲) تغییرمکان هدف اصلاح شده با استفاده از رابطه (۲-۲۲) و ضریب اصلاح میرایی متناظر با میزان میرایی محاسبه شده در گام ۱، از جدول (۲-۱) استخراج شده و محاسبه می‌شود.
- ۳) نیروهای جانبی وارده در مدل ریاضی ساختمان، تا زمانی که به تغییرمکان هدف برسد، وارد می‌شود. نیروها و تغییرمکان‌های تجمعی در تراز هر طبقه ( $F_i$  و  $\delta_i$  برای طبقه  $i$ ام) در تغییرمکان هدف محاسبه می‌شوند. تغییرمکان‌های محوری بین هر دو میراگر ( $\delta_{Tj}$  برای میراگر  $j$ ) به صورت تجمعی محاسبه می‌شود.
- ۴) با در دست بودن مقدار تغییرمکان  $\delta_i$ ، میزان میرایی موثر،  $\beta_{eff}$  محاسبه می‌شود:

$$\beta_{eff} = \beta + \frac{\sum_j W_j \cos^2 \theta_j}{4\pi W_k} \quad (3-39)$$

که در آن،  $\beta$  میرایی قاب ساختمانی است و در شرایطی که براساس مطالب بخش‌های پیشین تعیین نشده باشد، برابر با ۰/۰۵ تعیین می‌شود،  $W_j$  کار انجام شده توسط میراگر  $j$  در یک چرخه کامل متناظر با تغییرمکان



$\delta_i$  است،  $\theta_i$  زاویه انحراف میراگر ز نسبت به افق است و  $W_k$  حداکثر انرژی کرنشی در قاب است که از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$W_k = \frac{1}{2} \sum_i F_i \delta_i \quad (3-40)$$

کار انجام شده توسط میراگر ز در یک چرخه کامل بارگذاری را می‌توان از رابطه زیر محاسبه کرد:

$$W_j = \frac{2\pi^2}{T_s} C_j \delta_{rj}^2 \quad (3-41)$$

که در آن،  $T_s$  دوره تناوب سکانتی اصلی ساختمان با در نظر گرفتن میراگرهای وابسته به سرعت است که براساس رابطه (۲-۲۳) محاسبه شده ولی در تغییرمکان هدف سختی موثر آن،  $K_e$ ، با سختی سکانتی،  $K_s$ ، جایگزین شده است،  $C_j$  ثابت میرائی برای میراگر زام است و  $\delta_{rj}$  تغییرمکان نسبی بین دو انتهای میراگر زام در راستای مورد بررسی، در شرایطی که تغییرمکان سقف به تغییرمکان هدف برسد، می‌باشد.

(۵) گامهای ۱ تا ۴ باید تا زمانی که میرایی موثر فرض شده در گام ۱ با میرایی موثر محاسبه شده از گام ۴ یکسان شود، ادامه یابد.

حداکثر نیروها در قاب ساختمانی باید در سه مرحله محاسبه شود: حداکثر تغییرمکان نسبی، حداکثر سرعت و حداکثر شتاب. محاسبات مولفه‌های نیرویی و تغییرمکانی در شرایط حداکثر تغییرمکان متداول است. در شرایط حداکثر سرعت و شتاب نیز، محاسبات مشابهی باید انجام شود که البته اندکی پیچیده است و نیازمند مدل‌های تحلیلی بیشتری است. گامهای محاسباتی این روش به شرح زیر تعریف می‌شود. این الگوریتم برای هر دو روش قابل اجراست.

۱- در ابتدا سختی سکانتی تمامی اجزاء و المان‌های قاب ساختمانی در تغییرمکان هدف مشخص می‌شود. پس از آن، سختی الاستیک تمامی اجزاء و المان‌ها با سختی سکانتی محاسبه شده جایگزین می‌شود. براساس تحلیل مقادیر ویژه قاب ساختمانی، فرکانس‌ها و شکل‌های مودی تعیین می‌شود. دوره تناوب مود اول باید مشابه با دوره تناوب سکانتی باشد. با استفاده از طیف طرح، تحلیل طیفی براساس فرکانس‌ها و شکل‌های مودی انجام می‌شود و حداکثر تغییرمکان بام با استفاده از قوانین ترکیب مودها (مانند SRSS) محاسبه



می‌شود. با استفاده از مقیاس کردن تغییرمکان‌های مودال به نسبت تغییرمکان هدف به تغییرمکان بام، تغییرمکان‌های مودی در تراز کف‌های ساختمان اصلاح می‌شود

۲- نیروهای مودی در هر المان و جزئی از قاب ساختمانی در شرایط حداکثر تغییرمکان نسبی محاسبه می‌شود. مولفه‌های مختلف نیرویی حاصل از مودهای مختلف سپس براساس قواعد ترکیب مودها با هم ترکیب می‌شوند.

۳- نیروی میرایی ویسکوز در هر میراگر وابسته به سرعت، با استفاده از تغییرمکان‌های نسبی و فرکانس‌های مودال محاسبه می‌شود.

۴- برای هر مود پاسخ، نیروی میرایی ویسکوز محاسبه شده در مدل ریاضی ساختمان و در محل اتصال میراگر و در جهت‌های سازگار با آن شکل مودی، وارد می‌شود.

۵- برای هر مود پاسخ، نیروهای اینرسی افقی در تمام ترازهای طبقه از مدل ریاضی قاب ساختمانی و همراه با نیروهای ویسکوز مودی وارد می‌شود، به همین دلیل تغییرمکان افقی در تراز هر طبقه صفر است.

۶- مولفه‌های نیرویی مودال حاصل از اعمال نیروهای اینرسی و ویسکوز محاسبه می‌شود. این نیروها براساس قواعد ترکیب مودها با یکدیگر ترکیب می‌شوند.

۷- نیروهای مودال در شرایط شتاب حداکثر به صورت ترکیبی خطی از نیروهای ناشی از تغییرمکان (گام ۲) با ضرب در پارامتر  $C_{mFD}$  و نیروهای ناشی از اثرات ویسکوز (گام ۶) با ضرب در پارامتر  $C_{mFV}$  تعیین می‌شود. برای هر مود پاسخ، ضرایب  $C_{mFD}$  و  $C_{mFV}$  باید براساس الف) میزان میرایی موثر مودی و ب) معادلات (۳-۳) و (۳۴-۳) تعیین شود. مولفه نیروی مودی برآیند باید با استفاده از یک قاعده مناسب ترکیب و تعیین شود تا بتوان مولفه‌های مختلف را در تعیین نیروهای طراحی در نظر گرفت. نیروهای طراحی باید برابر یا بیشتر از نیروهای حاصل از شرایط تغییرمکانی باشند.

۸- نیروهای طراحی به عنوان حداکثر نیروهای تعیین شده در شرایط حداکثر تغییرمکان نسبی، حداکثر سرعت و حداکثر شتاب تعیین می‌شوند.



ارزیابی اعضای کنترل‌شونده توسط تغییرمکان باید براساس تغییرمکان هدف انجام شود. ارزیابی اعضای کنترل‌شونده توسط نیرو نیز باید براساس حداکثر نیروهای بوجود آمده در اعضا براساس ضوابط بند ۸ فوق صورت پذیرد. ابزارهای اتلاف انرژی یا میراگرها نیز باید براساس اطلاعات آزمایشگاهی ارزیابی شوند.

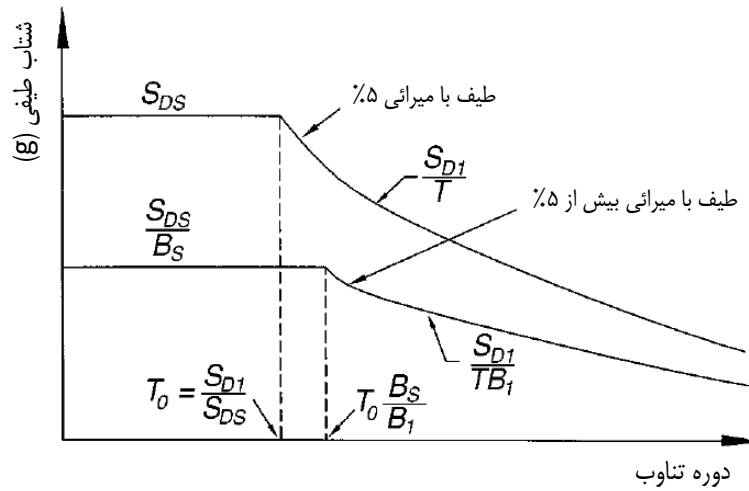
### ۳-۴-۱-۲ روش طیف ظرفیت

در روش طیف ظرفیت تغییرمکان هدف در ساختمان، با استفاده از منحنی ظرفیت طیفی<sup>۱</sup> (به عنوان یک مشخصه از ساختمان) بر روی منحنی نیاز طراحی (on the design demand curve) تعیین می‌شود. منحنی ظرفیت طیفی دربرگیرنده رابطه بین برش پایه و تغییرمکان بام در ساختمان است. پاسخ طیفی pseudo-acceleration که با میرایی ۵٪ میرا شده‌است، پس از اصلاح شدن برای میزان میرایی موثر ساختمان ناشی از رفتارهای غیرالاستیک سیستم باربر لرزه‌ای، بدون در نظر گرفتن میراگرها، برای بدست آوردن منحنی نیاز طراحی به کار می‌رود و میزان میرایی افزوده‌شده، توسط میراگرها تعیین می‌شود.

در روش طیف ظرفیت، از تغییرمکان‌های کلی قاب،  $\Delta$ ، استفاده می‌شود و تغییرمکان‌های محلی،  $\delta$ ، در محاسبات آن به کار نمی‌رود.

**الف) منحنی نیاز طراحی:** پاسخ طیفی میراشده با میرایی ۵ درصد تهیه می‌شود. برای استفاده از روش طیف ظرفیت برای ارزیابی ساختمان‌ها، طیف میراشده با میرایی ۵ درصد برای در نظر گرفتن میرایی در ساختمان دارای میراگر، اصلاح می‌شود. این طیف با تقسیم پارامترهای شتاب طیف ۵ درصد بر ضرایب اصلاح میرایی  $B_s$  یا  $B_1$ ، که بسته به دوره تناوب سازه و میزان میرایی آن متفاوت خواهد بود، اصلاح می‌شود. این پارامترها در جدول (۱-۲) ارائه شده‌است. در شکل (۳-۱۶) نحوه تولید چنین طیف پاسخی از طیف ۵ درصد متناظر آن نشان داده شده‌است. منحنی نیاز طراحی اصلاح‌شده نیز با تعیین رابطه بین شتاب طیفی و تغییرمکان نسبی برای ساختمان در تراز میرایی متناظر با میرایی موثر ساختمان بدست می‌آید.





$B_S$ : ضریب کاهش در دوره تناوب‌های کوتاه:  
 $B_1$ : ضریب کاهش در دوره تناوب‌های بلند:

شکل (۳-۱۶) تهیه طیف پاسخ برای میرایی‌های بیشتر از ۵ درصد

(ب) منحنی ظرفیت طیفی: منحنی push-over براساس برش پایه (محور قائم) و تغییرمکان تراز بام (محور افقی) تعریف می‌شود.

برای کنترل طرح ساختمان منحنی ظرفیت طیفی براساس طیف نیاز تعریف می‌شود. منحنی ظرفیت طیفی را می‌توان براساس شتاب طیفی ( $S_a$ ) و تغییرمکان طیفی ( $S_d$ ) تعریف نمود. منحنی ظرفیت طیفی همچنین می‌تواند از تحلیل push-over ساختمان، به روش زیر حاصل شود:

۱- در گام‌های تغییرمکانی انتخاب شده برای تحلیل push-over، شکل مودی اصلی ساختمان تعیین می‌شود. این شکل مودی می‌تواند با انجام تحلیل مقادیر ویژه روی ساختمان با در نظر گرفتن سختی سکانتی اعضای قاب ساختمانی، در سطح تغییرمکان مورد نظر، حاصل شود یا با انتخاب یک شکل مودی با تغییرمکان‌هایی متناظر با تغییرمکان درجه آزادی  $i$  ام در سطح تغییرمکان مورد نظر، به نحوی که مقدار تغییرمکان مودی در تراز قائم  $\phi_i$  برابر با  $\delta_i$  باشد، تعیین شود.

۲- شتاب طیفی به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$S_a = \frac{V}{W_{sm}} g \quad (۳-۴۲)$$



که در آن،  $V$  برش پایه در روش استاتیکی غیرخطی است و  $W_{sm}$  از معادله (۴۳-۳) با استفاده از مقادیر تغییرمکانی شکل مودی فرضی محاسبه شده است.

$$W_{sm} = \frac{\left( \sum_{i=1} W_i \phi_{im} \right)}{\sum_{i=1} W_i \phi_{im}^2} \quad (43-3)$$

۳- تغییرمکان طیفی به صورت زیر محاسبه می شود:

$$S_d = \frac{\delta_i}{\phi_{rm} \Gamma_{rm}} \quad (44-3)$$

که در آن  $\delta_r$  تغییرمکان تراز بام است که از تحلیل push-over محاسبه شده است،  $\phi_{rm}$  میزان شکل مودی در سقف است و  $\Gamma_m$  هم، ضریب مشارکت مودی برای شکل مودی فرضی است که از رابطه (۳-۴۵) بدست آمده است.

$$V_m = \frac{W_{sm} S_{am}}{g} \quad (45-3)$$

**ج) میرائی موثر ساختمان:** مقدار میرائی موثر در یک ساختمان باید به نحوی محاسبه شود که با منحنی نیاز طراحی در انطباق باشد. به طور کلی، میرائی موثر باید مستقل از سطح تغییرمکانی متناظر با تغییرشکل های سیستم قاب ساختمانی باشد.

$$\beta_{eff} = \frac{W_D}{4\pi W_k} + \beta \quad (46-3)$$

که در آن،  $W_D$  میزان انرژی مستهلک شده در ساختمان ب (با در نظر گرفتن حضور میراگرها) در یک چرخه حرکت است. عبارت  $W_k$  نیز میزان انرژی کرنشی ذخیره شده در ساختمان در تغییرمکانی برابر با تغییرمکان متناظر با  $W_D$  است.

در تحلیل push-over، نیروهای جانبی  $F_i$  (که به طور معمول تابعی از مقادیر تغییرمکانی هستند) بر وزن های موثر فعال ( $W_i$ ) موجود در درجات آزادی  $i$  وارد می شوند که تغییرمکان های متناظر با آنها برابر با  $\delta_i$  است. میزان انرژی کرنشی بوجود آمده در ساختمان را می توان از رابطه (۳-۴۷) بدست آورد:



$$W_k = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N F_i \delta_i \quad (۴۷-۳)$$

میزان انرژی تلف شده باید براساس یک چرخه کامل حرکتی در تغییرمکانی برابر با تغییرمکانی که در آن میزان انرژی کرنشی محاسبه شده است، محاسبه شود که آنرا می توان از رابطه زیر یافت:

$$W_D = W_{DS} + W_{DE} \quad (۴۸-۳)$$

که در آن،  $W_{DS}$  میزان انرژی تلف شده در قاب ساختمانی، مستقل از میراگرهاست، و  $W_{DE}$  انرژی تلف شده توسط میراگرهاست که می تواند وابسته به تغییرمکان یا وابسته به نیرو باشد. برای میراگرهای وابسته به نیرو، انرژی تلف شده باید برای یک چرخه کامل حرکتی برای تغییرمکان تراز بام با شدتی برابر با  $\delta_r$  و در فرکانسی متناظر با دوره تناوب سکانتی ساختمان محاسبه شود. این دوره تناوب سکانتی را می توان از مساوی قرار دادن حداکثر انرژی جنبشی و انرژی کرنشی در ساختمان بدست آورد:

$$T_s = 2\pi \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N W_i \delta_i^2}{g \sum_{i=1}^N F_i \delta_i}} \quad (۴۹-۳)$$

برای یک سیستم یک درجه آزاد، معادله (۴۹-۳) به صورت زیر ساده می شود:

$$T_s = 2\pi \sqrt{\frac{D_m}{V}} \quad (۵۰-۳)$$

که در آن،  $D$  تغییرمکان جرم  $m$  است و  $V$  برابر با میزان برش پایه متناظر با تغییرمکان  $D$  است.

**د) تحلیل ساختمان های دارای میراگرهای وابسته به تغییرمکان:** میراگرهای وابسته به تغییرمکان باید به صورت دقیق در مدل های ریاضی مرتبط با ساختمان ها، با المان های دارای رفتار دوخطی، الاستو-پلاستیک یا پلاستیک-صلب (اصطکاکی) مدل شوند.

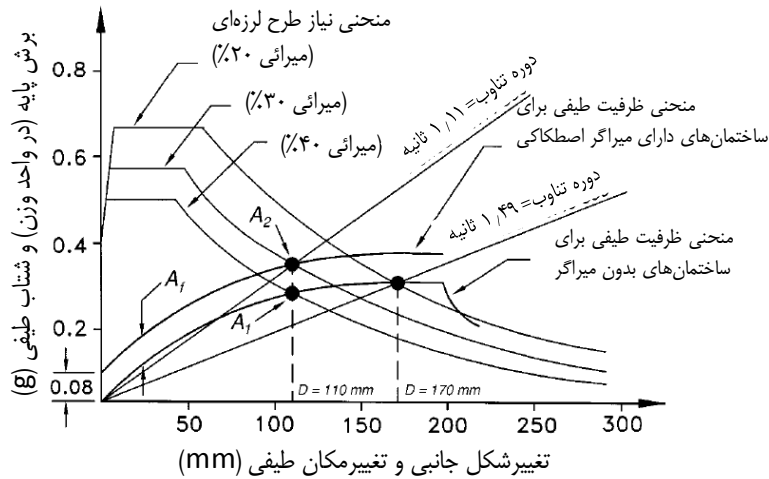
استفاده از روش طیف ظرفیت، برای میراگرهای hysteretic با تحلیل یک ساختمان یک طبقه دارای میراگرهای اصطکاکی انجام می شود.



برای یک ساختمان یک طبقه، منحنی‌های push-over و ظرفیت طیفی یکسان‌اند، یعنی:

$$N=1, \phi_{Im} = 1, \delta_l = \delta_r = D, \Gamma_l = 1, W_{sm}=W_1, S_a=V_g/W_1, S_d=D$$

منحنی ظرفیت طیفی محاسبه شده برای ساختمان نمونه، برای میرائی‌های ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درصد، در شکل (۱۷-۳) نشان داده شده است.



شکل (۱۷-۳) ظرفیت و نیاز طیفی برای یک ساختمان بهسازی شده یک طبقه

اولین گام در فرآیند تحلیل، محاسبه موارد زیر است:

(۱) رابطه نیرو-تغییرمکان ساختمان در شرایط قبل از حضور میراگرها، با استفاده از تحلیل push-over، (۲)

میزان میرائی موثر در ساختمان (با استفاده از رابطه (۳-۴۶) و رابطه نیرو-تغییرمکان). میزان میرائی موثر را

می‌توان در حلقه‌های لرزه‌ای دو خطی به صورت زیر در نظر گرفت:

میزان مساحتی که در یک حلقه لرزه‌ای احاطه می‌شود به طور دقیق مشخص نیست ولی فرض بر این است

که این مقدار، درصدی از مقدار مساحت مدل دو خطی چرخه‌ای ایده‌آل خواهد بود که برای تفسیر نمودار

Push-over محاسبه شده به کار می‌رود. برای یک سیستم دو خطی، که در آن شتاب طیفی در تغییرمکان  $D$

با  $A$  نشان داده شده و شتاب طیفی در تغییرمکان تسلیم،  $D_y$ ، با  $A_y$  معرفی می‌گردد، میرایی موثر می‌تواند به

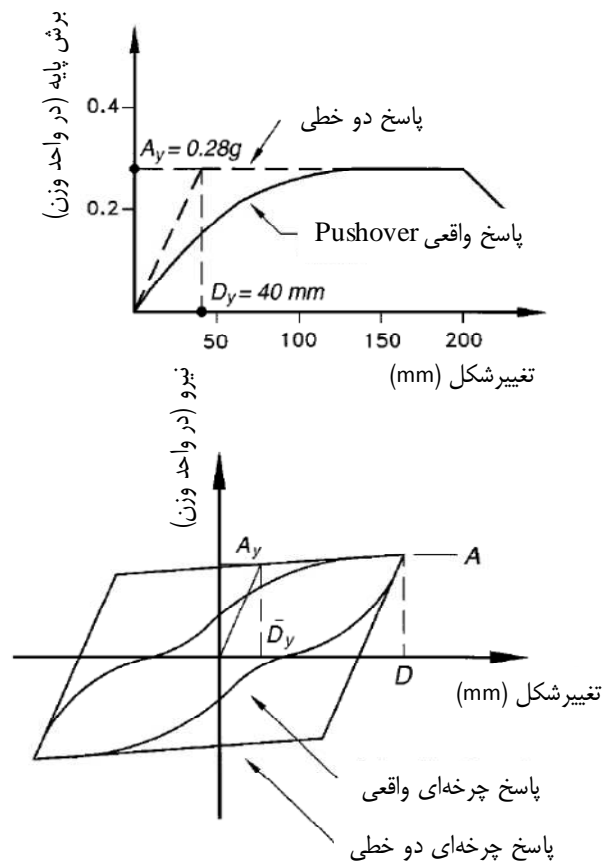
شرح زیر محاسبه شود:

$$\beta_b = \frac{2(A_y D - D_y A)}{\pi A D} \quad (۵۱-۳)$$



$$\beta_{eff} = q\beta_b + \beta \quad (۵۲-۳)$$

که در آن،  $q$  ضریبی است کمتر از یک و برابر است با نسبت مقدار واقعی مساحت محصور در حلقه به مقدار مساحت محصورشده در مدل فرض دو خطی فرض شده، همانطور که در شکل (۳-۱۸) نمایش داده شده است. در این مثال، مقدار  $q$  برابر با  $۰/۵$  خواهد بود. مقدار  $q$  به طور معمول وابسته به نوع سیستم و سطح تغییرشکل مورد انتظار خواهد بود. مقدار  $q$  برابر با  $۰/۲$  برای ساختمانهای دارای میراگر و براساس بررسی روی نتایج میز لرزان ارائه شده است و این مقدار برای اینگونه از ساختمانها توصیه می شود مگر اینکه مقادیر بیشتری از محاسبات استخراج شود.



شکل (۳-۱۸) مقایسه منحنی Pushover و چرخه‌های هیستریزیس

گام سوم در فرآیند تحلیل، ارزیابی نیاز طیفی ساختمان قبل از حضور میراگرها است. نیاز طیفی به صورت حل تکراری و با (۱) انتخاب نقاط روی منحنی ظرفیت طیفی (نقاط تغییرمکانی که معمولاً در محل تقاطع



منحنی‌های نیاز و طیف هستند) (۲) محاسبه مقدار میرائی موثر ساختمان،  $\beta_{eff}$ ، در تغییر مکان انتخاب شده و (۳) مقایسه میزان میرائی موثر محاسبه شده با مقدار میرائی روی طیف نیاز طراحی، در هر تراز تغییر مکانی، حاصل می‌شود.

هر سه گام بیان شده در بالا، لازم است به شرح زیر برای تحلیل ساختمان دارای میراگر تکرار شوند. افزودن میراگرهای اصطکاکی باعث می‌شود تا مقاومت ساختمان نمونه تا مقداری برابر با  $A_f$  افزایش یابد (شکل ۳-۱۷). میرائی موثر ساختمان دارای میراگر با استفاده از معادله (۳-۴۶) و با جدا کردن چرخه هیستریزس به دو ناحیه، یکی ناحیه‌ای که توسط میراگرها ایجاد می‌شود (یک ناحیه تقریباً مستطیلی) و دیگری، ناحیه باقی‌مانده که توسط ساختمان دارای میراگر ایجاد می‌شود، به شرح زیر محاسبه می‌شود:

$$\beta_{eff} = \frac{2A_f D + 2q(A_y D - D_y A)}{\pi A_2 D} + \beta \quad (۳-۵۳)$$

#### هـ) تحلیل ساختمان‌های دارای میراگرهای وابسته به سرعت

- **میراگرهای ویسکوالاستیک:** این میراگرها دارای یک سختی موثرند که به طور معمول وابسته به فرکانس، شدت دامنه حرکت و دما هستند. به همین دلیل، مدل ریاضی ساختمانهای دارای این میراگرها، باید اثر سختی آنها را در نظر بگیرد.

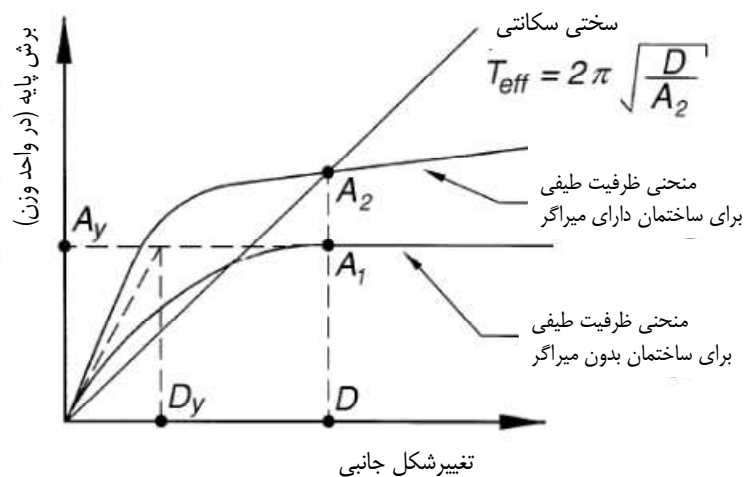
میراگرهای ویسکوالاستیک باید با استفاده از فنرهای خطی یا غیرخطی مدلسازی شوند به طوری که سختی میراگر در دما و فرکانس ثابت تعریف شود. این فرکانس باید معکوس مقدار دروه تناوب سکانتی سازه دارای میراگرها باشد. اثر دما روی پاسخ این میراگرها نیز می‌تواند در روش استاتیکی غیرخطی با انجام مجموعه‌ای از تحلیلها وارد شود.

برای نشان دادن فرآیند تحلیل، ساختمان نمونه یک طبقه مثال قبل را در نظر بگیرید که در آن، میراگر ویسکوالاستیک جایگزین میراگر اصطکاکی شده است. نیاز تغییر مکانی می‌تواند با محاسبه میزان میرائی موثر از رابطه زیر تعیین شود:



$$\beta_{eff} = \frac{W_{DE} + 4q(A_y D - D_y A)}{2\pi A_2 D} + \beta \quad (54-3)$$

که در آن،  $m$  جرم ساختمان،  $W_{DE}$  میزان انرژی تلف شده با میراگر ویسکوالاستیک در یک چرخه بارگذاری و سایر عبارات، متناظر با شکل (۱۹-۳) است.



شکل (۱۹-۳) پارامترهای موثر در تحلیل غیرخطی ساده سازی شده ساختمان یک طبقه دارای میراگر ویسکوالاستیک

انرژی تلف شده توسط میراگرهای ویسکوالاستیک از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$W_{DE} = \frac{2\pi^2}{T_s} \sum_i C_j \cos^2 \theta_j \Delta r_j^2 \quad (55-3)$$

که در آن  $Z$  شماره نده میراگرهاست و جمع انرژی روی تمام این میراگرها انجام می شود،  $C_j$  ضریب میرایی مربوط به میراگر  $Z$ -ام (معادله ۳-۳ و ۳-۴)  $\theta_j$  زاویه انحراف میراگر  $Z$ -ام نسبت به افق، و  $\Delta r_j$  تغییر مکان نسبی نقاط اتصال میراگر براساس شکل (۲۰-۳) است.

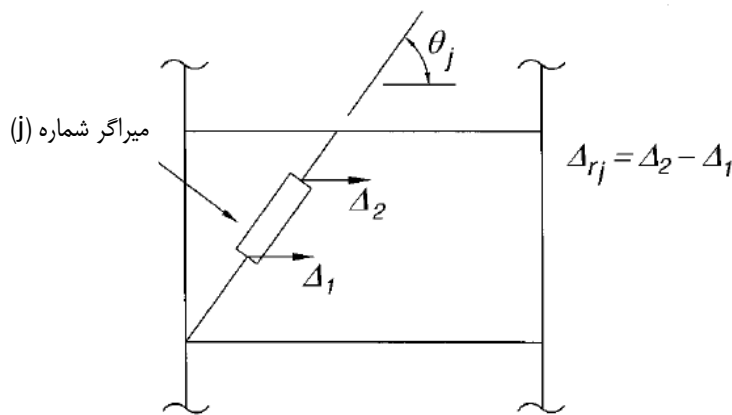
محاسبه نقطه تقاطع نمودارهای ظرفیت-نیاز طراحی، روشی همانند آنچه برای میراگرهای وابسته به تغییر مکان بحث شد خواهند داشت. برای میراگرهای وابسته به تغییر مکان، نیروی اعضاء را می توان براساس نیروها و تغییر مکانهای متناظر با نقطه تقاطع نمودارهای ظرفیت-نیاز طراحی محاسبه نمود. برای میراگرهای وابسته به سرعت، یک گام دیگر نیز مورد نیاز است تا بتوان نیروهای اعضاء را بدست آورد، زیرا نیروهای محاسبه شده اعضاء تنها براساس تغییر مکان گرهی است و سرعتهای گرهی (یا نیروهای ویسکوز) در



محاسبه آنها وارد نشده است. تحلیل‌های جداگانه‌ای باید انجام شود تا بتوان این اثرات را در آنها وارد کرد، که در این تحلیل‌های جداگانه، نیروی ویسکوز حداکثر در طول محور یک میراگر با روش زیر محاسبه می‌شود:

$$F_j = \frac{2\pi}{T_s} C_j \Delta_{rj} \cos \theta_j \quad (۵۶-۳)$$

که در آن،  $C_j$  ضریب میرائی میراگر  $j$ -ام در دامنه تغییر مکانی  $\Delta_{rj} \cos \theta$  است و فرکانس آن نیز متناظر با معکوس زمان تناوب سکانتی تعریف شده است.



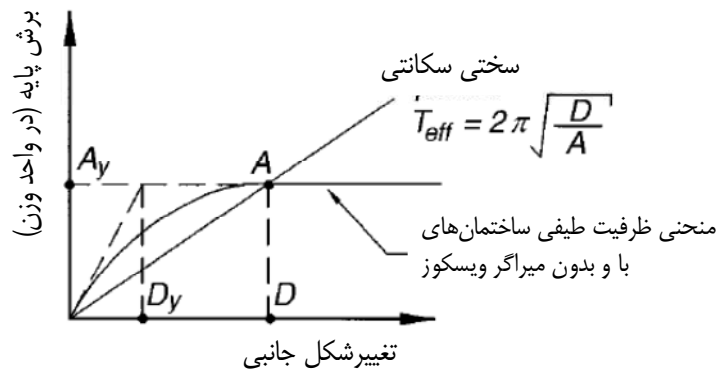
شکل (۳-۲۰) تعریف زاویه و تغییر مکان نسبی در میراگرها

- میراگرهای ویسکوز مایع: این میراگرها معمولاً دارای سختی نیستند. بنابراین، منحنی push-over یک ساختمان دارای این نوع از میراگرها، که براساس روش غیرخطی استاتیکی تعیین شده است، مشابه منحنی متناظر با ساختمان قبل از استفاده از میراگرها است.

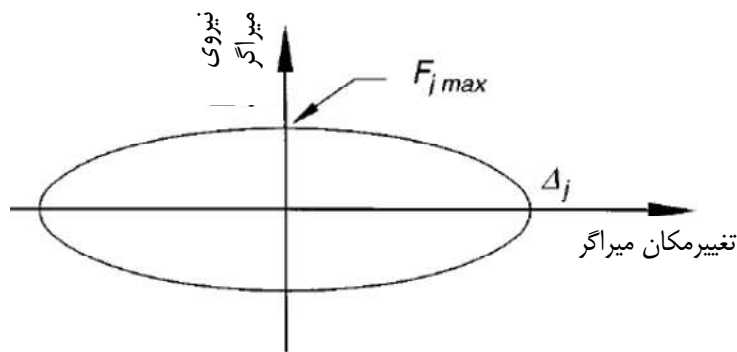
برای ساختمانی با یک منحنی ظرفیت مشابه شکل (۳-۲۱)، میرائی موثر با رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\beta_{eff} = \frac{\frac{W_{DE}}{m} + 4q(A_y D - D_y A)}{2\pi A D} + \beta \quad (۵۷-۳)$$





### رفتار میراگر ویسکوز



شکل (۳-۲۱) معرفی پارامترهای مرتبط با تحلیل غیرخطی ساده‌سازی شده ساختمان یک طبقه با میراگر ویسکوز

که در آن،  $W_{DE}$  کار انجام شده با میراگرهای ویسکوز در یک چرخه بارگذاری است. برای حالت خاص میراگرهای ویسکوز غیرخطی با نیروهای حاصل از رابطه (۳-۶)، کار انجام شده برابر است با:

$$W_{DE} = \sum_i \lambda F_{j \max} \Delta_j \quad (۳-۵۸)$$

که در آن،  $\lambda$  تابعی از مولفه سرعت است که از جدول (۳-۴) بدست می‌آید:

جدول (۳-۴) مقادیر پارامتر  $\lambda$

۲/۰۰	۱/۷۵	۱/۵۰	۱/۲۵	۱/۰۰	۰/۷۵	۰/۵	۰/۲۵	توان $\alpha$
۲/۷	۲/۸	۲/۹	۳/۰	۳/۱	۳/۳	۳/۵	۳/۷	پارامتر $\lambda$

بر همین اساس، کار انجام شده می‌تواند براساس تغییر مکان نسبی  $\Delta_{Tj}$  همانطور که در شکل (۳-۲۰) نشان

داده شده است، محاسبه شود:



$$W_{DE} = \left( \frac{2\pi}{T_s} \right) \sum_i \lambda C_{0j} |A_{rj} \cos \theta_j|^{1+\alpha} \quad (59-3)$$

که در آن،  $C_{0j}$  ثابت میرائی میراگر  $\lambda$ -ام (رابطه ۳-۶) است. برای میراگر ویسکوز غیرخطی، که در آن توان  $\alpha$  برابر با ۱/۰ است، رابطه (۳-۶۰) به شکل زیر تغییر خواهد یافت:

$$W_{DE} = \frac{2\pi}{T_s} \sum_i C_{0j} \cos^2 \theta_j A_{rj}^2 \quad (61-3)$$

که مشابه با رابطه (۳-۵۵) است به جز پارامتر  $C_{0j}$  که در رابطه (۳-۵۹) مقداری ثابت است ولی  $C_j$  در رابطه (۳-۵۵) یک مقدار وابسته به فرکانس و دامنه (سرعت) تحریک پیش آمده است.

محاسبه نقاط تقاطع نمودارهای ظرفیت-نیاز طراحی، از روشی همانند آنچه برای میراگرهای چرخه‌ای و ویسکوالاستیک تشریح شد تبعیت می‌کند، به جز آنکه روابط (۳-۵۷) تا (۳-۶۰) برای بدست آوردن میرائی موثر ساختمان دارای میراگر به کار می‌روند. لازم به ذکر است که منحنی  $\text{push-over}$  برای ساختمان درارای میراگر می‌تواند متفاوت از منحنی متناظر در ساختمان قبل از استفاده از میراگرها باشد، زیرا برخی از اعضای سیستم قابی که نیازمند مقاومسازی هستند، وابستگی به میزان میرائی نخواهند داشت. برای میراگرهای وابسته به تغییر مکان نیروی اعضا می‌تواند براساس نیرو و تغییر مکان نقاط تقاطع نمودارهای ظرفیت-نیاز طراحی تعیین شود. برای میراگرهای وابسته به نیرو، در یک گام جلوتر، باید اثر نیروهای ویسکوز یا سرعت‌های گرهی در نیروی اعضا وارد شود. تحلیل‌های مجزایی باید انجام شود تا بتوان این آثار را، با استفاده از حداکثر نیروی ویسکوز در محور طولی هر میراگر، ارزیابی نمود. این حداکثر نیروی ویسکوز از رابطه زیر بدست می‌آید که در آن،  $T_s$  دوره تناوب سکانتی بوده و براساس شکل (۳-۲۱) تعیین شده است.

$$F_j = \left( \frac{2\pi}{T_s} \right)^\alpha C_{0j} |A_{rj} \cos \theta_j|^\alpha \quad (62-3)$$

### ۳-۴-۲-۲ روش دینامیکی غیرخطی

اگر میراگرها وابسته به فرکانس بارگذاری، درجه حرارت عملکرد (شامل گرم‌شدگی ناشی از فعال شدن میراگرها پس از تهییج وارده)، تغییر شکل (یا کرنش)، سرعت، بارهای Sustained و بارهای جانبی دوجهته



باشند، این وابستگی‌ها باید در تحلیل غیرخطی تاریخچه زمانی آن وارد شود. یکی از روش‌هایی که می‌توان برای در نظر گرفتن تغییرات در پاسخ نیرو-تغییر مکان میراگر از آن استفاده کرد انجام تحلیل‌های متعدد بر روی ساختمان دارای میراگر است که در آنها، مقادیر مرزی مشخصات میراگر وارد شده‌باشد. طراحی یک ساختمان با استفاده میراگرها، باید براساس حداکثر پاسخ محاسبه‌شده از تحلیل‌های متعدد باشد. نیروهای ویسکوز ایجادشده در اعضای قاب لرزه‌ای (در صورت وجود) باید برای تحلیل و طراحی قاب مورد نظر قرار گیرند. ارزیابی تاریخچه نیروهای اعضا باید براساس تغییر مکان‌های گرهی (برای بدست آمدن ماتریس‌های سختی) و سرعت‌های گرهی (برای تعیین ماتریس‌های میرایی) انجام شود. پاسخ قابل قبول یک ساختمان دارای میراگر، منجر به یک پاسخ پایدار و باثبات در میراگرها خواهد شد. نیروها و تغییر مکان‌های بوجود آمده در میراگر که در طول زلزله طرح رخ می‌دهد، باید در آزمون‌هایی که بر روی میراگر انجام شده‌است، مورد ارزیابی قرار گرفته باشد.

### ۳-۴-۳ معیارهای حدی بالا و پائین

تعیین معیارهای حدی بالا و پائین برای ارزیابی رفتار حاصل از مدلسازی دینامیکی غیرخطی، مستلزم شناخت مفاهیمی است که در این بخش به آن‌ها اشاره می‌شود.

#### ۳-۴-۳-۱ مشخصات اسمی

ویژگی‌های مرتبط با طراحی یک میراگر (یا ابزار اتلاف انرژی)، از جمله مواردی است که باید براساس آزمایش‌های انجام‌شده بر روی نمونه‌هایی با اندازه و ساختاری مشابه با نمونه مورد بررسی تعیین شود. این مشخصات با استفاده از ضرایبی که با  $\lambda$  نمایش داده می‌شوند، برای رواداری‌های ساخت، عدم قطعیت‌های موجود در آزمایش، اثرات دراز مدت و تعیین کران بالا و پائین، اصلاح می‌شوند.

در کاربردهای اولیه ابزارهای اتلاف انرژی، مشخصات طراحی از آزمون‌های محدود انجام‌شده بر روی نمونه‌های شبیه‌سازی شده استخراج و برای برطرف کردن نیازهای طراحی به کار می‌رفت. با افزایش کاربرد این ابزارها، انجام آزمون‌ها برای تولیدکنندگان آسان شد و لذا، تعیین اطلاعات اسمی طراحی براساس



مشخصات دقیق رفتاری، میسر گردید. این مشخصات طراحی را می‌توان استفاده از مجموعه آزمون‌هایی که در فرآیند فازهای اجرایی پروژه مورد توجه قرار خواهند گرفت، تأیید نمود. استفاده از تحلیل‌های حدی سبب می‌شود تا فرآیند طراحی برای سازه‌های دارای ابزارهای اتلاف انرژی، مشابه فرآیند طراحی سازه‌های متداول باشد.

### ۳-۴-۲ رواداری‌های متناظر با مشخصات اسمی

ضرایب  $\lambda$  از جمله  $\lambda_{\text{spec,upper}}$  و  $\lambda_{\text{spec,lower}}$  برای اعمال میزان رواداری‌های موجود در متوسط اطلاعات گزارش شده برای مقادیر طراحی یک میراگر به کار می‌روند. این رواداری‌ها می‌بایست منطبق بر شرایط ساخت و به کارگیری ابزارهای اتلاف انرژی باشد و برای تعیین حدود بالا و پائین در فرآیند طراحی و تحلیل سازه‌ای دارای چنین ابزارهایی، به کار روند.

شناخت تاثیراتی که فرآیند ساخت بر مشخصات طراحی میراگرها می‌گذارد از اهمیت بالائی برخوردار است و ضرایب  $\lambda$  مورد اشاره در این بخش، با هدف وارد کردن این اثرات در محاسبات تحلیل و طراحی تعریف شده‌اند. مقادیر پیشنهادی برای رواداری‌های مرتبط با مشخصات متوسط ابزارهای اتلاف انرژی، معمولاً بین  $\pm 10\%$  تا  $\pm 15\%$  تعیین می‌شود. برای حالتی که رواداری‌ها  $\pm 10\%$  تعیین شده باشد، ضرایب  $\lambda$  به صورت  $\lambda_{\text{spec,upper}}=1.10$  و  $\lambda_{\text{spec,lower}}=0.9$  معرفی می‌شوند. تغییر در مشخصات دقیق یک ابزار، در مقایسه با مشخصات متوسط آن، معمولاً بیشتر خواهد بود. بنابراین، توصیه می‌شود که چنین رواداری‌هایی توسط تولیدکنندگان مورد توجه قرار گیرد.

### ۳-۴-۳ ضرایب تغییر مشخصات

ضرایب  $\lambda$  متناظر با تغییراتی که در مشخصات اسمی طراحی یک ابزار اتلاف انرژی رخ می‌دهد، باید برای هر نوعی از ابزارهای اتلاف انرژی و با در نظر گرفتن پدیده‌هایی که ممکن است در زمان آزمایش نمونه‌های مرجع مورد توجه قرار نگرفته باشد، تعیین شود. این موارد را می‌توان اثرات دراز مدت محیطی شامل حرارت، رطوبت، خوردگی و ...؛ پیرشدگی و نیز، شرایط آزمایش از جمله خزش، خستگی، و اثرات بارگذاری‌های



چرخه‌ای دانست که ممکن است به تغییر رفتار ابزار منجر شود. ضرایب  $\lambda$  دربرگیرنده این موارد باید به نحوی تعیین شوند که بتوانند مقادیر مشخصات طراحی را در حدود بالا و پایین مقادیر اسمی (که متناظر با ضریب ۱ است) تعیین کنند. این پارامترها با عناوین  $\lambda_{\text{effect,upper}}$  و  $\lambda_{\text{effect,lower}}$  شناسایی می‌شوند که به تفکیک و برای هر یک از پدیده‌های موثر بر رفتار، تعیین می‌شوند.

ضریب اصلاح حد بالای مشخصات اسمی طراحی،  $\lambda_{\text{PM,upper}}$ ، برای هریک از ابزارهای اتلاف انرژی، با ضرب تمامی ضرایب  $\lambda_{\text{effect,upper}}$ ها در هم تعیین می‌شود. این مسئله، برای ضریب اصلاح حد پائین مشخصات اسمی طراحی،  $\lambda_{\text{PM,lower}}$ ، نیز صادق است.

به منظور لحاظ کردن این اثرات در مشخصات تغییر یافته اسمی، لازم است این مسئله مورد توجه قرار گیرد که رخ دادن همزمان پدیده‌های موثر بر مشخصات اسمی طراحی، عملاً غیرممکن است. به همین دلیل، لازم است حد مناسبی برای پارامترهای  $\lambda$  تعیین شود. این مسئله توسط ضریب تعدیل مشخصات ابزار اتلاف انرژی (SPAF) که برای اصلاح مقدار  $\lambda_{\text{PM}}$  به کار می‌رود، تعیین می‌شود. این ضریب برای تمامی سطوح عملکرد برابر با ۰/۶۷ است.

### ۳-۳-۴ حدود بالا و پائین مشخصات تحلیل و طراحی

همانطور که قبلاً نیز اشاره شد، با اعمال ضرایب  $\lambda$  متناظر با مشخصات اسمی طراحی، می‌توان حدود بالا و پائین این مشخصات را تعیین کرد. براساس آنچه در دستورالعمل‌های مرجع قابل دسترسی است، این حدود به شرح زیر محاسبه می‌شوند:

$$\text{الف) حد بالای مشخصات طراحی} = \text{مشخصات اسمی طراحی} \times [1 + \text{SPAF}(\lambda_{\text{PM,upper}} - 1)] \times \lambda_{\text{spec,upper}}$$

و

حد بالای مشخصات طراحی باید بزرگتر از ۱/۱۵ برابر مشخصات اسمی طراحی باشد.

$$\text{ب) حد پائین مشخصات طراحی} = \text{مشخصات اسمی طراحی} \times [1 - \text{SPAF}(1 - \lambda_{\text{PM,lower}})] \times \lambda_{\text{spec,lower}}$$

و

حد پائین مشخصات طراحی باید کمتر از ۰/۸۵ برابر مشخصات اسمی طراحی باشد.



مشخصات حد بالا و پائین یک ابزار اتلاف انرژی باید برای هر دو بحث تحلیل و طراحی مورد توجه قرار گیرند. در شرایط دستِ پائین، مشخصات حد بالا و پائین باید برای بارها، تغییر مکان‌ها و سرعت‌هایی که در سطوح مختلف خطر ارزیابی می‌شوند، به کار رود.

## پیوست الف

### انواع و مشخصات سیستم‌های میراگر

#### الف- ۱ مقدمه

در هنگام وقوع زلزله، سازه‌ها تحت اثر بارهای لرزه‌ای با شدت زیاد قرار گرفته و برخی اعضای باربر جانبی آن‌ها وارد ناحیه غیر خطی می‌شوند. در این حالت بخش عمده‌ای از انرژی ورودی به سازه از طریق میرایی ذاتی سازه و مکانیزم غیرخطی هیسترتیک مستهلک می‌شود. در زلزله‌های شدیدتر، انرژی ورودی به سازه افزایش یافته و سهم بیشتری از انرژی، توسط ایجاد تغییرشکل‌های پلاستیک تلف می‌شود. تغییرشکل‌های مذکور ناشی از بوجود آمدن مفاصل پلاستیک به صورت موضعی در نقاطی از سازه بوده که خود موجب افزایش استهلاک انرژی در سیستم می‌شود. در نتیجه مقدار زیادی از انرژی ورودی زلزله به ساختمان به واسطه تخریب‌های موضعی در سیستم باربر جانبی سازه مستهلک شده به طوری که در صورت عدم اتخاذ تمهیدات لازم، این امر می‌تواند به از دست دادن کارایی و در نهایت فروریزش سازه بیانجامد.

در سالیان اخیر، روش‌های ابداعی جهت افزایش کارایی و ایمنی سازه‌ها در برابر خطرات طبیعی از جمله زلزله در دست تحقیق و ارائه می‌باشد. از منظر انرژی، برای طراحی لرزه‌ای مناسب می‌بایست مقدار انرژی هیسترتیک مستهلک شده توسط سازه کاهش یابد. این عمل توسط سیستم‌های کنترلی در سازه‌ها به دو طریق زیر صورت می‌گیرد:

۱- کاهش مقدار انرژی ورودی به سازه (به عنوان مثال به روش جداسازی پایه)



۲- معرفی مکانیزم‌های اضافی اتلاف انرژی در سازه، به طوری که سهم عمده‌ای از انرژی ورودی را مستهلک کرده و در نتیجه خسارات وارد شده به سازه اصلی در اثر استهلاک انرژی هیسترتیک را کاهش دهند.

## الف-۲ معرفی انواع سیستم‌های کنترل سازه‌ها

### الف-۲-۱ طبقه‌بندی کلی سیستم‌های کنترل

سیستم‌های کنترل برحسب میزان انرژی مورد نیاز و نیز نحوه عملکرد، به چهار گروه کلی زیر تقسیم می‌شوند:

سیستم‌های کنترل غیرفعال<sup>۱</sup>

سیستم‌های کنترل فعال<sup>۲</sup>

سیستم‌های کنترل نیمه‌فعال<sup>۳</sup>

سیستم‌های کنترل مختلط<sup>۴</sup>

سیستم‌های کنترل غیرفعال با استفاده از جذب یا انعکاس قسمتی از انرژی ورودی ناشی از زلزله به سازه، از آن‌ها محافظت کرده و جهت کارکرد به منبع انرژی خارجی نیاز ندارند. سیستم‌های جداسازی پایه<sup>۵</sup> و میراگر با جرم متوازن<sup>۶</sup> نمونه‌هایی از سیستم‌های غیرفعال هستند.

سیستم‌های کنترل فعال در بسیاری از موارد نسبت به سیستم‌های کنترل غیرفعال عملکرد بهتری نشان می‌دهند. این گونه سیستم‌ها با اعمال نیروی خارجی در خلاف جهت نیروی لرزه‌ای وارد بر ساختمان، سعی بر کنترل رفتار آن در هنگام بروز زلزله را دارند. همچنین سیستم‌های مذکور این قابلیت را دارند که خود را با شرایط بارگذاری مختلف تطبیق دهند. این سیستم‌ها از پاسخ‌های سازه‌ای اندازه‌گیری شده جهت تعیین

<sup>1</sup>-Passive Control Devices

<sup>2</sup>-Active Control Devices

<sup>3</sup>-Semi – Active Control Devices

<sup>4</sup>-Hybrid Control Devices

<sup>5</sup>-Base Isolation

<sup>6</sup>-Tuned Mass Damper (TMD)





نیروی کنترل اعمالی به سازه استفاده می‌کنند. در این صورت، نیاز به استفاده از سیستم‌های پیچیده و کنترل هوشمند، برای اعمال نیروهای مورد نیاز و نیز الگوریتم‌های مناسب تعیین بهینه این نیروها است. از مشکلات عمده سیستم‌های کنترل فعال این است که جهت عملکرد مناسب، به میزان انرژی خارجی زیادی نیاز داشته و از آنجا که این سیستم‌ها انرژی خارجی قابل توجهی جهت کنترل سازه به آن وارد می‌کنند، امکان ناپایدار شدن سازه بر اثر سیستم‌های مذکور وجود دارد. سیستم‌های میراگر با جرم فعال<sup>۱</sup> و تاندون‌های فعال<sup>۲</sup> نمونه‌هایی از سیستم‌های فعال هستند.

سیستم‌های کنترل نیمه‌فعال که می‌توان آن‌ها را سیستم‌های کنترل غیرفعال قابل تنظیم نیز نامید، مجهز به میراگرهایی هستند که در هر لحظه قابل کنترل بوده ولی قادر به اعمال انرژی به سازه نمی‌باشند. آنها برعکس سیستم‌های کنترل فعال به انرژی خارجی قابل توجه، نیازی ندارند. این مسأله بخصوص هنگام وقوع زلزله نقش تعیین کننده‌ای دارد. از ویژگیهای سیستم‌های کنترلی مذکور این است که می‌توانند در هر لحظه عملکرد خود را براساس نیروی وارده تطبیق دهند (ویژگی سیستم‌های فعال) و تنها انرژی را جذب یا مستهلک کنند (ویژگی سیستم‌های غیرفعال)؛ لذا پایداری سیستم را تأمین می‌کنند. از طرفی این نوع سیستم‌های کنترل، در مقایسه با سیستم‌های کنترل فعال، انرژی بسیار کمتری مصرف کرده و نسبت به سیستم‌های کنترل غیرفعال در کاهش پاسخ‌های سازه‌ای مؤثرترند. بعلاوه، در صورت آسیب دیدن منبع انرژی، مانند سیستم‌های کنترل غیرفعال عمل می‌کنند.

در سیستم کنترل مختلط بطور همزمان از میراگرهای کنترل فعال و غیرفعال استفاده می‌شود. این گونه سیستم‌ها معمولاً طوری تنظیم می‌شوند که در زلزله‌های ضعیف و متوسط که کارایی سیستم کنترل غیرفعال کم بوده و سیستم کنترل فعال احتیاج به اعمال انرژی کمتری دارد، مشابه سیستم کنترل فعال و در زلزله‌های شدید که کارایی سیستم کنترل غیرفعال بسیار مناسب بوده و سیستم کنترل فعال به دلیل وجود حد اشباع در تولید نیروی کنترل مورد نظر دچار مشکل می‌شود، مانند سیستم کنترل غیرفعال عمل نمایند.

<sup>۱</sup>-Active Mass Damper (AMD)

<sup>۲</sup>-Active Tendons



در ادامه، بنحو مبسوطتری به بررسی هر یک از روش های ذکر شده اقدام می شود.

## الف-۲-۲ کنترل غیر فعال سازه ها

غیرفعال بودن این سیستم های کنترلی بدین معنی است که عامل کنترل کننده تا پیش از تحریک سازه غیرفعال است. با شروع تحریک سازه، سیستم فعال شده و شروع به فعالیت کنترلی خود می نماید و پس از خاتمه تحریک دوباره به حالت غیرفعال باز می گردد. این سیستم ها مجهز به وسایلی هستند که مشخصات سازه ای مثل شکل پذیری، مقاومت و غیره را اصلاح کرده و یا انرژی را مستهلک می نمایند. بنابراین طی این عمل، ارتعاشات سازه کاهش می یابد.

سیستم های کنترل غیر فعال جهت کارکرد به منبع انرژی خارجی نیازی ندارند. این سیستم ها با تولید حرکت نسبی درون دستگاه های کنترل، با استفاده از حرکت سازه یا تبدیل انرژی جنبشی به گرما، انرژی ورودی به سازه را مستهلک می کنند. از آنجا که سیستم های مذکور هیچ گونه انرژی خارجی ای به سیستم وارد نمی کنند، باعث ناپایداری سازه نمی شوند. مزیت دیگر آن ها، هزینه کم نگهداریشان است. این سیستم های کنترل به جهت داشتن مشخصات دینامیکی (جرم، سختی، زمان تناوب و میرایی) ثابت، تا حدودی به ویژگی های تحریک مانند دامنه شتاب (PGA) و فرکانس غالب رکورد زلزله حساس هستند. این حساسیت بر میزان کارایی عامل کنترل کننده برای تحریک هایی که ماهیت دلخواه و غیرمشخصی دارند (مثل زلزله) به شدت اثر گذاشته و در نتیجه سبب محدود شدن کارایی و کاربرد هر سیستم برای بارگذاری و تحریک خاصی می شود.

در حالت کلی، سیستم های کنترل غیرفعال براساس روش جذب انرژی شان طبقه بندی می شوند. سیستم های مذکور به طور عمده با روشهایی مانند لغزش اصطکاکی، عبور سیالات از روزنه، تغییر شکل ویسکوالاستیک جامدات یا سیالات، تبدیل حالت و تسلیم شدگی در فلزات، انرژی را جذب و پاسخ سیستم های سازه ای را میرا می کنند. از انواع سیستم های کنترل غیرفعال متداول در سازه ها می توان به سیستم جداسازی پایه، میراگر با



جرم متوازن<sup>۱</sup>، میراگر مایع متوازن<sup>۲</sup>، میراگر جاری شونده فلزی<sup>۳</sup>، میراگر اصطکاکی<sup>۴</sup>، میراگر ویسکوالاستیک<sup>۵</sup> و میراگر با سیال ویسکوز<sup>۶</sup> و انتقال انرژی به صورت هدفمند<sup>۷</sup> اشاره کرد.

#### الف-۲-۱ سیستم جداسازی پایه

قرار دادن ساختمانها بر روی یک سیستم جداساز، صرفنظر از تفاوت‌های گسترده و تنوع در جزئیات روش‌های جداساز پایه، مبتنی بر استفاده از یک لایه با سختی جانبی کم در بین پی و سازه است. اینگونه جداسازی سبب افزایش قابل ملاحظه زمان تناوب سازه و در نتیجه کاهش بسیار زیاد شتاب طیفی و به تبع آن کاهش در شتاب طبقات و نیز کاهش در انرژی ورودی به سازه می‌شود که این خود رانش‌های بین طبقه‌ای سازه را تقلیل می‌دهد (شکل الف-۱). به عبارت دیگر اصل جداسازی لرزه‌ای پایه، ایجاد انعطاف-پذیری در تراز پایه سازه در یک صفحه افقی، به همراه قرار دادن اجزای میراکننده (با میرایی برابر ۵٪ تا ۳۰٪ میرایی بحرانی)، برای محدود کردن دامنه حرکت ناشی از مؤلفه افقی زلزله (حدود ۱۰۰ الی ۴۰۰ میلی‌متر) است. شکل الف-۲، به طور شماتیک پاسخ یک سیستم جداسازی شده در پایه را با سیستم معمولی مقایسه کرده و شکل الف-۳ کاربرد این جداسازها را در سازه‌های ساختمانی نشان می‌دهد.

<sup>1</sup>-Tuned Mass Damper (TMD)

<sup>2</sup>-Tuned Liquid Damper (TLD)

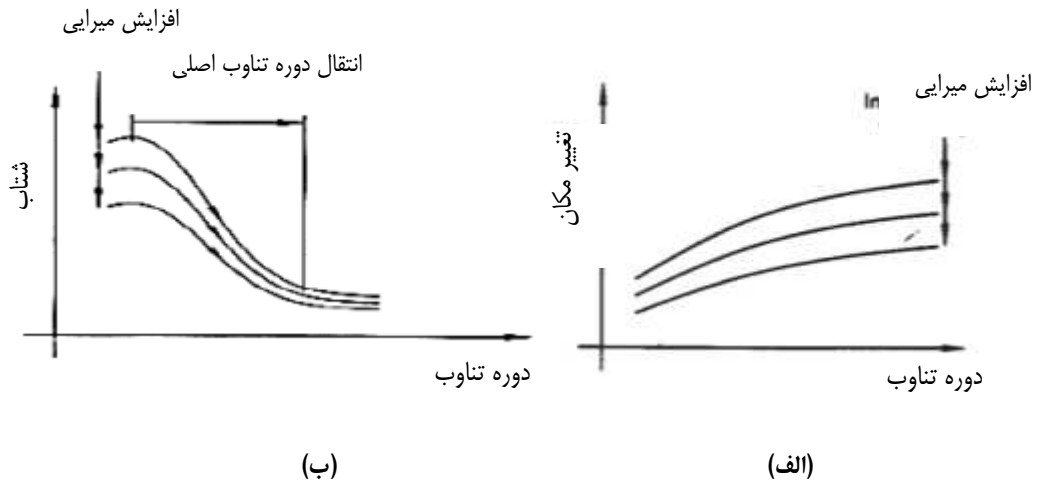
<sup>3</sup>-Metallic yield Damper

<sup>4</sup>-Friction Damper

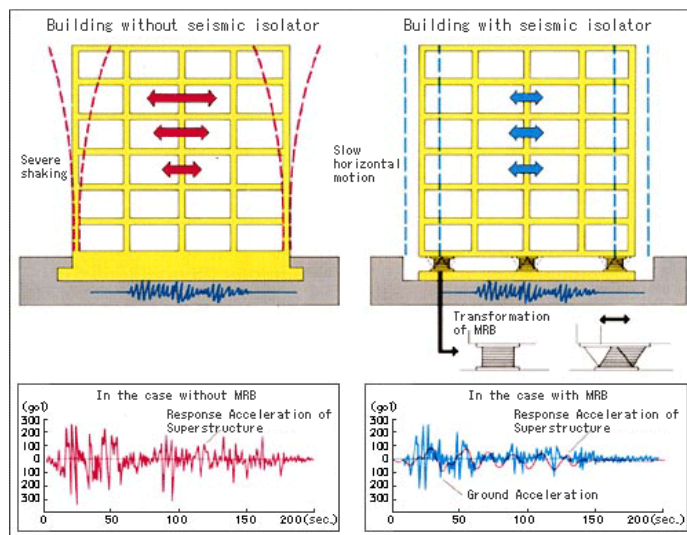
<sup>5</sup>-Viscoelastic Damper (VED)

<sup>6</sup>-Viscous Fluid Damper

<sup>7</sup>-Targeted Energy Transfer



شکل الف-۱- نحوه عملکرد جداساز لرزه‌ای: (الف) انتقال دوره تناوب اصلی جهت کاهش انرژی وارده، (ب) افزایش میرایی جهت محدود نمودن تغییر مکان (رایبسون ۱۹۹۸)



شکل الف-۲- مقایسه عملکرد سیستم جداسازی پایه با سیستم قاب معمولی (قاب خمشی)



شکل الف-۳- استفاده از جداساز لرزه‌ای در سازه‌های ساختمانی

انواع مختلف سیستم‌های جداسازی کف عبارتند از: الاستومرها، جداسازهای سرب-لاستیک<sup>۱</sup>، جداسازهای لاستیکی با میرایی بالا<sup>۲</sup>، ورق‌های اتصال لاستیک مسلح<sup>۳</sup> و جداسازهای آونگی اصطکاکی<sup>۴</sup>. در ادامه به انواع متداول سیستم‌های جداساز لرزه‌ای اشاره می‌شود.

#### الف-۲-۲-۱-۱ الاستومر

الاستومرهای اولیه از صفحات لاستیک طبیعی ساخته می‌شدند. امروزه جهت تقویت آن‌ها از صفحات فولادی در بین صفحات لاستیکی استفاده می‌شود (شکل الف-۴). معمولاً ضخامت صفحات فولادی ۲۵ میلی‌متر و ضخامت صفحات لاستیکی بین ۷/۵ الی ۲۰ سانتی‌متر است. استفاده از صفحات فولادی باعث کاهش تغییر شکل قائم الاستومر شده و از بشک‌های شدن لاستیک جلوگیری می‌کند. امروزه در ساخت الاستومرها از لاستیک‌های مصنوعی مانند نئوپرن نیز استفاده می‌شود. بدلیل انعطاف پذیر بودن لاستیک و تغییر شکل‌های برشی لاستیک بالا، میزان میرایی بحرانی الاستومرها بین ۲٪ تا ۳٪ می‌باشد. به همین دلیل در رده تکیه‌گاه‌های با میرایی پایین قرار می‌گیرند. تولید و ساخت الاستومرها در مقایسه با سایر

<sup>1</sup>-Lead-Rubber Bearings

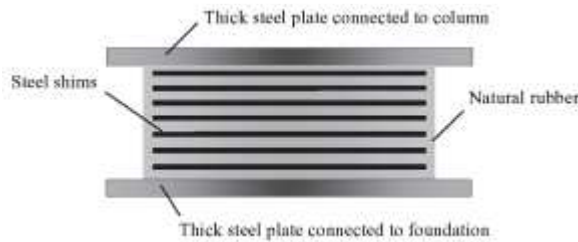
<sup>2</sup>-High Damping Rubber Bearings

<sup>3</sup>-Elastomeric Bearing Pads

<sup>4</sup>-Friction Pendulum System



تکیه گاه‌ها ساده‌تر و کم هزینه‌تر بوده و خصوصیات مکانیکی آن‌ها تابع دما و زمان نیست. به دلیل میرایی بحرانی کم، الاستومرها مقاومت چندانی در برابر بارهای بهره برداری نداشته و جهت کنترل تغییر مکان‌های جانبی بالاتر باید از میراگرهای دیگری استفاده شود.

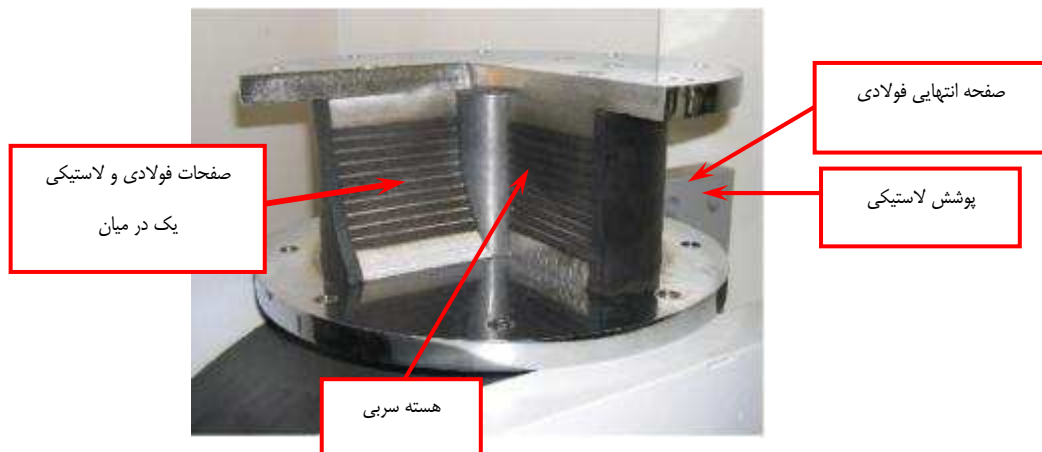


شکل الف-۴- مقطع الاستومر با صفحات فولادی

#### الف-۲-۲-۱- سیستم جداساز لرزه‌ای سرب-لاستیک (LRB)

همانطور که در شکل الف-۵ نشان داده شده، این نوع جداسازها شامل هسته سربی، ورقه‌های لاستیک و فولاد که یک در میان قرار گرفته‌اند و پوشش لاستیکی می‌باشد. هسته سربی یک استوانه توپر از جنس سرب است که در مرکز جداساز لرزه‌ای قرار می‌گیرد. در واقع وظیفه لاستیک و هسته سربی جذب ارتعاشات و اتلاف انرژی و وظیفه صفحات فولادی تحمل بار سازه است. به لحاظ اجرایی، قطر هسته سربی باید کمی از قطر سوراخ بزرگتر باشد (حدود ۱٪) و با فشار در محل خود قرار گیرد. پوشش لاستیکی جهت جلوگیری از زنگ زدگی صفحات فولادی نصب می‌شود.

عملکرد این سیستم وابسته به بار جانبی وارده است. در صورتیکه نیروی جانبی قابل توجه نباشد، هسته سربی جلوی حرکت صفحات فولادی را گرفته و در نتیجه تکیه‌گاه، سختی جانبی بیشتری خواهد داشت. با افزایش نیروی جانبی، صفحه فولادی به هسته سربی نیرو وارد کرده و منجر به تغییر شکل و در نهایت جاری شدن هسته سربی می‌شود. این فرآیند باعث میرایی هیسترتیک (چرخه‌ای) شده و انرژی توسط هسته سربی جذب می‌شود که منجر به کاهش سختی جانبی تکیه‌گاه می‌گردد. میرایی معادل این تکیه‌گاه بین ۱۵٪ تا ۳۵٪ است.



شکل الف-۵- اجزا مختلف سیستم جداسازی لرزه‌ای سرب-لاستیک

#### الف-۲-۲-۱-۳ سیستم جداساز لرزه‌ای لاستیکی با میرایی بالا<sup>۱</sup> (HDRB)

این سیستم که در شکل الف-۶ مشاهده می‌شود، شامل ورقه‌های فولادی به شکل حلقه، ورقه‌های لاستیکی به شکل حلقه‌هایی که با ورقه‌های فولادی بصورت یک در میان قرار می‌گیرند، پوششی از لاستیک با میرایی بالا، پیش آمدگی پیرامونی بالا و پایین جداساز می‌باشد. این جداسازها، ساختاری شبیه جداسازهای سرب-لاستیک دارند با این تفاوت که این نوع جداسازها فاقد هسته سربی می‌باشند. میزان میرایی موثر این نوع تکیه‌گاه‌ها تابعی از کرنش برشی است. برای لاستیک طبیعی، میرایی موثر برای کرنش‌های برشی کم و زیاد به ترتیب برابر ۱۵٪ و ۱۰٪ می‌باشد. از نقاط ضعف این سیستم، تاثیر دما و زمان بر خصوصیات مکانیکی آن است. همچنین سختی و میرایی این نوع تکیه‌گاه تابعی از جنس لاستیک بکار رفته بوده و در نتیجه با محدودیت‌هایی مواجه است.

<sup>1</sup>-High Damping Rubber Bearing

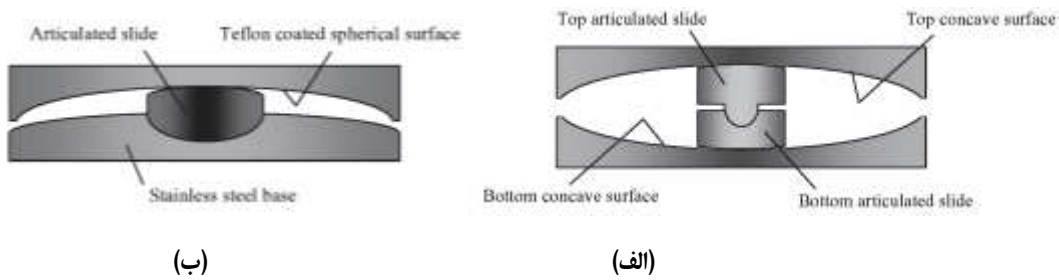


شکل الف-۶- جداساز لرزه‌ای لاستیکی با میرایی بالا

#### الف-۲-۲-۱-۴ سیستم آونگی اصطکاکی (FPS)

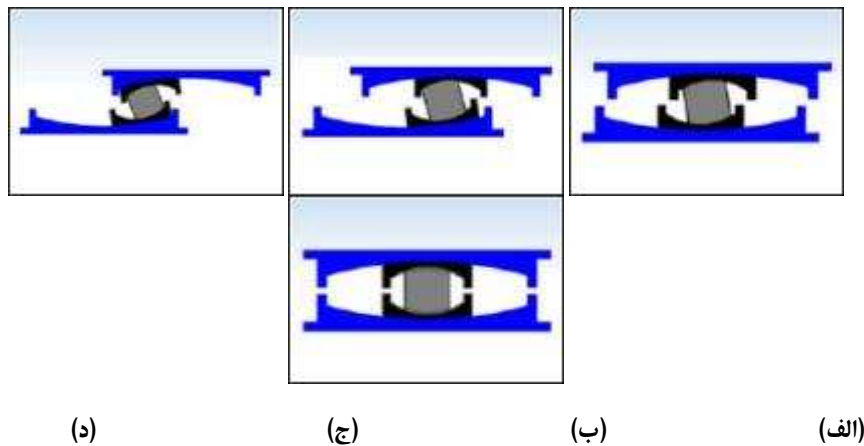
تکیه‌گاه‌های اصطکاکی اولیه متشکل از دو سطح صاف با قابلیت لغزش نسبت به هم بودند. نیروی مقاوم در برابر بار خارجی اعمال شده از حاصل ضرب ضریب اصطکاک و بار قائم وارده بدست می‌آید. بزرگترین نقطه ضعف سیستم اصطکاکی مسطح، عدم بازگشت ساختمان به موقعیت اولیه پس از زلزله است. برای حل این مشکل از سطح لغزش مقعر یا بخشی از سطح کره استفاده می‌شود. به این نوع سیستم‌ها که در شکل الف-۷-الف نشان داده شده، سیستم آونگی اصطکاکی اطلاق می‌شود. سطح کروی معمولاً دارای پوشش تفلونی با ضریب اصطکاک حدود ۳٪ است. بدلیل داشتن سطحی مقعر، در اثر اعمال نیروی جانبی تغییر مکان در هر دو جهت افقی و قائم مشاهده می‌شود. هنگامیکه اثر نیروی خارجی از بین می‌رود، مولفه مماس بر سطح مقعر به عنوان نیروی بازگرداننده عمل کرده و تکیه‌گاه را به موقعیت اولیه هدایت می‌نماید. مقدار نیروی قائم و سرعت اعمال بارگذاری از جمله پارامترهای موثر بر ضریب اصطکاک هستند؛ سرعت بالای بارگذاری باعث افزایش شدید ضریب اصطکاک می‌شود. یکی از مزایای این سیستم، هزینه نگهداری پایین آن است. پوشش تفلون از زنگ زدن فولاد سطح لغزش جلوگیری کرده و با توجه به اینکه لغزش معمولاً تنها در هنگام زلزله رخ می‌دهد، نیازی به تعویض آن در طول عمر مفید سازه نیست. همچنین تغییرات دما و گذشت زمان تاثیر چندانی در خصوصیات مکانیکی تکیه‌گاه ندارد. در شکل الف-۷-ب، میراگر با دو سطح مقعر مشاهده می‌شود. در این حالت به دلیل استفاده از دو سطح مقعر می‌توان با تکیه‌گاه‌های کوچکتر، میزان جابجایی مورد نظر را تامین نمود.





شکل الف-۷- الف) جداساز آونگی اصطکاکی، ب) جداساز آونگی اصطکاکی دوگانه

اخيراً نوع جدیدی از این جداسازها ارائه شده که به سیستم جداساز آونگی اصطکاکی سه گانه<sup>۱</sup> معروف شده است. در شکل الف-۸ نحوه عملکرد آن تحت شرایط مختلف نشان داده شده است.



شکل الف-۸- جداساز آونگی اصطکاکی سه گانه

(الف) حالت سکون، (ب) حرکت آونگ داخلی در سطح زلزله بهره‌برداري،

(ج) حرکت آونگ پایینی در سطح زلزله طراحی، (د) حرکت آونگ بالایی در سطح حداکثر زلزله معتبر (MCE)

سیستم‌های جداسازی پایه در ساختمان‌های زیادی واقع در آمریکا، ژاپن، نیوزلند و چین بکار گرفته شده است. نمونه‌هایی از ساختمان‌های مقاوم‌سازی شده با استفاده از جداسازهای لرزه‌ای سرب-لاستیک عبارتند از:

- ساختمان شهرداری اُکلند<sup>۱</sup> در آمریکا (شکل الف-۹-الف)

<sup>1</sup>-triple friction pendulum



- ساختمان مرکز پست غرب ژاپن<sup>۲</sup> (شکل الف-۹-ب)
- مرکز کامپیوتر وزارت پست و ارتباطات ژاپن که بعد از زلزله سال ۱۹۹۵ در کوبه ساختان عملکرد بی‌وقفه داشته و شتاب طبقه ششم آن برابر  $0.13g$  بوده در حالیکه شتاب پایه برابر  $0.04g$  اندازه گیری شده است.
- بیمارستان آموزشی دانشگاه کالیفرنیا جنوبی (شکل الف-۱۰-الف) که در زلزله سال ۱۹۹۴ لس آنجلس شتاب بام آن برابر  $0.21g$  اندازه‌گیری شده در حالیکه شتاب پایه برابر  $0.049g$  بوده است.
- بیمارستان Olive View که در زمان وقوع زلزله شتاب بام آن  $0.23g$  اندازه‌گیری شده در حالیکه شتاب پایه برابر  $0.082g$  بوده است.
- آشیانه هواپیمای فرودگاه استانبول (شکل الف-۱۰-ب) که در آن جداسازها بین دیوار و سقف قرار گرفته‌اند. سقف دارای ابعاد  $140 \times 110$  متر با وزن  $2000$  تن می‌باشد. در مجموع از  $30$  جداساز استفاده شده و جابجایی طراحی جداسازها  $300$  میلی‌متر می‌باشد.



(ب)

(الف)

شکل الف-۹-الف) ساختمان شهرداری اُکلند، ب) ساختمان مرکز پست غرب ژاپن (عکس از P.W. Clark)

<sup>1</sup>-Oakland City Hall

<sup>2</sup>-West Japan Postal Center



(ب)



(الف)

شکل الف-۱۰- الف) جداگر لرزه‌ای بیمارستان کالیفرنیا جنوبی، ب) جداگر لرزه‌ای آشیانه هواپیمای فرودگاه استانبول

نمونه‌هایی از ساختمان‌های مقاوم سازی شده با استفاده از جداسازهای لرزه‌ای لاستیکی با میرایی بالا عبارتند از ساختمان سازمان فرماندهی و کنترل آتش نشانی<sup>۱</sup> شهر لس آنجلس (شکل الف-۱۱-الف) و ساختمان مرکز قانون و عدالت اجتماعی فوت هیل<sup>۲</sup> واقع در شهر سان برناردینو<sup>۳</sup> (شکل الف-۱۱-ب).



(ب)



(الف)

شکل الف-۱۱- الف) ساختمان سازمان فرماندهی و کنترل آتش نشانی شهر لس آنجلس، ب) مرکز قانون و عدالت اجتماعی فوت هیل  
واقع در شهر سان برناردینو (عکس از I.D. Aiken)

نمونه‌هایی از ساختمان‌های مقاوم سازی شده با استفاده از جداسازهای لرزه‌ای آونگی اصطکاکی عبارتند از ساختمان دادگاه استیناف ایالات متحده<sup>۱</sup> در شهر سان فرانسیسکو (شکل الف-۱۲-الف) و ساختمان پایانه

<sup>1</sup>-Fire Command and Control Facility

<sup>2</sup>-Foothill Communities Law and Justice Center

<sup>3</sup>-San Bernardino



بین المللی فرودگاه سان فرانسیسکو (شکل الف-۱۲-ب). همچنین از پروژه‌های عظیمی که جهت مقاوم‌سازی آن از این نوع جداسازها استفاده شده، می‌توان به پل Benicia Martinez در سان فرانسیسکو (شکل الف-۱۳-الف) (ونگ ۲۰۰۲) و پل Hernando DeSoto در ممفیس (شکل الف-۱۳-ب) آمریکا اشاره نمود.



(ب)

(الف)

شکل الف-۱۲-الف) ساختمان دادگاه استیناف ایالات متحده در شهر سان فرانسیسکو، (ب) پایانه بین المللی فرودگاه سان فرانسیسکو



(ب)

(الف)

شکل الف-۱۳-جداساز FPS، الف) بکاررفته در پل Benicia Martinez در سان فرانسیسکو (ونگ ۲۰۰۲)، ب) بکار رفته در پل

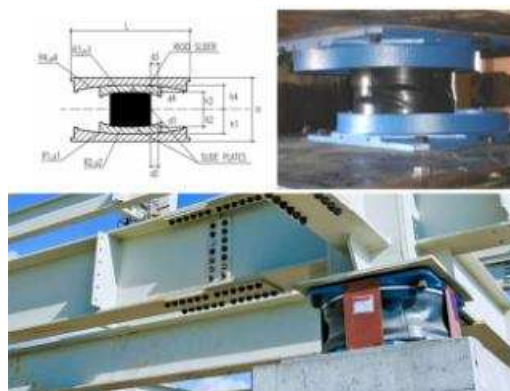
Hernando DeSoto در ممفیس

یکی دیگر از پروژه‌هایی که جهت مقابله با زلزله از جداسازهای آونگی اصطکاکی سه گانه در آنها استفاده شده، پایانه بین المللی فرودگاه سیبیا-گوکن در استانبول است که یکی از بزرگترین ساختمان‌هایی است که

<sup>1</sup>-U.S. Court of Appeals



بدینوسیله مقاوم سازی شده است. در شکل الف-۱۴ سازه این پایانه به همراه جزئیات این جداساز مشاهده می شود.



(ب)

(الف)

شکل الف-۱۴- الف) پایانه بین المللی فرودگاه سیبچا-گوکن شهر استانبول، ب) جزئیات جداساز مورد استفاده و نحوه اجرای آن

مشاهدات نشان می دهد که این سیستمها مؤثر بوده و نیرویی که از زمین به سازه منتقل می شود را به میزان قابل توجهی کاهش می دهند. می توان گفت جداسازی پایه برای کاهش نیروی انتقال یافته از زمین به سازه تا حد نصف و یا حتی یک سوم نیروی تولید شده بسیار مؤثر بوده است. طبق تحقیقی که در چین انجام شده، استفاده از این سیستمها می تواند هزینه های ساخت را بین ۵٪ تا ۲۰٪ در مقایسه با ساختمان بدون جداسازی پایه کاهش دهد.

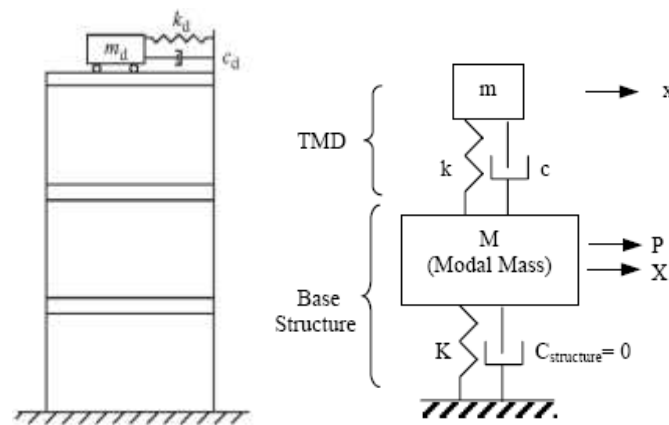
یکی از بزرگترین مشکلات این سیستمهای کنترلی، تولید لنگر واژگونی بسیار بزرگ در تکیه گاه سازه است، که موجب ناپایداری آن می شود.



### الف-۲-۲-۲ میراگر با جرم متوازن (TMD)

میراگر با جرم متوازن، نوع دیگری از سیستم‌های کنترل غیرفعال است که در سال ۱۹۰۹ برای اولین بار توسط Frahm در ایالات متحده مطرح شد. این میراگر شامل یک سیستم جرم-فنر-میراگر است که در ارتفاعی از سازه قرار داده می‌شود تا پاسخ آن را کاهش دهد (شکل الف-۱۵).

برای این کار یک جرم اضافی (در حدود ۱ تا ۲ درصد جرم مؤثر مدی اولین مد ارتعاشی سازه) در ارتفاع مناسبی از سازه نصب شده و فرکانس زاویه‌ای ارتعاش آن با فرکانس زاویه‌ای مد اول سازه هماهنگ می‌شود تا ارتعاشات سازه را کنترل نماید.



شکل الف-۱۵- سیستم سازه‌ای دارای میراگر با جرم متوازن

در واقع TMD توسط ارتعاشات سازه‌ای تحریک شده و بخشی از انرژی وارد شده به سازه صرف ارتعاش آن می‌شود. از طرف دیگر انرژی ارتعاشی وارد به TMD توسط میرایی آن کاهش یافته و در نتیجه انرژی سازه توسط میرایی این سیستم میرا می‌شود. ظرفیت جذب انرژی TMD تابعی از نسبت جرم، سختی، فرکانس تنظیمی، فرکانس طبیعی و نسبت میرایی آن به جرم، سختی، فرکانس تنظیمی، فرکانس طبیعی و نسبت میرایی سازه است. جزئیات بیشتر در این زمینه در تحقیقات لافت<sup>۱</sup> (۱۹۹۳)، واربرتون<sup>۲</sup> (۱۹۸۲) و فوجینو و ایب<sup>۳</sup> (۱۹۷۹) ارائه شده است.

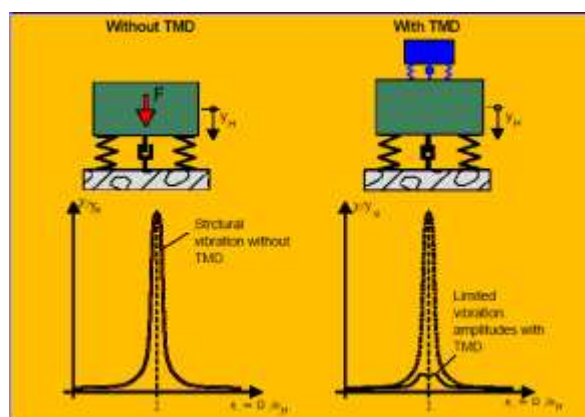
<sup>۱</sup>-Luft

<sup>۲</sup>-Warburton

<sup>۳</sup>-Fujino and Abe



اثر وجود TMD بر رفتار سازه را می‌توان معادل افزایش میرایی سازه در نظر گرفت. سازه‌هایی که میرایی کمی داشته و دارای یک مد رفتاری غالب هستند، TMD می‌تواند به طور موثری پاسخ سازه را کاهش دهد. با این وصف، جهت تامین آسایش ساکنین سازه‌هایی که در برابر باد آسیب‌پذیرند، استفاده روزافزون از TMD مشاهده می‌شود. در شکل الف-۱۶ پاسخ دینامیکی سازه بین حالت با و بدون میراگر جرم متوازن مقایسه شده است.

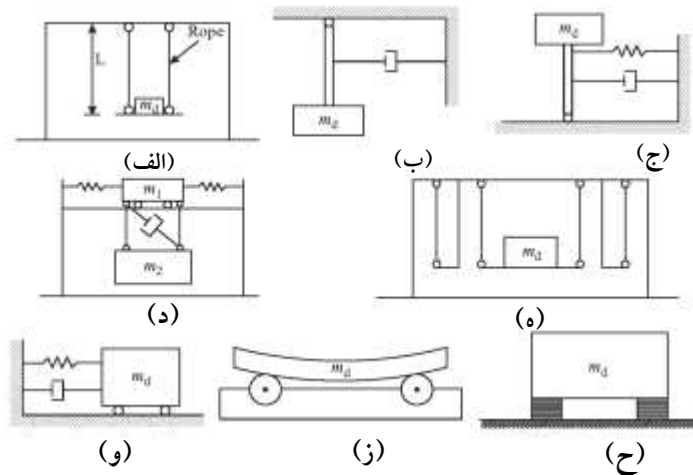


شکل الف-۱۶- پاسخ دینامیکی سیستم در حالت با و بدون میراگر با جرم متوازن

طرح‌های مختلفی که می‌توانند به عنوان TMD به کار روند، در شکل الف-۱۷ مشاهده می‌شود. نیروی مقاوم (بازگرداننده) می‌تواند توسط وزن TMD (شکل الف-۱۷-الف، ب، د، ه)، توسط یک فنر (شکل الف-۱۷-ج، و) یا توسط تکیه گاه TMD (شکل الف-۱۷-ز، ح) تولید شود. میرایی لازم نیز می‌تواند توسط یک میراگر (شکل الف-۱۷-ب، ج، د، و) یا با استفاده از مواد با میرایی بالا (شکل الف-۱۷-ح) تولید شود. در مورد TMD آونگی (شکل الف-۱۷-الف و ب) پریود ارتعاش،  $T$ ، تنها تابعی از طول بازوی آونگ،  $L$ ، و شتاب ثقل،  $g$ ، است  $(T = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}})$ . برای تنظیم فرکانس TMD آونگی با مد اصلی سازه، فضای زیادی برای بازوی آونگ مورد نیاز است. جهت کاهش این فضا باید اصلاحاتی صورت گیرد بگونه‌ای که علاوه بر طول بازوی آونگ، فرکانس TMD تابع خصوصیات دیگری نیز باشد. به عنوان مثال، می‌توان بازوی آونگ را به یک فنر متصل نمود (شکل الف-۱۷-ج)، همچنین می‌توان از میراگر دو جرمی (شکل الف-۱۷-د) استفاده کرد به گونه‌ای که یکی از جرم‌ها روی کف ساختمان بلغزد و دیگری به عنوان آونگ عمل نماید؛ یا می‌توان



از آونگ چند مرحله‌ای (شکل الف-۱۷-۵) استفاده کرد و بدین صورت فضای قائم مورد نیاز کاهش را کاهش داد.



شکل الف-۱۷- طرح‌های مختلف برای میراگر جرمی تنظیم شده

(الف) آونگ ساده، (ب) آونگ به همراه میراگیر، (ج) آونگ معکوس به همراه فنر و میراگر، (د) میراگر دو جرمی، (ه) میراگر چند مرحله‌ای، (و) جرم لغزنده به همراه فنر و میراگر، (ز) جرم قرارگرفته روی تکیه‌گاه‌های دوار، (ح) جرم روی تکیه‌گاه‌های لاستیکی

استفاده از TMDها به صورت عنوان شده دارای محدودیت‌هایی می‌باشد:

TMDها تنها برای کاهش پاسخ یک مد موثرند و همین امر باعث کاهش استفاده از آنها جهت کنترل پاسخ‌های سازه در برابر بارهای لرزه‌ای می‌شود.

TMDها فوق العاده نسبت به فرکانس تنظیمی حساس می‌باشند.

TMDها فضای زیادی را اشغال می‌نمایند.

جهت رفع این محدودیت‌ها خصوصاً موارد ۱ و ۲، در صنعت معمولاً یا از میراگرهای جرمی تنظیم شده فعال یا مختلط استفاده می‌شود که در بخش‌های مربوطه به آنها اشاره خواهد شد.

جهت غلبه بر بزرگترین مشکل میراگرهای با جرم متوازن که عدم توانایی آنها در پوشش فرکانس‌های مختلف سازه و کنترل پاسخ چند مد می‌باشد، یکی از راهکارها، استفاده از چندین جرم (MTMD) یا چند





TMD به صورت گسترده (DTMD) است. TMD گسترده (DTMD) از چندین میراگر به موازات هم تشکیل شده که فرکانس آن‌ها در محدوده فرکانس پایه ساختمان قرار دارد. علیرغم مشکلات موجود، از این میراگر به طور گسترده‌ای در دنیا جهت کنترل ارتعاشات استفاده شده که نمونه‌هایی از آن‌ها تا سال ۱۹۹۴، در جدول الف-۱ مشاهده می‌شود. در ادامه نمونه‌هایی از خصوصیات TMDهای بکار رفته در جدول الف-۱ تشریح شده است.



شکل الف-۱۸- برج جان هانکوک

#### الف) برج جان هانکوک<sup>۱</sup>

در این برج ۶۰ طبقه (شکل الف-۱۸) که در شهر بوستون واقع شده، جهت کاهش پاسخ سازه به نیروی باد از دو میراگر در دو انتهای طبقه پنجاه و هشتم و به فاصله ۶۷ متر از هم استفاده شده است. جرم هر میراگر ۳۰۰ تن بوده و متشکل از جعبه فولادی پر شده از سرب به ابعاد ۵/۲ متر در ۵/۲ متر و به عمق ۰/۹ متر میباشد که بر روی یک صفحه فلزی به طول ۹ متر نصب شده است. وزنه سربی، به صورت جانبی به وسیله فنرهای سختی که به ستونهای داخلی ساختمان قلاب شده‌اند، مهار و کنترل می‌شود. این سیستم به وسیله

<sup>۱</sup>-John Hancock Tower



شرکت انجمن LeMessurier و MTS system Corp. با هزینه‌ای بالغ بر ۳ میلیون دلار ساخته شده و انتظار می‌رود که جابجائی ساختمان را بین ۴۰ تا ۵۰ درصد کاهش دهد.

جدول الف-۱- استفاده از TMDها در سطح بین المللی

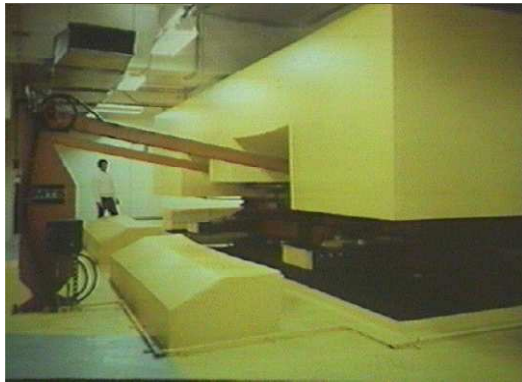
نام و نوع سازه	شهر/کشور	نوع و تعداد TMD غیرفعال	سال	توضیحات (فرکانس طبیعی، جرم موثر و ...)
برج ملی کانادا (CN Tower) برج مخابراتی	تورنتو، کانادا	۱	۱۹۷۳	-
برج جان هانکوک (ارتفاع: ۲۴۴ متر)	بوستون، ایالات متحده آمریکا	۲	۱۹۷۷	$2 \times 300 \text{ T.} / 14 \text{ Hz}$ میرایی ۴٪
تجهیزات روویس (Ruweis) (دودکش)	ابوظبی	۱	۱۹۸۲	$0.49 \text{ Hz}$ ۱۰ T.
برج خنک کننده (۲۷۸ متر) Deutsche Bundespost	نورنبرگ، آلمان	۱	۱۹۸۲	$0.67 \text{ Hz}$ ۱/۵ T.
کارخانه سیمان یانبو (Yanbu) دودکش (۸۱ متر)	عربستان سعودی	۱	۱۹۸۴	$0.49 \text{ Hz}$ ۱۰ T.
ژنراتور بادی هیدرو-کیک (Hydro-Quebec)	کانادا	۱	۱۹۸۵	$0.7-1/20 \text{ Hz}$ ۱۸ T.
برج بندر چیبا (۱۲۵ متر)	چیبا، ژاپن	۲	۱۹۸۶	$0.43-0.44 \text{ Hz}$ ۱۰، ۱۵ T.
برج (پایلون) پل آراتسو (پل کابلی)	ژاپن	۱	۱۹۸۷	-
برج (پایلون) پل خلیج یوکوهاما (Yokohama) (پل کابلی)	یوکوهاما، ژاپن	۱	۱۹۸۸	-
نیروگاه حرارتی بن قاسم (۷۰ متر)	پاکستان	۱	۱۹۸۸	$0.99 \text{ Hz}$ ۴/۵ T.
کارخانه روتیل تیویست دودکش (۴۳ متر)	استرالیا	۱	۱۹۸۹	$0.92 \text{ Hz}$ ۵ T.
برج فوکوئوکا (Fukuoka) (۱۵۱ متر)	فوکوئوکا، ژاپن	۲	۱۹۸۹	$0.31-0.33 \text{ Hz}$ ۲۵، ۳۰ T.
برج City Corp (برج ساختمانی به ارتفاع ۲۷۸ متر)	نیویورک، ایالات متحده آمریکا	۱	۱۹۷۸	$0.16 \text{ Hz}$ ۲۵۰ T. میرایی بدون TMD~۱٪ میرایی با TMD~۴٪
آسمان خراش هیگاشیاما (Higashiyama) (۱۳۴ متر)	ناگویا، ژاپن	۱	۱۹۸۹	$0.49-0.55 \text{ Hz}$ ۲۰ T.
Huis Ten Bosch Domtoren	کانادا	۱	۱۹۸۵	$0.7-1/20 \text{ Hz}$ ۱۸ T.



نام و نوع سازه	شهر/کشور	نوع و تعداد TMD غیرفعال	سال	توضیحات (فرکانس طبیعی، جرم موثر و ...)
آسمان خراش هیبیکیریوکچی (Hibikiryokuchi) (۱۳۵ متر)	چیبا، ژاپن	۲	۱۹۸۶	۰/۴۳-۰/۴۴ Hz ۱۰، ۱۵ T.
دودکش HKW (۱۲۰ متر)	ژاپن	۱	۱۹۸۷	-
دودکش BASF (۱۰۰ متر)	یوکوهاما، ژاپن	۱	۱۹۸۸	-
نیروگاه زمینس (۷۰ متر)	پاکستان	۱	۱۹۸۸	۰/۹۹ Hz ۴/۵ T.
جزیره رُکو P&G (۱۱۷ متر)	استرالیا	۱	۱۹۸۹	۰/۹۲ Hz ۵ T.
برج چیفلی (Chifley) (۲۰۹ متر)	فوکوآکا، ژاپن	۲	۱۹۸۹	۰/۳۱-۰/۳۳ Hz ۲۵، ۳۰ T.
برج آکیتا (۱۱۲ متر)	ناگویا، ژاپن	۱	۱۹۸۹	۰/۴۹-۰/۵۵ Hz ۲۰ T.
برج سیدنی (ارتفاع: ۳۰۵ متر)	سیدنی، استرالیا	۱-آونگی	۱۹۸۱	۰/۱۰، ۰/۵۰ Hz ۲۲۰ T.
الخیار (۲ دودکش) (ارتفاع: ۱۲۰ متر)	عربستان سعودی	۱	۱۹۸۲	۰/۴۴ Hz ۷ T.

### ب) مرکز City Corp

این برج به ارتفاع ۲۷۹ متر در شهر منهتن ایالت نیویورک واقع شده است (شکل الف-۱۹-الف). میراگر جرمی تنظیم شده این مرکز نیز توسط شرکت LeMessurier طراحی و ساخته شد. پیروید غالب سازه آن ۶/۵ ثانیه و در طول هر محور نسبت میرایی آن ۱ درصد است. میراگر جرمی تنظیم شده این ساختمان در تاج سازه قرار گرفته و دارای جرمی برابر ۳۵۰ تن، حدود ۲ درصد جرم مدی موثر در مد اول می باشد (شکل الف-۱۹-ب). این میراگر به گونه ای طراحی شده که در دو جهت سازه ساختمان، دارای پیروید کاری متغیر  $20 \pm 6/25$  ثانیه و میرایی خطی قابلیت تنظیم بین ۸٪ و ۱۴٪ بوده و حداکثر جابجائی آن به  $1/4 \pm$  متر محدود گردیده است. با استفاده از این میراگر انتظار می رود دامنه حرکت نسبی سازه ۵۰٪ کاهش یابد یا به عبارت دیگر میرایی سازه به ۴٪ افزایش یابد. میراگر متشکل است از یک بلوک بتنی به ابعاد  $9/1 \times 9/1 \times 2/6$  متر (طول  $\times$  عرض  $\times$  ارتفاع) که بر روی ۱۲ بلبرینگ تحت فشار هیدرولیکی به قطر ۶۰ سانتی متر قرار دارد.



(ب)



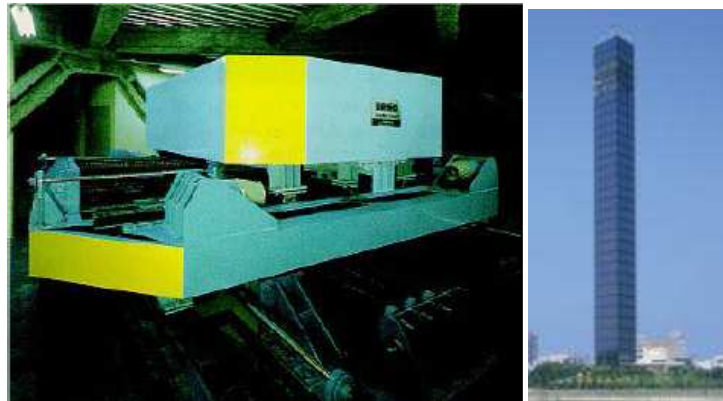
(الف)

شکل الف-۱۹- (الف) برج City Corp، (ب) TMD نصب شده در برج

### ج) برج بندر چیبای<sup>۱</sup>

برج بندر چیبای (ساخته شده در سال ۱۹۸۶) اولین برجی در ژاپن است که به TMD مجهز شده است. سازه این برج ۱۲۵ متری، اسکلت فولادی به وزن ۱۹۵۰ تن و طول وجه ۱۵ متر می باشد (شکل الف-۲۰-الف). پیرو مد اول و دوم در جهت X به ترتیب برابر ۲/۲۵ ثانیه و ۰/۵۱ ثانیه بوده و در جهت Y این پیرودها به ترتیب برابر ۲/۷ ثانیه و ۰/۵۷ ثانیه است. میرایی مد اصلی برابر ۰/۵٪ تخمین زده شده است. میرایی متناسب با فرکانس های بالاتر، بیشتر در نظر گرفته شد. هدف از بکارگیری TMD افزایش میرایی برای هر دو جهت X و Y بود. سیستم میراگر ساخته شده توسط کارخانه فولاد میتسوبیشی در شکل الف-۲۰-ب نشان داده شده است. نسبت جرم میراگر به جرم مد اول در جهات X و Y به ترتیب برابر ۱/۱۲۰ و ۱/۱۸۰، پیرو مد در جهات X و Y به ترتیب برابر با ۲/۲۴ ثانیه و ۲/۷۲ ثانیه و میرایی میراگر ۱۵٪ در نظر گرفته شدند. حداکثر حرکت نسبی بین میراگر و برج در هر جهت به  $\pm 1$  متر می رسد. با وجود میراگرها حدود ۳۰ الی ۴۰ درصد تغییر مکان بالاترین طبقه را کاهش یافته و حدود ۳۰٪ کاهش لنگرها مورد انتظار است.

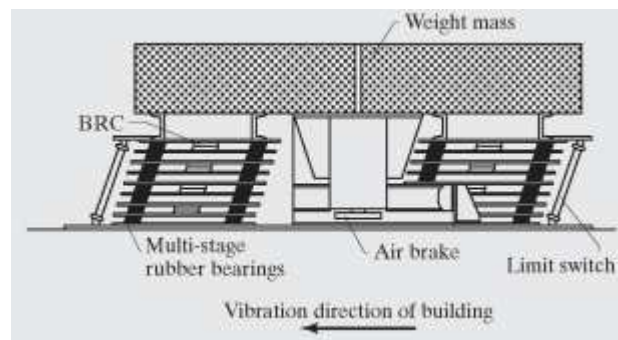
<sup>1</sup>-Chiba Port Tower



(الف) (ب)

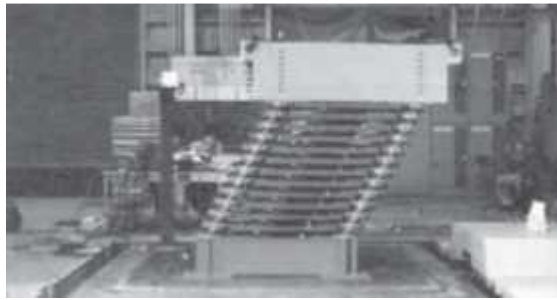
شکل الف-۲۰- الف) برج بندر چابا، ب) TMD نصب شده در برج (حق چاپ برای J. Connor.

میراگرهای اولیه دارای مکانیزم‌های پیچیده‌ای برای سیستم‌های تکیه گاهی و میرایی بودند، جرم‌های نسبتاً زیادی داشتند، فضای زیادی را اشغال می‌کردند و بسیار پرهزینه بودند. در نسخه‌های کنونی، همانند شکل الف-۲۱ طراحی بگونه‌ای صورت می‌گیرد که محدودیت‌های فوق کمینه شوند. در این شکل از مجموعه‌ای از الاستومرها به عنوان فنر برشی و ترکیب لاستیک و قیر<sup>۱</sup> به عنوان میرایی ویسکوالاستیک استفاده شده است. ابعاد و اندازه دستگاه مناسب است، ضمن اینکه نیازی به سیستم‌های کنترلی پیچیده نمی‌باشد، به صورت چند جهت‌ه عمل می‌نماید و به راحتی قابل اصلاح و نصب می‌باشد. در شکل الف-۲۲ میراگر آزمایش شده بر روی میز لرزه و نمونه نصب شده در برج Ten Bosch ناگاساکی مشاهده می‌شود.



شکل الف-۲۱- نمونه‌ای از TMD ساخته شده با میراگر و فنر

<sup>۱</sup>-Bitumen Rubber Compound (BRC)



(الف)

(ب)

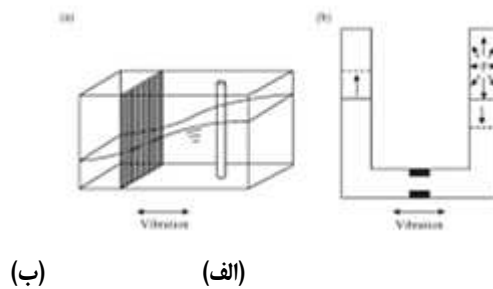
شکل الف-۲۲- الف) نمونه ای از TMD آزمایش شده بر روی میز لرزه، ب) TMD برج Ten Bosch ناگاساکی (حق چاپ برای J. Connor).

### الف-۲-۲-۳ میراگر مایع متوازن<sup>۱</sup> (TLD)

اساس یک میراگر مایع متوازن شبیه به میراگر با جرم تنظیم شده است. به طور خاص، یک جرم ثانویه متحرک که با جرم مایع تعریف می شود به سیستم سازه ای اولیه اضافه می شود. گرانش به صورت نیروی بازگرداننده عمل کرده و اتلاف انرژی عمدتاً از طریق اغتشاش محیط مایع و اصطکاک مایع با جداره بدست می آید. در شکل الف-۲۳ دو نمونه متداول از TMD ها مشاهده می شوند. در نمونه نوسانی حرکت افقی محفظه موجب حرکت رفت و برگشتی سطح آزاد مایع می شود. نمونه ستونی مایع متوازن<sup>۲</sup> (TLCD) از یک محفظه U شکل که تا ارتفاع مشخصی با مایع پر شده تشکیل شده است. همانطور که عنوان شد در نوع نوسانی از یک یا چند شبکه یا میله جهت فراهم کردن میرایی مورد نیاز استفاده شده و فرکانس طبیعی توسط ابعاد مخزن یا عمق مایع درون مخزن تنظیم می شود. در نوع ستونی، میرایی از طریق جریان پر تلاطم عبوری از روزنه فراهم شده و فرکانس طبیعی تابعی از شکل ستون و فشار هوا است.

<sup>1</sup>-Tuned Liquid Damper

<sup>2</sup>-Tuned Liquid Column Damper



شکل الف-۲۳- میراگر TLD، (الف) ستونی روزنه<sup>۱</sup> دار، (ب) نوسانی<sup>۲</sup> حاوی میله و مش

TLDها دارای دو مزیت بزرگ هستند. اول: موثر بودن آنها برای تمام جهات بارگذاری جانبی و دوم: آب موجود در TLD که می‌تواند جهت مصارف آتش نشانی (سیستم ضد حریق) بکار رود. از طرف دیگر، TLDها دارای دو نقطه ضعف هستند. اول: نسبت به TMDها فضای بیشتری را به دلیل پایین بودن وزن مخصوص آب نسبت به سایر مواد مورد استفاده (مانند بتن و فولاد) در TMD اشغال می‌نمایند. دوم: برخلاف TMD، پاسخ یک TLD در حالت کلی به شدت غیرخطی است. حرکت نوسانی سطح آزاد مایع یا جریان مایع از درون روزنه‌ها پدیده‌هایی کاملاً غیرخطی هستند و این امر باعث پیچیده شدن روند تحلیل و طراحی سازه‌های حامل TLD می‌شود.

به علت کمبود مدل‌های ساده‌منطقی برای تشریح رفتار دینامیکی یک TLD، تا به امروز رویه‌ی طراحی با مقبولیت عام وجود ندارد. به دلیل شباهت نزدیک اصل اساسی عملکردی بین TMD و TLD، همان روشی که برای TMDها شرح داده شد می‌تواند برای TLDها هم بکار رود. اما چون جرم و ضربه‌گیر مجازی وابسته به دامنه هستند، باید به وسیله آزمایش تعیین شوند و لذا ممکن است در اثر جزئیات اجرایی تغییر کنند. بنابراین انجام آزمایش برای بهینه‌سازی رفتار دینامیکی TLD نسبت به سازه اولیه الزامی است.

میراگرهای مایع متوازن نخست در کشتی‌ها مورد استفاده قرار گرفتند و در اوایل دهه ۸۰ میلادی از آنها جهت کاهش پاسخ‌های ارتعاشی سازه‌های عمرانی استفاده گردید. میراگر مایع متوازن در ابتدا برای کاهش

<sup>1</sup>-Orifice  
<sup>2</sup>-Sloshing



ارتعاشات ناشی از باد در سازه‌های بلند با فرکانس‌های طبیعی خیلی کوچک بکار رفتند. اولین TLD نوسانی غیرخطی در ژاپن اجرا شد. در جدول الف-۲ نمونه‌هایی از کاربرد این سیستم ارائه شده است. در ادامه نمونه‌هایی از خصوصیات TLDهای بکار رفته در ساختمان‌های واقعی تشریح شده است.

جدول الف-۲- استفاده از TLDها در سطح بین‌المللی

نام و نوع سازه	شهر/کشور	نوع و تعداد TLD غیرفعال	سال	توضیحات (فرکانس طبیعی، جرم موثر،...)
برج فرودگاه ناگازاکی (۴۲ متر)	ناگازاکی	۲۵ - نوسانی در مخزن استوانه‌ای	۱۹۸۷	۱/۰۷ Hz ۱ T. (تقریبی)، (نصب موقت)
برج دریایی یوکوهاما (۱۰۵ متر)	یوکوهاما، ژاپن	۳۹ - نوسانی در مخزن استوانه‌ای	۱۹۸۷	۰/۵۵ Hz ۱/۶ T.
برج طلایی (۱۳۶ متر)	اوداتسو، ژاپن	۱۶ - نوع یک جهته مستطیلی	۱۹۸۸	۰/۴۲ Hz ۹/۶ T.
هتل پرینس Shin-Yokohama (۱۴۹ متر)	یوکوهاما، ژاپن	۳۰ - نوسانی در مخزن استوانه‌ای	۱۹۹۱	۰/۳۱ Hz ۸۳/۵ T.
برج رادیو و تلویزیون Mount Wellington (برج مشبک، ۱۰۴ متر)	هوبارت، استرالیا	۸۰ - نوسانی در مخزن استوانه‌ای	۱۹۹۲	۰/۷۰ Hz ۰/۶ T.
ساختمان TYG (۱۵۹ متر)	آتسوگی، ژاپن	۷۲۰، نوع دونات دوگانه (حلقه‌ای)	۱۹۹۲	۰/۵۳ Hz ۱۸/۲ T.
برج فرودگاه (مراقبت) ناریتا (۸۷ متر)	ناریتا، ژاپن	۱ - نوسانی در مخزن استوانه‌ای	۱۹۹۳	۱/۳۰ Hz ۱۶/۵ T. + ذرات معلق
برج فرودگاه (مراقبت) هاندا (۱۷۸ متر)	توکیو، ژاپن	۱ - نوسانی در مخزن استوانه‌ای	۱۹۹۳	۰/۷۷ Hz ۲۱ T.

الف) برج بین‌المللی فرودگاهی توکیو<sup>۱</sup>

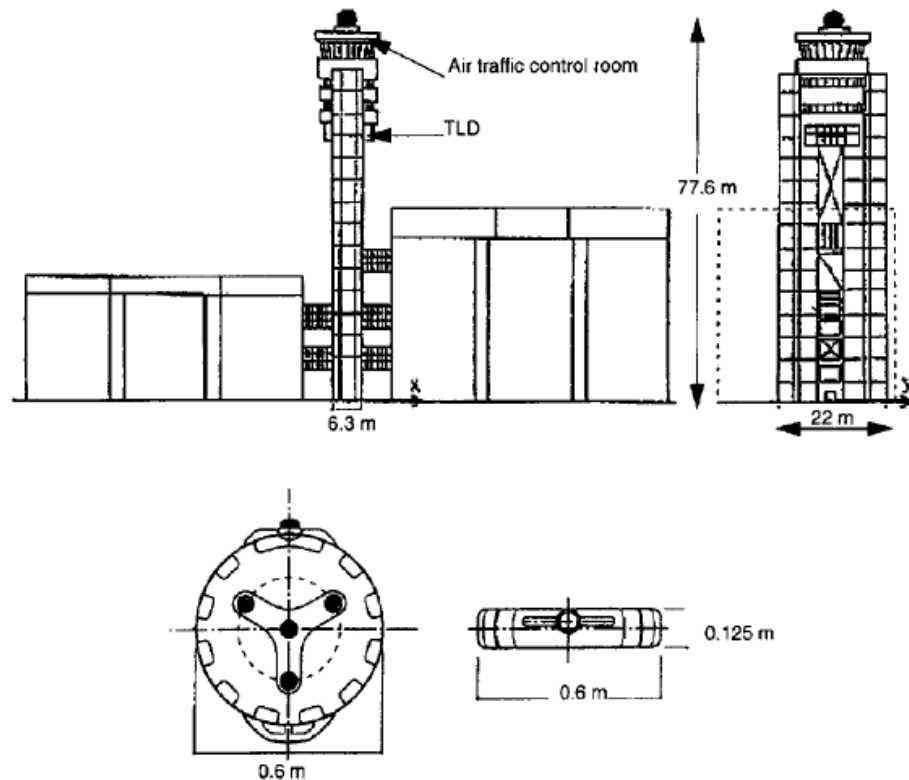
برج بین‌المللی فرودگاهی در توکیو یکی از برج‌های فرودگاهی است که در سال ۱۹۹۳ به میراگرهای مایع مجهز شد. در این برج که ۷۷/۶ متر ارتفاع دارد، ۱۴۰۰ مخزن آب پلی اتیلنی که در آن‌ها یک سری ذرات شناور و مواد نگه دارنده نیز می‌باشد، نصب شد. این مخازن سیلندری شکل هر کدام دارای قطر ۶۰ سانتی-

<sup>۱</sup>-Tokyo airport tower





متر و ارتفاع ۱۲/۵ سانتی متر هستند (شکل الف-۲۴). بر اساس داده‌های بدست آمده پس از یک طوفان، استفاده از میراگر مایع متوازن باعث افزایش میرایی تا ۱٪ شد.

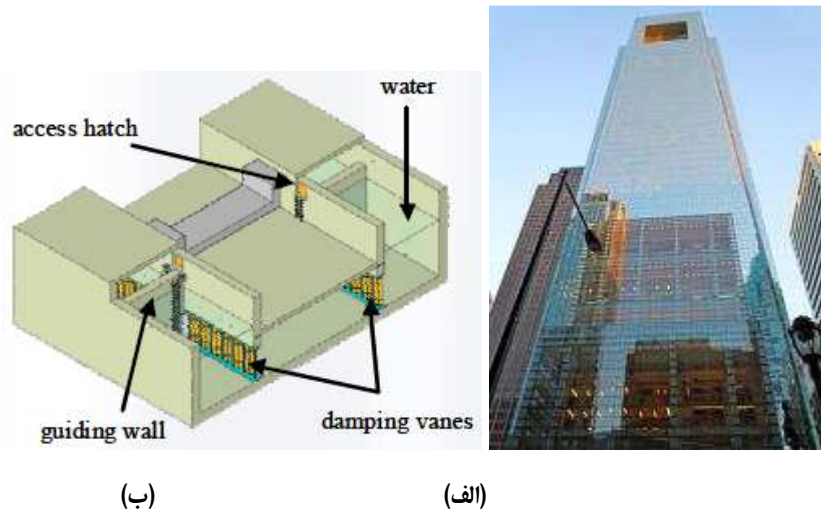


شکل الف-۲۴- برج فرودگاه بین المللی در توکیو و نمایی از واحدهای میراگر مایع که روی برج نصب شده است

(ب) مرکز کامکست<sup>۱</sup>

در این برج ۵۸ طبقه به ارتفاع ۲۹۷ متر واقع در شهر ویلادلفیای ایالت پنسیلوانیا، جهت کنترل ارتعاشات ناشی از باد از میراگر مایع متوازن استفاده شده است (شکل الف-۲۵-الف). میراگر متشکل از محفظه بتنی دوجداره با ظرفیت ۱۱۰۰ مترمکعب، بزرگ ترین میراگر از این نوع در آمریکای شمالی می باشد (شکل الف-۲۵-ب). این سیستم دارای عرض زیادی می باشد و مخزن آن برای کارایی بهتر به دو قسمت تقسیم شده است.

<sup>1</sup>-Comcast Center

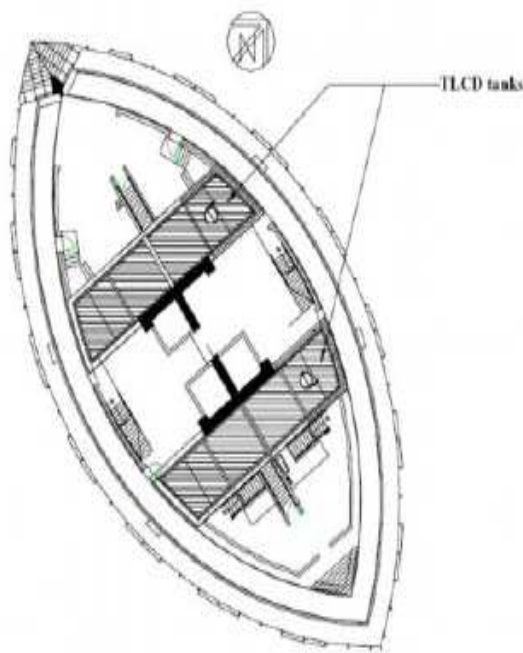


شکل الف-۲۵- الف) برج کامگست، ب) مخزن بتنی متشکل از دو بخش

ج) مرکز وان وال<sup>۱</sup>

این برج ۴۸ طبقه به ارتفاع ۱۵۷/۸ متر که در ونکوور<sup>۲</sup> کانادا واقع است که دارای پلانی بیضی شکل و شامل دو میراگر مایع متوازن در بالاترین تراز است (شکل الف-۲۶). مقطع بیضی شکل دارای نسبت لاغری ۱:۷ است. این دو میراگر هر یک حاوی ۲۳۰ تن آب بوده و برای کنترل ارتعاشات ناشی از باد که ممکن است موجب نارضایتی ساکنین شود، نصب شده‌اند. از مزایای استفاده از این سیستم در این سازه این است که حرکت ساختمان را تا ۳۰ درصد کاهش داده است. همچنین از مزایای دیگر آن این است که اولاً موجب کاهش پاسخ‌های شتاب سازه در اثر باد شده، ثانیاً مخزن آب آن می‌تواند برای جلوگیری از حریق و خنک‌کننده استفاده شود و ثالثاً هزینه‌ی ساخت و نگهداری آن در مقایسه با سایر سیستم‌های میراگر متداول بسیار کمتر است.

<sup>۱</sup>-One Wall Center  
<sup>۲</sup>-Vancouver



(ب)



(الف)

شکل الف-۲۶- الف) ساختمان One Wall Center در کانادا، ب) پلان ساختمان نشان دهنده موقعیت میراگرها

#### د) هتل سافیتل<sup>۱</sup>

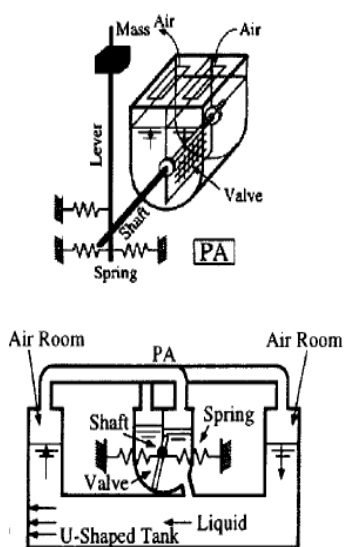
در این هتل ۲۶ طبقه که در توکیو ژاپن واقع شده، از میراگرهای ستون مایع دارای تجهیزات تنظیم پریود (LCD-PA) استفاده شده است. میراگر این هتل شامل یک مخزن U شکل با مقطع مستطیلی، دو اتاق هوا و تجهیزات تنظیم پریود است. وقتی مخزن در اثر تحریک سازه شروع به حرکت می کند، مایع درون مخزن در هر دو جهت افقی و عمودی حرکت کرده و بنابراین در یک طرف فشار هوا افزایش پیدا کرده و در طرف دیگر کاهش پیدا می کند. این نوسانات سینوسی فشار، حرکت مایع درون مخزن را تقویت می کند که البته در اثر آن شیر، شفت و فنرها نیز به حرکت در می آیند.

میراگر مورد استفاده در این هتل از نوع ستونی دوجهته با مقطع مستطیلی با چهار دستگاه تنظیم پریود بوده و وزن کل و وزن موثر مایع آن به ترتیب برابر ۵۸ و ۳۶ تن می باشد. بخشی از مخزن خالی بوده تا مایع

<sup>۱</sup>-Sofitel Hotel



بصورت آزاد قادر به حرکت باشد. همچنین دارای چهار مخزن قائم<sup>۱</sup> (VR) در هر گوشه بالای بخش افقی و چهار مخزن هوا که توسط پارتیشن از هم جدا شده‌اند، می‌باشد. دستگاه تنظیم پریود (PA) بین دو مخزن قائم قرار گرفته است. طبق مشاهدات انجام شده این سیستم قادر است مقادیر شتاب حداکثر را ۵۰ تا ۷۰ درصد نسبت به مقادیر اولیه و مقدار مجذور مربعات شتاب را تا ۵۰٪ کاهش دهد.



(ب)



(الف)

شکل الف-۲۷- (الف) هتل سافیتل، (ب) جزئیات میراگر مایع متوازن با قابلیت تنظیم پریود

#### الف-۲-۲-۴- میراگر جاری شونده فلزی<sup>۲</sup>

یکی از مکانیزم‌های مؤثر جهت استهلاک انرژی ورودی ناشی از زلزله، استفاده از تغییرشکل غیرالاستیک فلزات (شکل پذیری) می‌باشد که در ساخت میراگرهای جاری شونده فلزی مورد استفاده قرار گرفته است. تحقیقات اولیه در این زمینه از دهه ۷۰ میلادی آغاز گردید. از آن زمان تا کنون انواع مختلفی از این دستگاه پیشنهاد شده است که چند نمونه از آن‌ها در شکل الف-۲۸ مشاهده می‌شود. در شکل الف-۲۸-الف اتلاف انرژی توسط تغییرشکل‌های غیرالاستیک کششی قاب مستطیلی شکل فولادی در جهت قطری بادبند

<sup>1</sup>-Vertical Reservoir

<sup>2</sup>-Metallic Yield Dampers



کششی صورت می‌گیرد. در این حالت کمانش بادبند فشاری به ندرت رخ خواهد داد زیرا طول موثر آن کم بوده و طراحی بگونه‌ای انجام می‌شود که نیروی بحرانی کمانش از نیروی جاری شدن بیشتر گردد.

در بسیاری از میراگرهای جاری شونده فلزی، از ورقهای فلزی نرم با شکل‌های مستطیلی،  $X$  (ADAS<sup>1</sup>) (شکل الف-۲۸-ب) یا مثلثی (TADAS<sup>2</sup>) شکل (شکل الف-۲۸-ج)، که فلز آن‌ها تقریباً به طور یکنواخت تسلیم می‌شود، استفاده می‌شود. ورق‌ها به صورت موازی و به تعداد مورد نیاز در کنار هم قرار گرفته و نهایتاً میراگر در انتهای بادبند (۷ یا ۸) در سیستم نصب می‌شود. در این سیستم، حرکت نسبی طبقات نسبت به یکدیگر موجب حرکت ورقه بالایی میراگر نسبت به ورقه پایینی آن می‌شود (شکل الف-۲۹)؛ این عمل موجب جاری شدن تعداد زیادی از ورقه‌های فلزی جایگذاری شده در میراگر شده و این جاری شدن خود موجب مستهلک نمودن مقدار زیادی از انرژی می‌شود.

همچنین مصالح دیگری مانند سرب<sup>۳</sup> و آلیاژهای حافظه دار<sup>۴</sup> نیز برای این نوع میراگرها استفاده می‌شود. با اضافه کردن این مجموعه به سیستم سازه‌ای در تغییر مکان‌های کوچک، سختی سازه افزایش یافته و در تغییر مکان‌های بزرگ‌تر به دلیل تغییر شکل‌های غیرالاستیک در میراگر، افزایش میرایی نیز مشاهده خواهد شد.

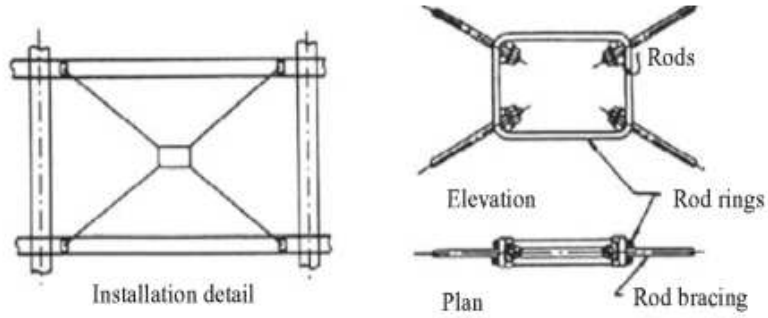
---

<sup>1</sup>Added Damping And Stiffness

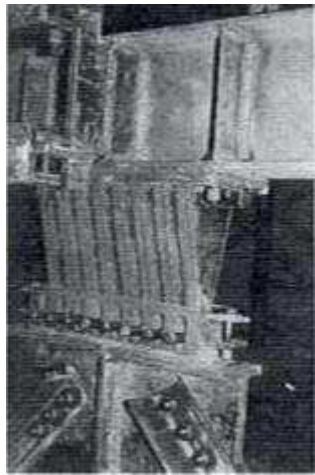
<sup>2</sup>-Triangular Added Damping And Stiffness

<sup>3</sup>-Lead

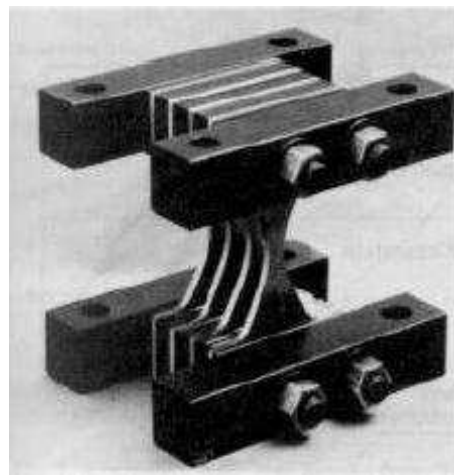
<sup>4</sup>-Shape – Memory Alloys



(الف)



(ج)



(ب)

شکل الف-۲۸- الف) سیستم میراگر جاری شونده فلزی در بادبند (تایلر ۱۹۸۵)، ب) میراگر ADAS، ج) میراگر TADAS

PLATE CONFIGURATION	PROFILE	DEFORMATION
Rectangle		
Triangle		
X Shape		

شکل الف-۲۹- تغییر شکل ها ورق ها با شکل های گوناگون



سایر شکل بندی میراگرهای جاری شونده فلزی عبارتند از نوع خمشی<sup>۱</sup>، لانه زنبوری<sup>۲</sup>، میراگرهای شکاف دار<sup>۳</sup> و نوع پانل برشی<sup>۳</sup>. ویژگی های مطلوب این میراگرها عبارتند از:

۱- رفتار هیسترتیک پایداری دارند.

۲- در دراز مدت قابل اعتماد هستند.

۳- حساسیت نسبی آنها به دمای محیط ناچیز است.

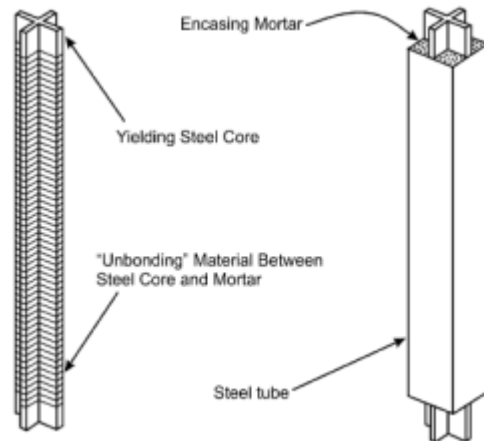
نوع دیگری از نحوه بکارگیری اصل جاری شدن فلزات، استفاده از آنها بعنوان بادبند می باشد. این بادبندها دارای یک هسته از جنس ورق فلزی هستند که در یک قوطی فلزی پر شده با بتن قرار می گیرند (شکل الف-۳۰). جهت کاهش اصطکاک، یک پوشش مخصوص بین هسته فلزی و بتن قرار گرفته است. ورق فلزی هسته، دارای خاصیت استهلاک انرژی پایداری توسط تسلیم شدن تحت بارگذاری محوری رفت و برگشتی است. به علت اینکه پروفیل فلزی با بتن احاطه شده، تحت بارگذاری فوق دچار کمزش فشاری نمی شود.

---

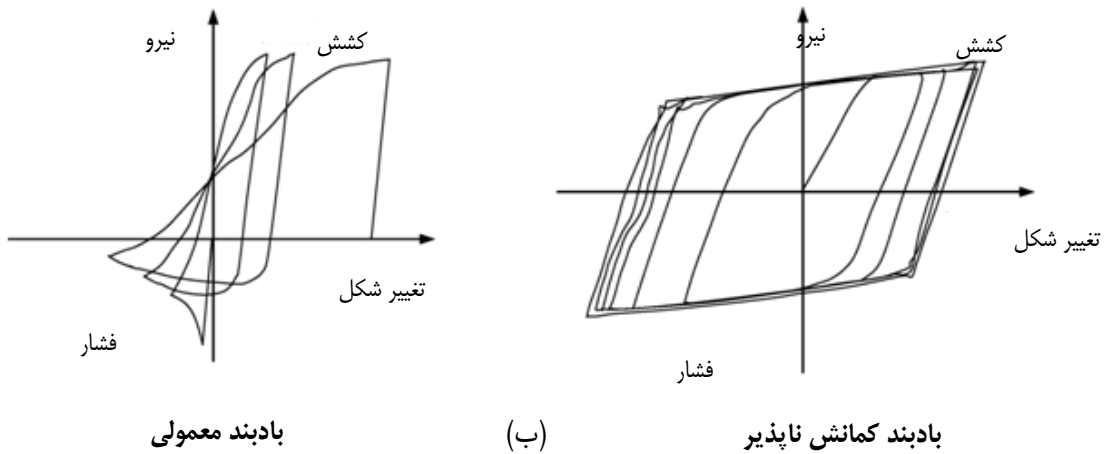
<sup>۱</sup>-Bending Type of Honeycomb

<sup>۲</sup>-Slit Dampers

<sup>۳</sup>-Shear Panel Type



(الف)



شکل الف-۳۰- الف) بادبند دارای هسته فلزی با خاصیت جاری شدگی، ب) مقایسه رفتار چرخه‌ای بادبند کماتش ناپذیر با بادبند معمولی

در ادامه به نمونه‌هایی از این بادبندها که در عمل بکار رفته‌اند اشاره می‌شود.

الف) ساختمان فدرال Wallace F. Bennett واقع در Salt Lake City ایالت یوتا

ساختمان ۸ طبقه ساخته شده در دهه ۶۰ میلادی در نزدیکی گسل واساچ<sup>۱</sup> قرار دارد و انتظار نمی‌رفت که در زلزله‌های شدید ناشی از گسل مذکور عملکرد مناسبی داشته باشد. سطوح عملکرد مطابق با آیین نامه FEMA273 به این صورت انتخاب گردید که سطح عملکرد "ایمنی جانی" برای زلزله با دوره بازگشت ۴۷۵ ساله و سطح عملکرد "آستانه فروریزش" برای زلزله با دوره بازگشت ۲۴۷۵ ساله بدست آید. همانند بسیاری

<sup>۱</sup>-Wasatch Fault





از پروژه‌های مقاوم‌سازی، در جریان مقاوم‌سازی باید کمترین مزاحمت برای ساکنین ایجاد گردد. در نتیجه، از یک سیستم بادبندی در محیط خارجی استفاده گردید. در طرح نهایی از ۳۴۴ عدد بادبند کمانش ناپذیر<sup>۱</sup> BRB با نیروی جاری شدگی بین ۹۱۷ تا ۸۴۷۷ کیلونیوتن و طول‌های ۳/۴ و ۸/۸ متر استفاده شده است. در شکل الف-۳۱ نمای ساختمان مقاوم‌سازی شده در دو دهانه ممتد نشان داده شده است. این ساختمان اولین ساختمان فدرالی است که از بادبندهای کمانش ناپذیر جهت مقاوم‌سازی آن استفاده شده است.



(ب)

(الف)

شکل الف-۳۱- الف) ساختمان فدرال Wallace F. Bennett، ب) مقاوم سازی با بادبندهای BRB

ب) مرکز پزشکی Kaiser Santa Clara واقع در ایالت کالیفرنیا این بیمارستان ۳۲۷ تخت خوابه با مساحت ۶۵۹۶۰ متر مربع در سال ۲۰۰۷ به بهره برداری رسید. در سیستم باربر جانبی سازه فلزی این ساختمان، از ۱۲۰ بادبند کمانش ناپذیر (BRB) استفاده شده است. این ساختمان بین دو گسل بزرگ سان اندریاس<sup>۲</sup> و هیوارد<sup>۳</sup> قرار دارد و در معرض زلزله‌های حوزه نزدیک گسل است. طراحی لرزه‌ای برای دو سطح عملکرد صورت گرفت. حداکثر دررفت<sup>۴</sup> ۱/۲۵٪ تحت زلزله سطح طراحی با دوره بازگشت ۴۷۵ سال و حداکثر دررفت ۲/۲۵٪ تحت زلزله کران بالا با دوره بازگشت ۹۷۵ سال. در

<sup>۱</sup>-Buckling Restrained Brace

<sup>۲</sup>-San Andreas

<sup>۳</sup>-Hayward

<sup>۴</sup>-Drift



طراحی نهایی، بادبندها در دو جهت اصلی در هر طبقه در ۱۰ دهانه به صورت ۸ (شورون) در نظر گرفته شدند (شکل الف-۳۲) و مقاومت جاری شدن بادبندها بین ۱۱۱۵ تا ۲۴۵۰ کیلونیوتن در نظر گرفته شد. تحلیل لرزه‌ای طرح نهایی نشان می‌دهد که در زلزله کران بالا، در سیستم باربر ثقلی تعداد اعضای محدودی جاری می‌گردند و حداکثر گریز به ۱/۵٪ محدود می‌شود.



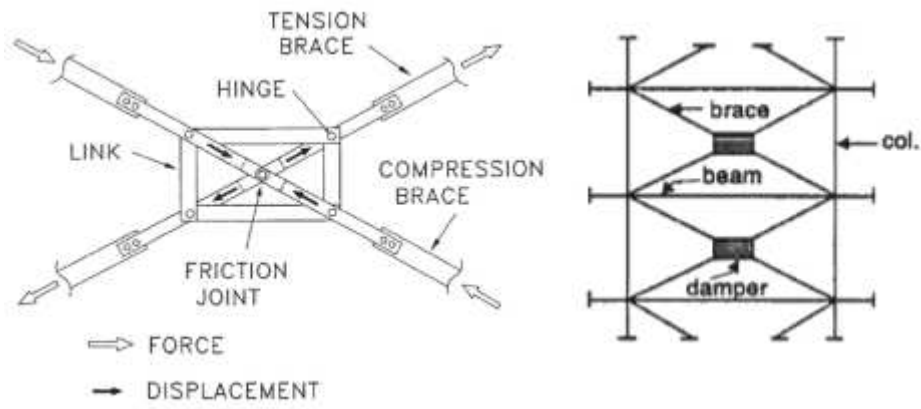
(ب)

(الف)

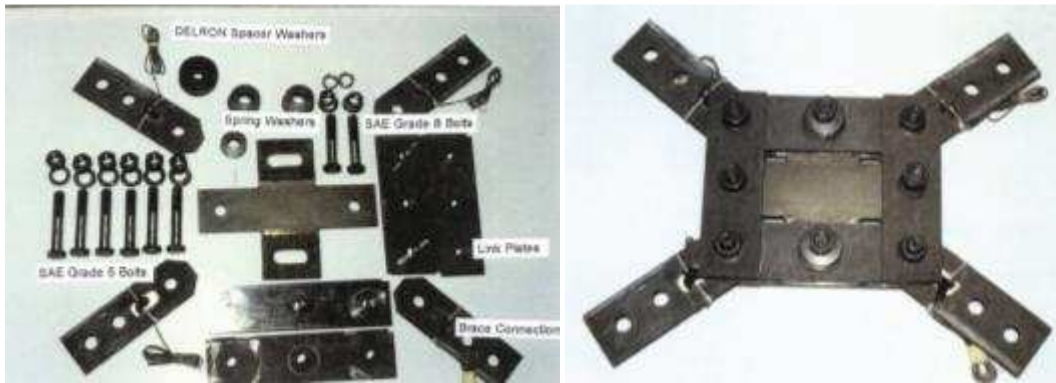
شکل الف-۳۲- الف) بیمارستان Kaiser Santa Clara، ب) بکارگیری بادبندهای BRB

#### الف-۲-۲-۵- میراگر اصطکاکی

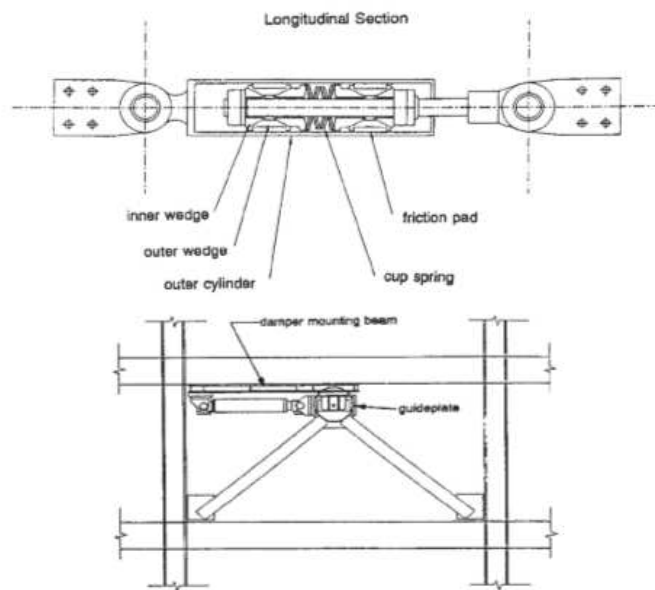
میراگرهای اصطکاکی از مکانیزم اصطکاک جامدات استفاده می‌کنند. در این مکانیزم، در اثر لغزش دو جسم جامد نسبت به یکدیگر انرژی قابل توجهی مستهلک می‌شود. در طول یک زمین لرزه شدید، میراگرهای اصطکاکی تحت یک نیروی از پیش تعیین شده قبل از آنکه اعضای سازه‌ای جاری شوند شروع به لغزش کرده، بخش زیادی از انرژی وارد بر سازه را مستهلک می‌کنند.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل الف-۳۳- الف) میراگر اصطکاکی پال، ب) میراگر اصطکاکی لغزشی شکاف دار، ج) میراگر سومیتسو



در اوایل دهه ۹۰ میلادی، پال و مارش<sup>۱</sup> (۱۹۸۲) میراگرهای اصطکاکی غیرفعال بر اساس ترمزهای اصطکاکی را ابداع نمودند. پس از آن پیشرفت‌های چشمگیری در زمینه میراگرهای اصطکاکی حاصل گردید و رفتار آنها به صورت تحلیلی و آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار گرفت. در شکل الف-۳۳-الف میراگر اصطکاکی بادبندی ضربدری مشاهده می‌شود. در اتصالات لغزشی شکاف دار<sup>۲</sup> (شکل الف-۳۳-ب) با استفاده از نصب لنت‌های ترمز بین صفحات فولادی، به طور مداوم نیروی اصطکاکی مورد نیاز تولید می‌شود. هنگامیکه این اتصال تحت بار لرزه‌ای قرار می‌گیرد، بادبند فشاری و کششی باعث ایجاد لغزش در محل اتصال اصطکاکی شده و در نتیجه اتلاف انرژی صورت می‌گیرد. در شکل الف-۳۳-ج مدل میراگر اصطکاکی سومیتومو<sup>۳</sup> که بر روی بادبند K (۸) نصب شده، نشان داده شده است.

در تحلیل این سیستم‌ها یک مدل رفتار هیسترتیک برای میراگر تعیین شده و از آن در آنالیز سازه استفاده می‌شود. یکی از نکات مهم در طراحی این میراگرها تعیین نیروی است که در آن لغزش رخ می‌دهد. میراگرهای اصطکاکی در مقایسه با دیگر ادوات کنترل غیرفعال به لحاظ کاربرد در ساختمان، بسیار ارزان و اقتصادی هستند. نمونه‌هایی از کاربرد این میراگرها در ساختمان‌های واقعی در زیر آمده است.

الف) ساختمان کتابخانه مک کونیل<sup>۴</sup> دانشگاه کُنُردیا<sup>۵</sup> مونترآل<sup>۶</sup> کانادا

در این ساختمان از ۱۴۳ میراگر اصطکاکی از نوع پال استفاده شده است (شکل الف-۳۴). جهت تعیین نیروی لغزش بهینه میراگرها، تعدادی تحلیل انجام گردید و نیروی برابر ۶۰۰ الی ۷۰۰ کیلونیوتن (وابسته به موقعیت دستگاه) بدست آمد. برای تحلیل‌های سه بعدی تاریخچه زمانی، سیگنال‌های زلزله بر اساس محدوده وسیعی از محتوای فرکانسی و شتاب حداکثر زمین مقیاس شده به  $0.18g$  استفاده شد. تحت

<sup>۱</sup>-Pall and Marsh

<sup>۲</sup>-Slotted slip joints

<sup>۳</sup>-Sumitomo friction damper

<sup>۴</sup>-McConnel

<sup>۵</sup>-Concordia University

<sup>۶</sup>-Montreal



تحریکات یاد شده میرایی حدود ۵۰٪ به دست آمد. همچنین استفاده از این میراگرها هزینه ساخت سازه را ۱/۵٪ کاهش داد.



شکل الف-۳۴- میراگر پال مورد استفاده در دانشگاه کُنکُردیا

(ب) مرکز دولت Monterey County

این ساختمان سه طبقه فولادی دارای مساحت ۹۲۰۰ مترمربع بوده و جهت پوشش نما از پانلهای بتنی پیش ساخته استفاده شده است (شکل الف-۳۵-الف). یکی از اضلاع این سازه توسط میراگرهای اصطکاکی مقاوم سازی شد. مقاوم سازی بر اساس آیین نامه FEMA-356 انجام شد. بدین منظور از ۲۴ میراگر اصطکاکی در طبقه اول با ظرفیت هر یک ۱۱۳ کیلونیوتن و ۲۴ میراگر اصطکاکی در طبقه دوم با ظرفیت هر یک ۸۹۰ کیلونیوتن استفاده شد در شکل الف-۳۵-ب نمای نزدیکی از میراگرهای بکار رفته مشاهده می گردد.



(ب)



(الف)

شکل الف-۳۵-الف) مرکز دولت Monterey County واقع در ایالات کالیفرنیا، (ب) میراگر اصطکاکی بکار رفته جهت مقاوم سازی



### ج) Seattle Patient Tower

این سازه ۱۴ طبقه که در سال ۱۹۷۰ ساخته شده، دارای سیستم باربر جانبی دیوار برشی می‌باشد. دو طبقه اول شامل پودیومی نسبتاً صلب است. دو طبقه بالای پودیوم دارای ستون‌هایی است که برای دیوار برشی طبقات بالا به عنوان تکیه‌گاه عمل می‌کند (شکل الف-۳۶). در نتیجه این دو طبقه همانند طبقه نرم عمل کرده و پس از بررسی برای سطح زلزله طراحی، آسیب پذیر ارزیابی گشتند. با توجه به طول زیاد بادبندها، از بادبندهای ضربدری کششی استفاده شد و در محل تقاطع بادبندها از میراگیرهای اصطکاکی استفاده گردید. مطابق با FEMA-356 تحت زلزله سطح طراحی، سطح عملکرد سازه به "استفاده بی وقفه" رسید و گریز در طبقات نرم به نصف تقلیل یافت. بدین منظور از ۲۴ میراگر اصطکاکی با ظرفیت ۸۹۰ کیلونیوتن استفاده شد.



(ب)

(الف)

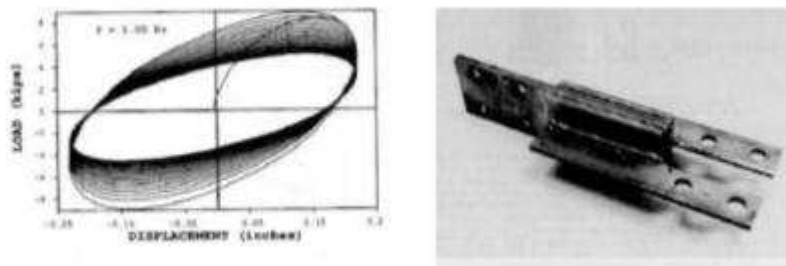
شکل الف-۳۶- (الف) Patient Tower، (ب) میراگر اصطکاکی بکار رفته جهت مقاوم سازی

### الف-۲-۲-۶ میراگر ویسکوالاستیک

مصالح ویسکوالاستیکی که به منظور جذب و اتلاف انرژی در سازه‌ها بکار می‌روند، معمولاً مواد شیشه‌ای یا پلیمری هستند که در برابر تغییر شکل از خود مقاومت نشان می‌دهند. این مقاومت یکی از مشخصه‌های ماده است و در واقع با بکارگیری این ماده در سازه، سختی سیستم سازه‌ای افزایش خواهد یافت. از طرف دیگر همزمان با اعمال تغییر شکل به این ماده، بر حسب دما و فرکانس بارگذاری، برخی از پیوندهای بین مولکولی شکسته شده و در این میان مقداری انرژی صرف شکسته شدن پیوندها می‌شود. در واقع میرایی این مواد به علت شکسته شدن پیوند بین مولکولی می‌باشد.



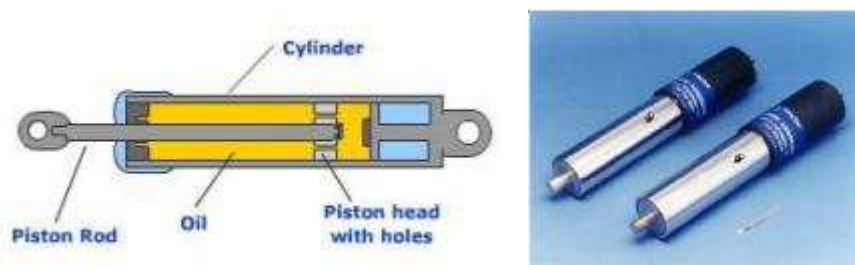
یک تیپ متداول میراگرهای ویسکوالاستیک (VE)، از لایه‌های ویسکوالاستیکی که توسط ورق‌های فلزی احاطه گردیده، تشکیل شده است (شکل الف-۳۷). در این حالت به هنگام ارتعاش ساختمان، بین بال‌های فلزی خارجی و ورقه مرکزی میراگر حرکت نسبی ایجاد می‌شود. این مکانیزم سبب تغییر شکل برشی و در نتیجه استهلاک انرژی خواهد شد.



شکل الف-۳۷- نمونه کاربردی میراگر ویسکوالاستیک و منحنی هیستریزیس آن

#### الف-۲-۲-۷ میراگر با سیال ویسکوز

میراگرهای با سیال ویسکوز (VF)، بیشتر در صنایع هوایی و نظامی کاربرد داشته‌اند. در سال‌های اخیر تلاش‌های زیادی برای توسعه کاربرد این نوع میراگر جهت مقاصد سازه‌ای انجام شده است. یک میراگر با سیال ویسکوز (VF) دارای یک پیستون درون محفظه میراگر بوده و با یک ترکیب ژل سیلیکون یا انواع مشابه روغن پر شده است. در اثر حرکت پیستون در این سیال ویسکوز، انرژی مکانیکی به گرما تبدیل شده و از این طریق سبب استهلاک انرژی می‌گردد. در شکل الف-۳۸ جزئیات یک میراگر با سیال ویسکوز نشان داده شده است.

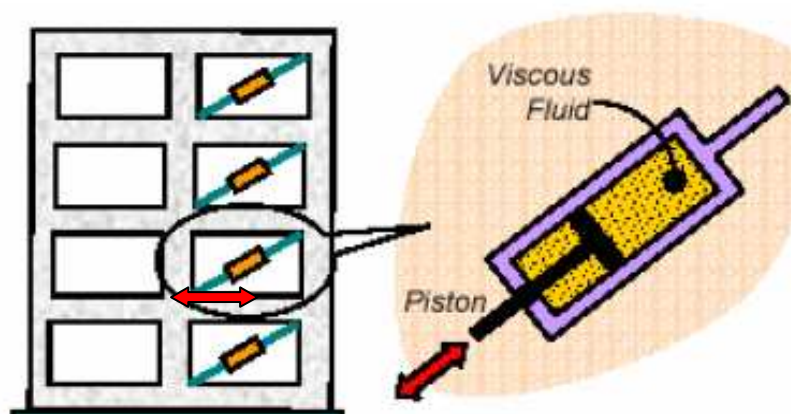


شکل الف-۳۸- جزئیات میراگر با سیال ویسکوز



سر این پیستون دارای تکنولوژی پیشرفته‌ای است که مانند ترموستات عمل نموده و از تغییرات دمای داخل پیستون جلوگیری می‌نماید، به نحوی که این میراگر در دمای  $40^{\circ}\text{C}$  الی  $70^{\circ}\text{C}$  درجه سانتیگراد عملکرد یکنواختی ارائه می‌کند.

بعلاوه انباره‌ای نیز در آن تعبیه شده تا از تغییرات حجم درون مخزن جلوگیری نماید. شکل الف-۳۹ نمونه‌ای از بکارگیری این میراگرها در سازه را نشان می‌دهد.



شکل الف-۳۹- جایگذاری میراگر با سیال ویسکوز در یک قاب سازه‌ای

#### الف-۲-۲-۸ انتقال انرژی به صورت هدفمند

انتقال انرژی به صورت هدفمند، یک دیدگاه منحصر بفرد در مسایل کنترل غیر فعال است. در این روش با اتصال یک قطعه به شدت غیر خطی به نام چاهک غیرخطی انرژی (NES)<sup>۱</sup>، که نحوه عملکرد آن کاملاً غیر فعال است، سعی می‌شود رفتار دینامیکی سیستم اولیه به شدت تغییر یابد. در صورت طراحی مناسب، این سیستم، انرژی ناشی از ارتعاشات اعمال شده خارجی (پهنای باند باریک) یا شوک (با پهنای باند وسیع) را به خود جذب نموده و در نهایت آنرا میرا می‌کند. از این سیستم می‌توان در کاهش پاسخ لرزه‌ای سازه‌ها، در جداسازی ارتعاش یا طراحی قابلیت اعتماد بهبود یافته (به عنوان مثال در خطوط انتقال نیرو) استفاده کرد.

<sup>1</sup> -Nonlinear Energy Sink





در انتقال انرژی به صورت هدفمند، انرژی از یک منبع (دهنده) به یک گیرنده به صورت یکطرفه و غیرقابل برگشت منتقل می‌شود. بارزترین نمونه این سیستم، عمل فتوستنز است. در تمامی پدیده‌های انتقال غیرخطی انرژی، به نحوی تشدید (رزونانس) غیرخطی بین دهنده و گیرنده رخ می‌دهد.

در اغلب اوقات، نحوه تبادل غیر فعال انرژی ارتعاشات غیر خطی به صورت اندرکنش غیرخطی بین مدهای مختلف سازه‌ای با فرکانس‌های نزدیک به هم یا دور از هم بیان می‌شود. چنین تبادل انرژی در سیستم‌های با دینامیک خطی امکان پذیر نیست، زیرا در این سیستم‌ها، مدها از هم مستقل بوده و تبادل انرژی به صورت غیر فعال بین آن‌ها نمی‌تواند رخ دهد. (البته در سیستم‌های با دینامیک خطی، در مدهای با فرکانس‌های نزدیک به هم، امکان وقوع پدیده ضربه<sup>۱</sup> و تبادل انرژی وجود دارد).

در ارتعاشات غیر خطی، اندرکنش غیرخطی انرژی بدلیل وقوع تشدید داخلی، حتی بین مدهای سازه‌ای با فرکانس‌های دور از هم نیز می‌تواند رخ دهد. در سیستم‌های غیر خطی همیلتونی معمولاً انتقال انرژی به صورت یکطرفه و برگشت ناپذیر در نظر گرفته نمی‌شود (به دلیل بقای حجم فاز و بر اساس قضیه بازگشت پوانکاره<sup>۲</sup>). علاوه بر این، در بعضی حالت‌های خاص، انتقال انرژی به صورت کامل و برگشت ناپذیر (هدفمند) بین نوسان گرهای غیرخطی به هم متصل صورت می‌گیرد. چنین انتقال انرژی غیر خطی روی مدارهای هتروکلینیک<sup>۳</sup> با جریان‌های دینامیک کند رخ داده و زمانیکه زمان به سمت بینهایت میل می‌کند، به صورت مجانبی رخ می‌دهند و فقط در سطوح مشخصی از انرژی متمرکز نیستند. (در واقع، ایجاد اغتشاش<sup>۴</sup> این مدارها، برگشت ناپذیری انتقال انرژی را از بین برده و منجر به تحریک مدارهای شبه پریودیک در جریان‌های کند می‌شود. به طور کلی، انتقال انرژی غیر خطی به دلیل برهم زدن تقارن در قالب دو شاخه‌ای شدن مد غیر خطی<sup>۵</sup> یا توسط پدیده متمرکز شدن انرژی فضایی ناشی از مدهای متعامد غیرخطی موضعی<sup>۶</sup> می‌تواند رخ دهد.

<sup>۱</sup> -Beat Phenomenon

<sup>۲</sup> -Poincaré recurrence theorem

<sup>۳</sup> -heteroclinic orbit

<sup>۴</sup> -perturbation

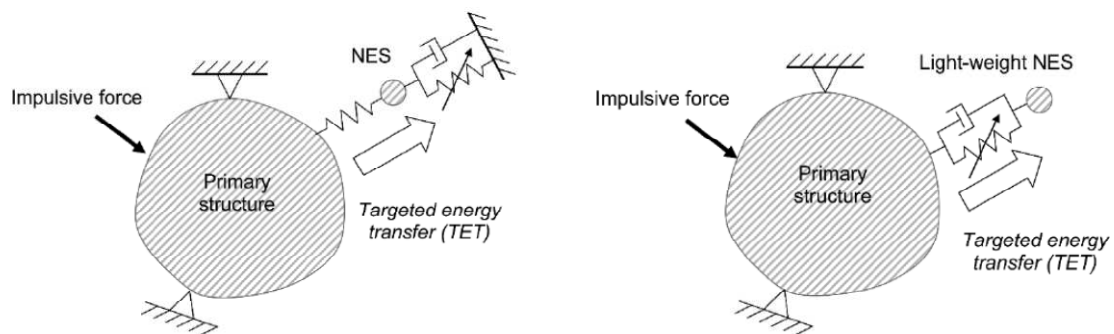
<sup>۵</sup> -nonlinear mode bifurcation

<sup>۶</sup> -nonlinear normal modes



اخیراً فرم جدیدی از انتقال انرژی غیرخطی بین مودهای با فاصله زیاد (با فرکانس های دور از هم) در سازه هایی که تحت تحریک هارمونیک قرار می گیرند، تحلیل شده است. در این مکانیزم، انتقال انرژی به صورت غیر فعال، بدلیل اندرکنش تشدید مود بالاتر با مود پایین تر، رخ می دهد. این نوع انتقال انرژی از آن جهت که مدهای اندرکنشی شرایط تشدید داخلی را ارضا نمی کنند، غیرمعمول است.

می توان نشان داد که با اضافه نمودن یک قطعه با سختی غیر خطی، می توان به طور قابل ملاحظه ای دینامیک کلی سیستم حاصله را تغییر داد. دلیل این امر نیز عدم وجود فرکانس تشدید ترجیحی قطعه متصل شده است که در اصل باعث می شود تشدید غیر خطی با هر مود سیستم خطی، در محدوده دلخواه فرکانسی امکان پذیر گردد. می توان نشان داد که تحت شرایطی، انتقال انرژی به صورت یکطرفه و برگشت ناپذیر از سیستم خطی اولیه به قطعه متصل شده رخ خواهد داد و در واقع مانند یک چاهک انرژی غیر خطی عمل خواهد نمود. این عمل هم در محدوده فرکانسی با پهنای باند کم و هم پهنای باند وسیع می تواند رخ دهد. بنابراین NES را می توان توسعه و تعمیم TMD در ارتعاشات خطی کلاسیک در نظر گرفت. هر چند با اضافه نمودن NES ذاتاً غیر خطی، ارتعاشات آزاد و اجباری آن دچار چند حالتی شده و می تواند منجر به دو شاخه ای شدن های ابعاد بالاتر و پدیده های دینامیکی مختلط شود. شکل الف-۴۰ نحوه انتقال انرژی به صورت هدفمند را به صورت شماتیک نمایش می دهد.

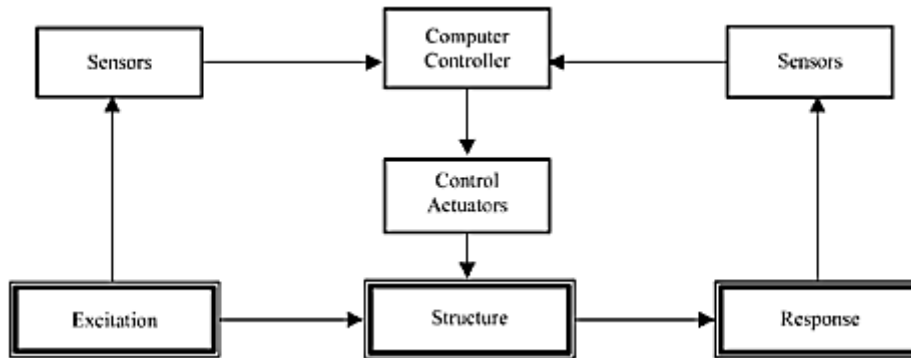


شکل الف-۴۰- نحوه انتقال انرژی به صورت هدفمند



### الف-۲-۳ کنترل فعال سازه‌ها

شماتیک عملکرد سیستم‌های کنترل فعال در شکل الف-۴۱ نشان داده شده است.



شکل الف-۴۱- نحوه عملکرد سیستم کنترل فعال

همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود این سیستم‌ها تشکیل شده‌اند از:

سنسورها<sup>۱</sup> که جهت اندازه‌گیری تحریک‌های خارجی، پاسخ‌های سازه و یا هر دو در سازه قرار داده می‌شوند. ابزارهایی جهت پردازش اطلاعات اندازه‌گیری شده و محاسبه نیروهای کنترل لازم براساس الگوریتم کنترل مقتضی.

عملگرها<sup>۲</sup> که معمولاً جهت تولید نیروهای کنترل مورد نیاز از منابع خارجی، انرژی دریافت می‌کنند.

سیستم کنترل پس‌خور<sup>۳</sup> به سیستمی گفته می‌شود که تنها از پاسخ‌های سازه‌ای اندازه‌گیری شده در هر لحظه، جهت تعیین نیروی کنترل اعمالی استفاده نماید. در مقابل، اگر نیروهای کنترل فقط توسط تحریک اندازه‌گیری شده تنظیم شوند، سیستم کنترل، پیش‌خور<sup>۴</sup> نامیده می‌شود.

در حالتی که اندازه‌گیری‌های مربوط به پاسخ سازه و تحریک وارد بر آن، هر دو، جهت تعیین نیروی کنترل بکار رود، سیستم کنترل را پس‌خور-پیش‌خور<sup>۵</sup> می‌نامند.

<sup>۱</sup>-Sensors

<sup>۲</sup>-Actuators

<sup>۳</sup>-Feed Back Control Systems

<sup>۴</sup>-Feed Forward Control Systems

<sup>۵</sup>-Feed Back – Feed Forward Control Systems



این گونه سیستم‌ها با اعمال نیروی خارجی در خلاف جهت نیروی لرزه‌ای وارد بر ساختمان، سعی بر کنترل رفتار آن در هنگام بروز زلزله را دارند. همچنین سیستم‌های مذکور قابلیت این را دارند که خود را با شرایط بارگذاری مختلف تطبیق دهند. بدین منظور از پاسخ‌های سازه‌ای اندازه‌گیری شده، جهت تعیین نیروی کنترل اعمالی به سازه استفاده می‌کنند. به همین دلیل نیاز به استفاده از سیستم‌های پیچیده و کنترل هوشمند برای اعمال نیروهای مورد نیاز و نیز الگوریتم‌های مناسب تعیین بهینه این نیروها می‌باشد. از مشکلات عمده سیستم‌های کنترل فعال این است که جهت عملکرد مناسب به میزان انرژی خارجی زیادی نیاز دارند و از آنجا که این سیستم‌ها انرژی خارجی قابل توجهی جهت کنترل سازه به آن وارد می‌کنند، امکان ناپایدار شدن سازه بر اثر سیستم‌های مذکور وجود دارد.

انواع سیستم‌های میراگر فعال عبارتند از:

۱- سیستم میراگر با جرم فعال

۲- سیستم تاندون فعال

۳- سیستم مهاربند فعال

۴- سیستم مولد پالس

۵- سیستم میراگر فعال با سختی متغیر

الف-۲-۳-۱ سیستم میراگر با جرم فعال<sup>۱</sup>

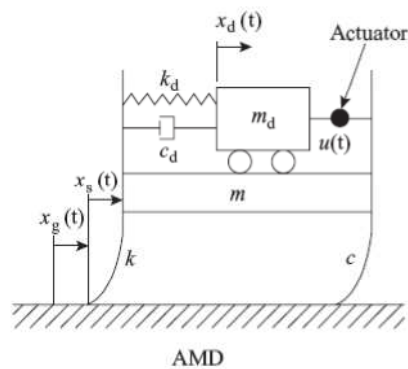
سیستم میراگر با جرم فعال (AMD)، شکل اصلاح شده‌ای از TMD است که در آن یک جرم اضافی به همراه یک عملگر به سیستم اولیه متصل شده که می‌تواند میزان میرایی و محدوده‌های فرکانس قابل استفاده دستگاه را افزایش دهد.

---

<sup>۱</sup>-Active Mass Damper(AMD)



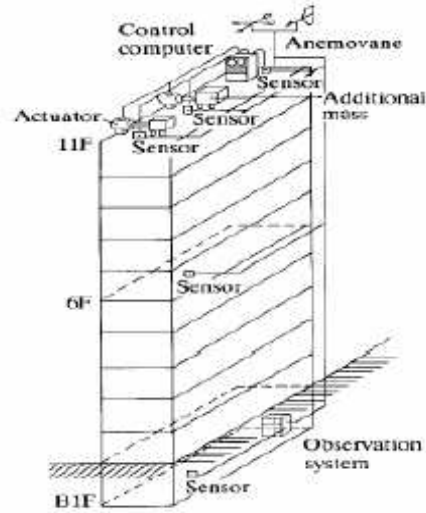
با تحریک جرم اضافی توسط عملگر، یک نیروی مضاعف در سیستم بوجود می‌آید که مکمل نیروی تولید شده توسط جرم هماهنگ شده بوده و در نتیجه، سبب افزایش میرایی معادل TMD می‌شود. از آنجائیکه برای تحریک جرم اضافی، نیاز به نیروی خارجی می‌باشد، این سیستم در رده سیستم‌های کنترل فعال قرار می‌گیرد. شماتیک این سیستم در شکل الف-۴۲ ارائه شده است.



شکل الف-۴۲- شماتیک سیستم AMD

با توجه به شکل، یک عملگر (فعال کننده) در میان سازه و سیستم کمکی نصب شده است. حرکت سیستم کمکی توسط عملگر کنترل می‌شود تا اثر بخشی سیستم کمکی بهبود یابد. سیستم AMD از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه است زیرا با توجه به سیستم‌های فعال دیگر، به یک عملگر کوچک و نیروی کنترلی کم نیاز دارد.

اولین نمونه‌های این دستگاه در ژاپن اجرا شد که در شکل الف-۴۳ مشاهده می‌شود. در شکل‌های الف-۴۴ و الف-۴۵ نمونه‌هایی از این دستگاه ارائه شده که در محل فرود هلی‌کوپتر برج تحسین ژاپن نصب شده است.



شکل الف-۴۳- اولین نمونه دستکاه AMD در ژاپن



شکل الف-۴۴- جرم میراگر فعال (AMD) نصب شده بر روی محل فرود هلی کوپتر در یکی از ساختمان های ژاپن



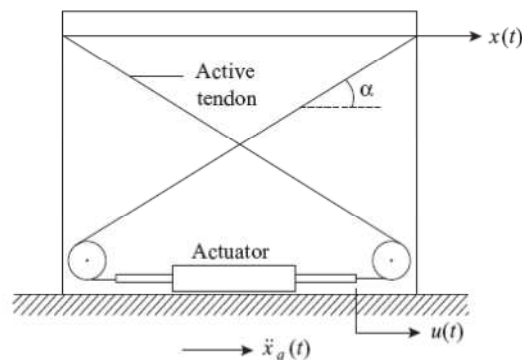
(ب)

(الف)

شکل الف-۴۵- جرم میراگر فعال: الف) جک‌های جرم میراگر فعال نصب شده در زیر محل فرود هلی کوپتر، (ب) لایه‌های تکیه گاهی

### الف-۲-۳-۲ سیستم تاندون فعال

سیستم تاندون فعال شامل تاندون‌های پیش تنیده می‌باشد که کشش آنها توسط سیستم مکانیزم فرمان بر برق کنترل می‌شود. شماتیک این سیستم در شکل الف-۴۶ ارائه شده است.



شکل الف-۴۶- شماتیک سیستم تاندون فعال

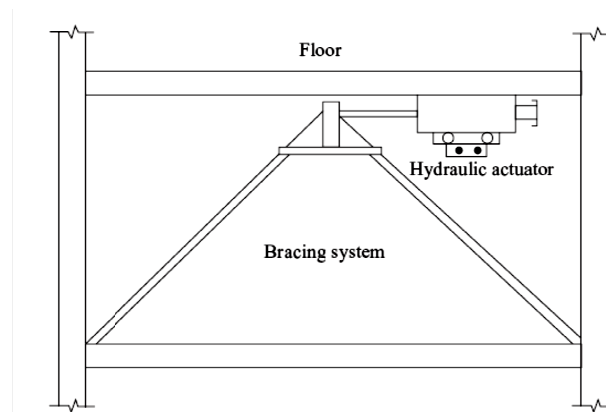
تاندون‌های فشاری در میان دو طبقه سازه و عملگر در کف نصب می‌شود. یک سر تاندون به طبقه بالا و سر دیگر آن به عملگر وصل می‌شود. دریافت ایجاد شده در اثر ارتعاش سازه در طول زلزله، باعث حرکت پیستون عملگر می‌شود. این حرکت نسبی باعث تغییر میزان کشش تاندون پیش‌تنیده شده و نیروی کنترلی  $u$  باعث کاهش پاسخ لرزه‌ای می‌شود. این سیستم میرایی در هر دو صورت آزمایشگاهی و تحلیلی مطالعه شده است. نمونه اجرایی این سیستم میرایی در یک ساختمان ۶ طبقه بتنی در شهر توکیو ژاپن به وزن ۶۰۰ تن به کار رفته است. هر دو نتایج آزمایشگاهی و تحلیلی، حاکی از کاهش موثر پاسخ لرزه‌ای در این سیستم می‌باشد.



مزایای این سیستم این است که اولاً این سیستم قابلیت استفاده در سازه‌های موجود را داشته و سازه جهت مقاوم سازی نیاز به اصلاح زیادی ندارد و ثانیاً در هر دو حالت مدهای پالسی و مداوم قابلیت کارکرد دارد.

#### الف-۲-۳-۳ سیستم مهاربند فعال

در سیستم مهاربند فعال جهت نصب وسیله عملگر بر روی سازه از مهاربند موجود سازه استفاده می‌شود. این سیستم در سه نوع مهاربند قطری، X و K قابلیت نصب دارد. شماتیک این سیستم بر روی مهاربند K در شکل الف-۴۷ ارائه شده است. عملگر در کف سازه پیچ شده و سیلندر عملگر به مهاربند وصل می‌شود. این سیستم شامل یک servo-valve، کنترل کننده servo-valve، فعال کننده هیدرولیکی، منبع تغذیه هیدرولیک، سنسور و یک کامپیوتر کنترل کننده است. سنسورها حرکات سازه ناشی از تحریکات لرزه‌ای را ثبت می‌کنند. کامپیوتر هماهنگ کننده، این اطلاعات را دریافت کرده و سیگنال کنترلی را تولید می‌کند. Servo-valve با استفاده از این سیگنال، اختلاف فشار در دو محفظه عملگر ایجاد کرده و نیروی کنترلی بوجود آمده از این اختلاف فشار، برای مقابله با نیروی‌های لرزه‌ای سازه استفاده می‌شود.



شکل الف-۴۷- شماتیک سیستم مهاربند فعال

مزایای این سیستم در ادامه آمده است.

مزایای این سیستم همانند سیستم تاندون فعال این است که اولاً این سیستم قابلیت استفاده در سازه‌های موجود را داشته و سازه جهت مقاوم سازی نیاز به اصلاح زیادی ندارد و ثانیاً در هر دو حالت مدهای پالسی و مداوم قابلیت کارکرد دارد.





### الف-۲-۳-۴ سیستم تولید پالس

این سیستم به جای استفاده از عملگر هیدرولیکی از یک منبع تولید پالس استفاده می‌کند. مولد پالس از مکانیزم باد برای تولید نیروی کنترلی استفاده می‌کند. در این مکانیزم از هوای فشرده برای تولید نیروی کنترلی به شکل پالس استفاده می‌شود. یک سیستم سازه‌ای هوشمند نیاز به چندین مولد پالس در مکان‌های مختلف دارد. هنگامیکه سرعت نسبی بالایی در هر یک از این نواحی بدست آید، محرک نئوماتیک تحت تاثیر قرار گرفته و نیرویی کنترلی در خلاف جهت سرعت به سازه اعمال می‌کند. مولد پالس از گاز فشرده استفاده می‌کند که ارزان قیمت است اما نیروی گاز دارای نیروی کافی برای سازه با ابعاد واقعی نیست. به علاوه سیستم مولد پالس می‌تواند بسیار غیر خطی باشد و ممکن است از شکل ایده‌آل مربعی پالس خارج شود.

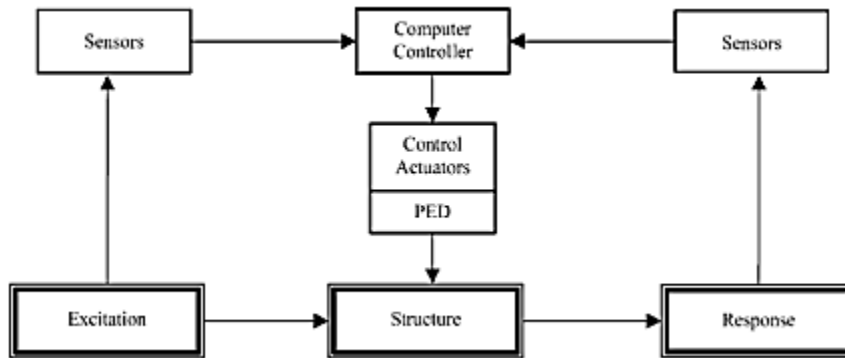
### الف-۲-۳-۵ میراگر فعال با سختی متغیر<sup>۱</sup>

میراگر فعال با سختی متغیر در واقع یک سیستم کنترل برای جلوگیری از پدیده تشدید سازه است که به منظور کاهش انرژی ورودی به ساختمان (ناشی از تحریک خارجی)، با استفاده از اصلاح مداوم سختی ساختمان و بر اساس ماهیت تحریک، طراحی می‌شود. مزیت قابل توجه این نوع میراگر این است که جهت فعال شدن نیاز به اعمال نیروی خارجی بزرگی ندارد.

### الف-۲-۴ کنترل نیمه فعال سازه‌ها

عملکرد سیستم‌های کنترل نیمه فعال به صورت شماتیک در شکل الف-۴۸ نشان داده شده است. این سیستم‌ها مشابه سیستم‌های کنترل فعال عمل می‌کنند، با این تفاوت که در آنها عملگر، مستقیماً جهت اعمال انرژی مکانیکی به سازه بکار نمی‌رود.

<sup>۱</sup> - Active Variable Stiffness Damper



شکل الف-۴۸- نحوه عملکرد سیستم کنترل نیمه فعال

سیستم های کنترل نیمه فعال که می توان آن ها را سیستم های کنترل غیرفعال قابل تنظیم نیز نامید، مجهز به میراگرهایی هستند که در هر لحظه قابل کنترل بوده ولی قادر به اعمال انرژی به سازه نمی باشند. میزان تغییر در خصوصیات مکانیکی سیستم، براساس بازخورد<sup>۱</sup> پاسخ های اندازه گیری شده سازه در یک لحظه قبل از تحریک زمین، تعیین می شود. در این سیستم ها از انرژی خارجی جهت تغییر خصوصیات دستگاه، مانند میرایی یا سختی استفاده می شود، لذا نیاز این سیستم ها به انرژی بسیار ناچیز است. در حالی که در سیستم های فعال به علت اینکه از انرژی خارجی جهت تولید نیروی کنترل استفاده می شود، نیاز به انرژی بسیار بزرگی است.

مزایای این نوع سیستم های کنترل عبارتند از:

- ۱- عملکرد آن ها از سیستم های کنترل غیرفعال بهتر است.
- ۲- دارای خاصیت سازگاری لحظه به لحظه سیستم های کنترل فعال هستند، بدون آنکه به انرژی زیادی نیاز داشته باشند.
- ۳- چون انرژی خارجی به سیستم وارد نمی کنند، باعث ناپایداری سازه کنترل شده نمی شوند.
- ۴- مانند ابزارهای کنترل غیرفعال قابل اعتماد هستند.

<sup>۱</sup>-Feedback



۵- اگر منبع انرژی خارجی در طول زلزله آسیب ببیند، همانند یک سیستم غیرفعال به فعالیت خود ادامه می دهند.

انواع مختلف سیستم‌های کنترل نیمه فعال عبارتند از:

۱- میراگر با دریچه متغیر<sup>۱</sup>

۲- میراگر با سختی متغیر<sup>۲</sup>

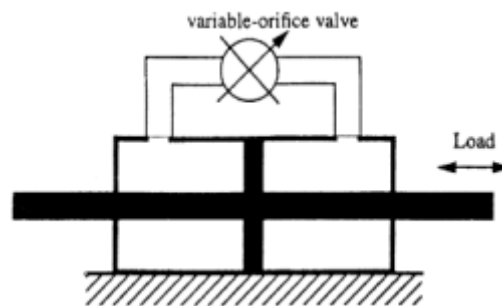
۳- میراگر با جرم متوازن نیمه فعال<sup>۳</sup>

۴- میراگر با ستون مایع کنترل شونده<sup>۴</sup>

۵- میراگر با سیال کنترل شونده<sup>۵</sup>

الف-۲-۴-۱ میراگر با دریچه متغیر

این نمونه از سیستم‌های کنترل نیمه فعال، قدیمی ترین نوع از انواع این سیستم‌ها می باشد اما هنوز مورد استفاده قرار می گیرد. شماتیک این سیستم در شکل الف-۴۹ ارائه شده است.



شکل الف-۴۹- میراگر با دریچه متغیر

- 
- <sup>1</sup>-Variable Orifice Damper
  - <sup>2</sup>-Variable Stiffness Damper
  - <sup>3</sup>-Semi – Active Tuned Mass Damper
  - <sup>4</sup>-Adjustable Tuned Liquid Column Damper
  - <sup>5</sup>- Controllable Fluid Damper



این دستگاه شامل یک پیستون هیدرولیکی بوده و سیال در آن می‌تواند از یک محفظه به محفظه دیگر عبور کند. بین دو محفظه روزنه‌ای وجود دارد. اگر مقطع این روزنه همواره ثابت باشد، این دستگاه یک میراگر و سیکوز غیر فعال است اما اگر دستگاه به نحوی باشد که بتوان شدت سیال عبوری از روزنه را توسط یک شیر سرویس (Servo-Valve) به صورت لحظه‌ای کنترل نمود، این دستگاه در واقع طبیعت نیمه فعال پیدا می‌کند. اولین نمونه تکمیل یافته این دستگاه کنترل سازه‌ای، در ایالات متحده استفاده شد که شامل تعدادی از این دستگاه است که روی پل بین ایالتی ۳۵، در نزدیکی اُکلاهاما<sup>۱</sup> نصب شده‌اند (شکل الف-۵۰). این پل در سال ۱۹۷۲ بهره برداری شد اما پس از مدتی مشخص شد که به دلیل رفت و آمد زیاد و عبور کامیون‌های سنگین از روی آن، تغییر شکل‌ها و شکست‌هایی در آن رخ داده است. اما پس از نصب این دستگاه کنترل روی آن، سازه‌ی این پل دوباره قابل بهره‌برداری شد و تنش‌های ماکزیمم در حین عبور کامیون‌ها در این پل به میزان قابل توجهی کاهش پیدا کرد. از این نوع میراگر در ساختمان‌ها هم استفاده شده است. به عنوان مثال در ساختمان پنج طبقه شیزوکا سیتی<sup>۲</sup> ژاپن، هشت میراگر با دریچه متغیر نصب شده است.



شکل الف-۵۰- میراگر روزنه متغیر نصب شده بر روی پل ایتر استیت در اکلاهاما

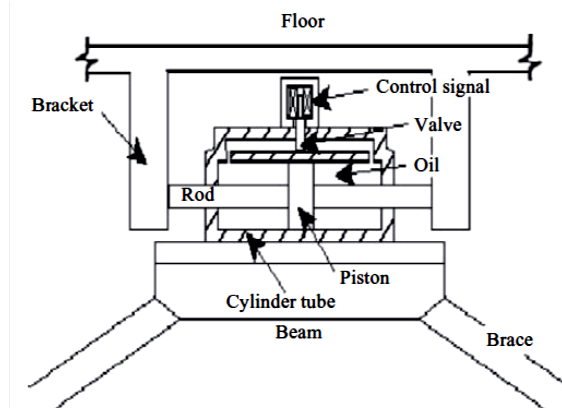
<sup>۱</sup>-Purcell, Oklahoma

<sup>۲</sup>-Shizuka City



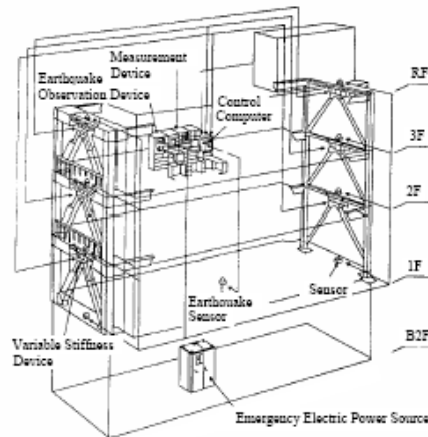
### الف-۲-۴-۲ میراگر با سختی متغیر

این سیستم نیمه فعال قابلیت آن را دارد که سختی سازه و در نتیجه فرکانس طبیعی آن را اصلاح کند و بدین ترتیب از بروز شرایط رزونانس جلوگیری کند. این سیستم شامل سیلندر هیدرولیکی تعادل، دو میله پیستون، شیر کنترل و یک لوله که دو محفظه سیلندر را به هم وصل می کند است. شیر می تواند باز یا بسته باشد. هنگامیکه شیر باز است، مایع آزادانه جریان می یابد و اتصال تیر به مهاربند را برقرار می سازد. هنگامیکه شیر بسته است، مایع جریان نداشته و مهاربند را به تیر وصل می کند و سختی سازه را افزایش می دهد. این ابزارها در سیستم مهاربندی سازه نصب شده و در هنگام لزوم درگیر و یا آزاد می شوند تا بدین صورت سختی سازه را تغییر دهند. شماتیک این سیستم در شکل الف-۵۱ ارائه شده است.



شکل الف-۵۱- شماتیک وسیله سختی متغیر نیمه فعال

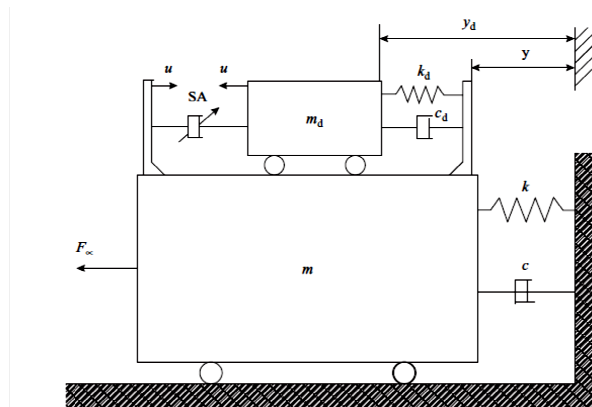
همانطور که از ابزارهای کنترل نیمه فعال انتظار می رود، مصرف انرژی آنها بسیار پایین است (حدود ۲۰ وات) و خرابی آنها در هنگام زلزله، به ندرت رخ می دهد. شکل الف-۵۲ نمونه ای از بکارگیری این دستگاهها را بر روی مرکز تحقیقات Kobori نشان می دهد.



شکل الف-۵۲- بکارگیری میراگرهای با سختی متغیر در ساختمان مرکز تحقیقات Kobori

#### الف-۲-۴-۳- میراگر با جرم متوازن نیمه فعال

از این سیستم نیمه فعال جهت کاهش ارتعاشات ناشی از باد استفاده می شود. این دستگاه شبیه به سیستم های TMD است اما قابلیت تغییر در سطح میرایی را دارد. شبیه سازی های انجام شده نشان داده اند که عملکرد این دستگاه های نیمه فعال فراتر از سیستم های TMD بوده و قابل مقایسه با سیستم های AMD که از نوع فعال هستند، می باشد. نمونه دیگری از این دستگاه ها، جرم میراگر تنظیم شده ی نیمه فعال سختی متغیر است که عملکرد آن خیلی شبیه به دستگاه های AMD است اما مصرف انرژی در آن ها کمتر است. شماتیک این سیستم در شکل الف-۵۳ ارائه شده است. این سیستم دارای یک TMD و یک فعال کننده در سقف می باشد.  $m_d$  وزن TMD، SA فعال کننده،  $C_d$  میرایی،  $K_d$  سختی بوده و وزن سازه برابر  $m$ ، سختی آن  $K$  و میرایی آن  $C$  می باشد. فعال کننده، نیروی کنترلی  $u$  را تولید می کند، به گونه ای که سیستم همواره در حالت بهینه برای هر تغییر تحریکی می باشد. از آنجائیکه وزن TMD بسیار کمتر از وزن سازه است و نیروی فعال کنترلی مورد استفاده برای تغییر نیروی میرایی TMD بسیار کمتر از نیروی اینرسی TMD است، انرژی بسیار کمی برای این تنظیم مورد نیاز است.



شکل الف-۵۳- میراگر با جرم متوازن نیمه فعال

#### الف-۲-۴-۴ میراگر با ستون مایع کنترل شونده (Semi active TLCD)

اگر در سیستم TLD شرایطی فراهم شود که میرایی سیستم به صورت لحظه‌ای تغییر کند، در این صورت سیستم طبیعت نیمه فعال پیدا خواهد کرد. در این سیستم با توجه به شرایط باگذاری مختلف و با استفاده از یک برنامه کنترل و اطلاعات لحظه قبل، سازه کنترل می‌شود و تغییر لحظه‌ای روزنه منجر به تغییر در ضریب افت ارتفاع و به تبع آن میرایی سیستم می‌شود. نمونه دیگر TLCD نیمه فعال سیستم MR- TLCD است که در آن لوله U شکل از مایع MR پر شده و با اعمال میدان مغناطیسی لزجت مایع تغییر کرده و در نتیجه می‌توان میرایی سیستم را تنظیم نمود.

#### الف-۲-۴-۵ میراگر با سیال کنترل شونده

یکی از انواع دستگاه‌های کنترل نیمه فعال، سیستم‌های میراگر با سیال قابل کنترل است. این دسته از دستگاه‌ها، شامل میراگرهایی می‌باشند که ویسکوزیته سیال درون آن‌ها قابل تغییر است. این تغییر در ویسکوزیته باعث تغییر سختی و تنش تسلیم این میراگرها شده و میزان جذب انرژی آن‌ها را در هر لحظه کم یا زیاد می‌کند. دو نوع عمده میراگرهای دارای سیال قابل کنترل عبارتند از:



### ۱- میراگرهای ER<sup>۱</sup>

### ۲- میراگرهای MR<sup>۲</sup>

این میراگرها شامل ذرات پلاریزه شده مغناطیسی یا الکتریکی معلق در روغن هستند که قابل تغییر از حالت سیال ویسکوز روان به ماده نیمه جامد با مقاومت تسلیم قابل کنترل در چند میلی ثانیه یا برعکس می باشند. این تغییر که با افزایش یا کاهش در شدت میدان مغناطیسی یا الکتریکی صورت می گیرد، آن ها را تبدیل به میراگرهای قابل کنترل کرده است.

مزیت دیگر این میراگرها علاوه بر نیاز به انرژی کم، سادگی آنها به لحاظ مکانیکی است. از آنجا که تنها جزء حرکت کننده آنها پیستون است، دستگاه های مطمئنی بوده و نگهداریشان ساده می باشد. برای کنترل سازه ها، نخست میراگرهای ER مورد تحقیق و بررسی قرار گرفتند. با این وجود استفاده تجاری و اقتصادی آنها به چند دلیل زیر محدود می باشد:

۱- میراگرهای ER نمی توانند به تنش های تسلیم بالا دست یابند.

۲- ظرفیت و توانایی سیال ER با ورود ناخالصی هایی مانند رطوبت در طول ساخت یا نگهداری کاهش می یابد.

۳- ولتاژی که هنگام عملکرد نیاز دارند، نسبتاً بالا می باشد (تقریباً ۴۰۰۰ ولت)، بنابراین همواره در دسترس نبوده و پرهزینه اند.

در مقابل، میراگرهای MR فاقد این مشکلات هستند. میراگر MR از یک مایع هوشمند استفاده می کند که یک آنالوگ مغناطیسی مایع ER است. این میراگر معمولاً شامل ذرات پلاریزه شده مغناطیسی است که در یک مایع ویسکوز همچون روغن سیلیسکون پراکنده شده است. هنگامیکه مایع MR در جریان مایع مغناطیسی قرار می گیرد، ذرات درون مایع پلاریزه شده و مایع رفتار ویسکوپلاستیک نشان می دهد و در نتیجه در مقابل جریان مایع مقاومت می کنند.

<sup>۱</sup>-Electro-Rheological Damper

<sup>۲</sup>-Magneto-Rheological Damper





ماکزیمم تنش تسلیم میراگر MR بالا است (در حدود ۱۰۰-۵۰ کیلوپاسکال)، ناخالصی‌ها روی عملکرد سیال آن‌ها تأثیر نمی‌گذارد و به ولتاژ بسیار کمتری (حدود ۱۲-۲۴ ولت و توان کمتر از ۵۰ وات) نیاز دارند. در شکل الف-۵۴ نمونه‌ای از میراگرهای MR ساخته شده در مقیاس کوچک نشان داده شده است. همچنین اشکال الف-۵۵ و الف-۵۶ نمونه‌ای از پل‌های تقویت شده توسط میراگرهای MR ارائه شده است. همچنین کاربرد عملی میراگرهای MR بر روی سازه، اولین بار در سال ۲۰۰۱، با نصب دو میراگر MR ۳۰ تنی در طبقات سوم و پنجم موزه ملی توکیو (Nihon - Kagaku - Miraikan)، صورت گرفته است (شکل الف-۵۷).



شکل الف-۵۴- نمونه‌ای از میراگرهای MR با مقیاس کوچک



شکل الف-۵۵- پل کابلی Eiland، واقع در هلند، تقویت شده با میراگر MR در سال ۲۰۰۴ میلادی



شکل الف-۵۶- پل کابلی Dubrovnik، تقویت شده با میراگر MR در سال ۲۰۰۶ میلادی



شکل الف-۵۷- نخستین کاربرد سیستمهای نیمه فعال در ساختمان Nihon - Kagaku - Miraikan (موزه ملی توکیو)

### الف-۳ مقایسه سیستمهای کنترلی

سیستمهای لرزه‌ای ویژه، مانند سیستم های جداگر لرزه‌ای و استهلاک انرژی باید در مراحل اولیه طراحی مدنظر قرار گیرند و بر اساس هدف بهسازی ساختمان انتخاب شوند. انتخاب سیستم لرزه‌ای ویژه "مناسب" برای بهسازی ساختمان اساساً وابسته به عملکرد مورد انتظار در برابر زلزله مورد نظر است. به طور کلی استفاده از سیستمهای لرزه‌ای ویژه برای سازه‌هایی که اهداف بهسازی سخت گیرانه‌تر (سطح عملکرد بالاتر و تقاضای لرزه‌ای سطح شدیدتر) را دارند، عملی تر به نظر می‌رسد. جدول الف-۳ به طور خلاصه راهنمای ساده‌ای برای انتخاب هر یک از سیستمهای جداگر لرزه‌ای یا استهلاک انرژی به عنوان گزینه بهسازی لرزه‌ای سازه را ارائه می‌دهد.



جدول الف-۳- کاربرد سیستم های جداگر لرزه‌ای و استهلاک انرژی

سیستم استهلاک انرژی	جداگر لرزه‌ای	سطح عملکرد مورد انتظار
مناسب	بسیار مناسب	خدمت رسانی بی‌وقفه
مناسب	محدود	ایمنی جانی
محدود	غیر عملی	آستانه فروریزش

جدول فوق نشان می‌دهد که سیستم جداگر لرزه‌ای برای دستیابی به سطح عملکرد سازه‌ای خدمت رسانی بی‌وقفه باید مورد توجه قرار گیرد. متقابلاً این روش برای سطح عملکرد سازه‌ای ایمنی جانی یا آستانه فروریزش مناسب نیست. به طور کلی سیستم‌های جداگر لرزه‌ای به طور قابل ملاحظه‌ای آسیب وارده به سازه ساختمان، اجزای غیر سازه‌ای و ملحقات را کاهش می‌دهند، اما هزینه اجرای آن باعث می‌شود تا در مواردی که بودجه و هدف بهسازی چندان بالا نیست، این روش عملی نباشد.

همچنین با توجه به پرهزینه بودن (هزینه اولیه، نگهداری، تعمیرات، ...) سیستم‌های کنترل فعال و نیمه فعال و همچنین پیچیدگی‌های خاص این سیستم‌های کنترلی (نصب، نگهداری، ...)، استفاده از این سیستم‌ها در کشور توصیه نمی‌شود.

در ادامه‌ی این فصل، مقایسه بین سیستم‌های کنترل غیر فعال از نظر مشخصات، پاسخ و دسترسی به آن‌ها در کشور انجام می‌شود.

### الف-۳-۱ مقایسه سیستم‌های کنترل غیر فعال

سیستم‌های کنترل غیر فعال شامل سیستم‌های جداگر لرزه‌ای و استهلاک انرژی، گزینه‌های مناسبی برای مقاوم سازی سازه‌هایی که اهداف بهسازی محدودی را دنبال می‌کنند، نمی‌باشند. در حالت کلی، از این سیستم‌ها بیشتر در سازه‌هایی که نیازمند عملکرد لرزه‌ای بالایی بوده و امکان پرداخت هزینه‌های ویژه طراحی، نصب و اجرای سیستم‌های جداگر لرزه‌ای و یا استهلاک انرژی وجود دارد، استفاده می‌شود. این



هزینه‌ها اغلب با کاهش نیاز به سختی و مقاومت مورد نیاز که برای اهداف بهسازی مورد نیاز است، تعدیل می‌شوند. این مسئله در سیستم‌های جداگر لرزه‌ای به علت هزینه‌های بسیار بالای آن مشهودتر است.

### الف-۳-۱-۱ جداگر لرزه‌ای

همانطور که پیشتر اشاره شد، در اثر بکارگیری جداساز لرزه‌ای، پیوند طبیعی سازه افزایش می‌یابد (همراه با اندکی افزایش در میرایی) و در نتیجه هنگام وقوع زلزله در محل جداسازی شده، شاهد افزایش جابجایی و در روسازه شاهد کاهش جابجایی نسبی در طبقات و شتاب خواهیم بود. هر چند مقدار کاهش شتاب به مشخصات نیرو-تغییر شکل جداگر وابسته بوده و به اندازه کاهش در جابجایی نسبی در طبقات سازه قابل توجه نیست.

کاهش جابجایی نسبی در سازه فوقانی باعث محافظت از اجزا و عناصر سازه‌ای در کنار اجزای غیرسازه‌ای حساس به جابجایی نسبی می‌شود. کاهش شتاب باعث محافظت از اجزای غیرسازه‌ای حساس به شتاب می‌شود. متعاقباً این امر نه تنها باعث افزایش ایمنی در مقابل فروریزش شده بلکه به شدت آسیب‌های وارده به سازه را کاهش می‌دهد و این در اماکنی مانند مراکز پاسخ‌گویی در مواقع اضطراری، بیمارستان‌ها و مراکز آتش‌نشانی که باید پس از زلزله، عملیاتی باقی بمانند بسیار حیاتی است. همچنین از جداسازهای لرزه‌ای می‌توان در مقاوم سازی سازه‌های تاریخی بدون آسیب وارد کردن به خصوصیات معماری استفاده نمود. در شرایط مطلوب، سیستم جداساز باعث کاهش جابجایی نسبی سازه فوقانی به یک دوم تا حتی در بعضی مواقع یک پنجم در مقایسه با سازه‌ای که جداسازی نگشته است، می‌شود.

با توجه به تحقیقات انجام شده، استفاده از جداگرهای لرزه‌ای در ساختمان‌های کوتاه و میان مرتبه (تا ۱۰ الی ۱۲ طبقه) مناسب است. زیرا فرکانس اصلی آن‌ها در محدوده فرکانس‌های غالب مورد انتظار زلزله‌ها قرار می‌گیرد. خصوصیات روسازه مانند ارتفاع، عرض، نسبت طول به عرض و سختی از جمله پارامترهای مهم در تعیین کاربردی بودن و درجه تأثیر جداسازی لرزه‌ای در مقاوم سازی سازه می‌باشد.

همچنین در مطالعات امکان سنجی و روند طراحی باید لرزه‌خیزی منطقه و شرایط خاک زیر سازه در نظر گرفته شود. در مناطقی که فرکانس‌های اصلی مورد انتظار زلزله در محدوده فرکانسی پایین قرار دارد یا در



مناطقى که در اثر وجود خاک نرم امکان تشدید فرکانس‌های پایین زلزله وجود داشته باشد، باید از سیستم جداسازی لرزه‌ای امتناع نمود.

یکی دیگر از قیدهای موجود در بکارگیری جداسازی لرزه‌ای جابجایی بزرگی است که در محل جداسازی لرزه‌ای بین روسازه و زمین (تکیه‌گاه) وجود دارد. به عبارت دیگر باید در اطراف ساختمان فضای کافی برای این جابجایی فراهم گردد و در طول عمر مفید سازه از آن نگهداری شود. هر چند باید توجه داشت که با ترکیب جداسازی لرزه‌ای و اضافه نمودن مکانیزم‌های استهلاک انرژی و افزایش سختی می‌توان جابجایی‌های مورد انتظار را کاهش داد.

یکی از معایب جداسازی لرزه‌ای، عدم امکان استفاده از آن به طور جزئی برای مقاوم‌سازی است. در نتیجه معمولاً استفاده از جداسازی به طور قابل ملاحظه‌ای پرهزینه‌تر از سایر روش‌های مقاوم‌سازی می‌باشد. به همین دلیل در اغلب موارد از جداسازی لرزه‌ای در مقاوم‌سازی سازه‌های زیر استفاده می‌شود:

۱- ساختمان‌های خاص مانند برخی ساختمان‌های صنعتی، تحقیقاتی، عمومی و بیمارستان‌ها که شامل تجهیزات حساس بوده و یا دارای ملزومات عملکردی و عملیاتی بسیار سختگیرانه‌ای هستند.

۲- ساختمان‌های تاریخی که استفاده از سایر روش‌ها باعث آسیب‌دیدن معماری و شخصیت تاریخی آن‌ها می‌شود. جداسازی لرزه‌ای به طور فزاینده‌ای برای ساختمان‌های تاریخی که به طور مستقل قرار گرفته‌اند و شالوده یا فضای زیر آن‌ها شاخصه تاریخی ندارد، مورد استفاده قرار می‌گیرد. در انتخاب این راه حل، باید امکان وجود منابع باستان‌شناسی یا تاریخی در محل پروژه مورد توجه قرار گیرد.

۳- پل‌ها، به دلیل نیاز به تعداد کم و سهولت به کارگیری از جداسازها در مقایسه با ساختمان‌های ساختمانی یا صنعتی.

#### الف-۳-۱-۲ وسایل استهلاک انرژی

شدت تقاضای لرزه‌ای یک سازه با سختی آن متناسب بوده و نسبت عکس با ظرفیت استهلاک انرژی آن دارد. در نتیجه، نصب وسایل استهلاک انرژی مکمل در سازه، باعث کاهش تقاضای لرزه‌ای شده و باعث



افزایش ایمنی سازه و ملحقات آن نسبت به آسیب‌های وارده در اثر زلزله می‌شود. یکی از پارامترهای مؤثر در میزان اثرگذاری وسایل استهلاک انرژی، ظرفیت تغییرشکل سازه است. برای سازه‌هایی که از جزئیات لرزه‌ای مناسب برخوردار نیستند و به عبارت دیگر دارای ظرفیت شکل‌پذیری کم می‌باشند، باید محتاطانه از وسایل استهلاک انرژی استفاده نمود. در این موارد استفاده از راه‌حل‌های ترکیبی (افزایش ظرفیت تغییرشکل سازه و استفاده از وسایل استهلاک انرژی) توصیه می‌شود.

وسایل غیرفعال اتلاف انرژی باعث افزایش میرایی و در برخی موارد افزایش سختی سازه می‌شوند. در شرایط مطلوب، ابزارهای استهلاک انرژی، جابجایی جانبی سازه را به یک دوم تا یک سوم کاهش داده و در صورتیکه این ابزارها باعث افزایش سختی سازه شوند، کاهش بیشتری قابل انتظار خواهد بود. همچنین ابزارهای استهلاک انرژی باعث کاهش نیرو در سازه‌هایی که رفتارشان در محدوده الاستیک است، می‌شوند؛ هرچند انتظار نمی‌رود نیرو در سازه‌هایی که وارد ناحیه پلاستیک می‌شوند، کاهش یابد.

سیستم‌های استهلاک انرژی در محدوده وسیع‌تری نسبت به سیستم‌های جداگر لرزه‌ای مورد توجه قرار می‌گیرند. برای ساختمان‌های مرتفع (که استفاده از سیستم جداگر لرزه‌ای در آن‌ها عملی نیست)، سیستم‌های استهلاک انرژی در زمانی که اهداف عملکردی شامل سطح عملکرد آستانه فروریزش می‌شود، باید در نظر گرفته شوند. متقابلاً ابزارهای استهلاک انرژی معینی وجود دارند که نسبتاً اقتصادی بوده و می‌توانند برای سطح عملکردی ایمنی جانی به کار روند. هر چند سیستم‌های استهلاک انرژی به عنوان استراتژی طراحی مناسب برای زمانی که سطح عملکردی مورد نظر ایمنی جانی یا شاید خدمت‌رسانی بی‌وقفه باشد مناسب‌تر هستند، اما اهداف دیگری نیز می‌توانند بر انتخاب استفاده از ابزار استهلاک انرژی تأثیر بگذارند؛ زیرا این ابزار می‌توانند برای کنترل پاسخ سازه در مقابل زلزله‌های ضعیف، باد یا بارهای مکانیکی به کار روند.

میراگرهای با جرم متوازن و میراگرهای مایع متوازن مشخصات اشکال مدی اصلی سازه را اصلاح کرده و باعث افزایش میرایی می‌شوند. همانطور که در پیشتر عنوان شد، این میراگرها بویژه در سازه‌های بلند که دارای فرکانس اصلی پایین هستند، کاربرد دارند. در اثر اضافه کردن این سیستم به سازه، باید افزایش وزن ناشی از اضافه نمودن جرم میراگر در محاسبات وارد شود. این میراگرها فضای زیادی را اشغال می‌کنند (گاهاً



یک یا چند طبقه) و همچنین به فرکانس تنظیمی بسیار حساس هستند. یکی از مزایای میراگر مایع متوازن، استفاده از آن برای مقاصد آتش‌نشانی است. به علاوه برای تمامی جهات بارگذاری موثر می‌باشد. از معایب میراگر مایع متوازن با جرم متوازن هزینه اولیه و هزینه نگهداری بالایی آن است. یکی از معایب میراگرهای مایع متوازن، رفتار به شدت غیرخطی آن‌ها و عدم پوشش فرکانس‌های مختلف می‌باشد که استفاده از آن‌ها را برای مهندسی کمی دشوار نموده است.

به طور کلی استفاده از میراگرهایی مانند میراگرهای حاوی سیال ویسکوز، میراگرهای ویسکوالاستیک، میراگرهای جاری شونده فلزی و میراگرهای اصطکاکی بسیار ارزان‌تر از موارد دیگر بوده و همچنین تکنولوژی تولید پیچیده‌ای ندارند. بنابراین تولید آن‌ها در کشور به لحاظ عملی امکان‌پذیر می‌باشد. معایب و محاسن هر یک از این میراگرها در جدول الف-۴ نشان داده شده است.



جدول الف-۴- مقایسه میراگرهای غیرفعال مورد استفاده برای کاهش پاسخ لرزه‌ای سازه‌ها

نوع میراگر	سیال ویسکوز	وسیکو الاستیک	جاری شونده فلزی	اصطکاکی
شکل شماتیک				
رفتار هیسترتیک ایده ال				
مدل فیزیکی ایده ال			وجود ندارد	
محاسن	<p>موثر در جابجایی‌های کوچک، نیروی بازگرداننده حداقل، ساده سازی مدل میراگر برای میراگرهای خطی، عدم وابستگی خصوصیات به فرکانس بارگذاری و دما، عملکرد مناسب در پروژه‌های نظامی</p>	<p>موثر در جابجایی‌های کوچک، وجود نیروی بازگرداننده، رفتار خطی و مدلسازی ساده میراگر، رفتار پایدار، جابجایی ماندگار کوچک</p>	<p>رفتار چرخه‌ای پایدار، قابلیت اعتماد در دراز مدت، عدم حساسیت به دمای بهره برداری، آشنا بودن رفتار ماده برای مهندسين</p>	<p>استهلاک انرژی بالا در هر چرخه، عدم حساسیت به دمای بهره‌برداری</p>
معایب	<p>احتمال نشت سیال (مشکل قابلیت اعتماد)</p>	<p>ظرفیت تغییر شکل محدود، خصوصیات وابسته به فرکانس بارگذاری و دما، احتمال جداشدگی و پارگی ماده ویسکو الاستیک (مشکل قابلیت اعتماد)</p>	<p>آسیب دیدگی میراگر پس از زلزله (احتمال نیاز به تعویض)، رفتار غیرخطی (احتمال نیاز به تحلیل غیر خطی)</p>	<p>امکان تغییر شرایط سطح مشترک در طول زمان (مشکل قابلیت اعتماد)، رفتار شدیداً غیرخطی، امکان تحریک مدهای بالاتر و نیاز به تحلیل های غیرخطی، جابجایی ماندگار در صورت عدم تامین مکانیزم بازگرداننده</p>





#### الف-۴ مطالعات آزمایشگاهی در مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی

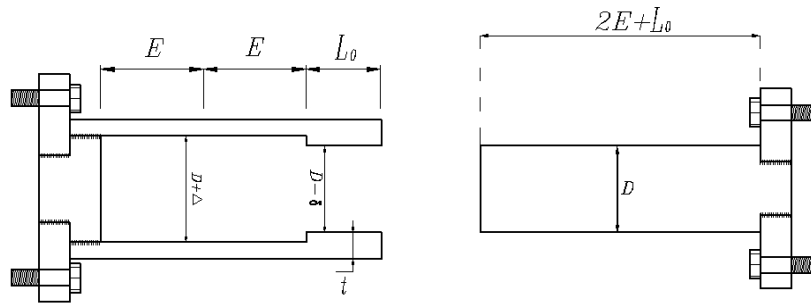
با توجه به گسترش بهره‌گیری از میراگرها در ساخت و سازه‌های کشور، توجه به جزئیات این ابزارها و کنترل رفتار آنها در شرایط لرزه‌ای حساس، از جمله مواردی است که باید مدنظر قرار گیرد. در همین راستا، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی در قالب پروژه‌های تحقیقاتی مختلف به بررسی این موضوع پرداخته است. از جمله پروژه‌های تحقیقاتی که مبتنی بر مطالعات آزمایشگاهی بوده است، می‌توان به دو پروژه با هدف ارزیابی رفتار میراگرهای اصطکاکی سیلندری و میراگرهای TADAS اشاره کرد. خلاصه‌ای از این مطالعات در ادامه ارائه شده است.

#### الف-۴-۱ میراگرهای اصطکاکی سیلندری

از مجموعه آزمایش‌های صورت گرفته در آزمایشگاه سازه مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی می‌توان به بررسی عملکرد میراگرهای اصطکاکی سیلندری که در آزمایشگاه سازه دانشکده عمران دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی ساخته شده، اشاره کرد. این میراگر که با ظرفیت اسمی ۴۰ تن در اختیار آزمایشگاه قرار گرفت، از دو بخش اصلی بعلاوه اتصالات لازم جهت نصب به سازه تشکیل شده است. بخش‌های اصلی این میراگر شامل بخش لوله ای شکل و بخش میلگردی است که به همراه اتصال صفحه انتهایی، در شکل (الف-۵۸) نشان داده شده است. بخش میلگردی به روش اختلاف حرارتی در داخل بخش استوانه‌ای قرار گرفته و پس از تعادل گرمایی، فشار لازم بین سطوح تماس جهت ایجاد اصطکاک شکل می‌گیرد. در اثر اعمال نیروی محوری کافی به میزان بار طراحی لغزش به دو سر این میراگر، بخش میلگردی در داخل بخش لوله ای با غلبه بر اصطکاک حرکت خواهد کرد و سبب جذب انرژی مکانیکی خواهد شد. برش طولی این میراگر پس از مونتاژ در شکل (الف-۵۹) نشان داده شده است. به جای اتصالات صفحه پیچ شده انتهایی که دارای ظرفیت تحمل و انتقال لنگر هستند، می‌توان در آزمایش و عمل از انواع اتصالات دارای درجات گیرداری متفاوت استفاده نمود، به شرط آنکه پایداری سیستم به همراه میراگر و اتصالات انتهایی آن قبلاً توسط مهندسين مشاور مورد بررسی و تایید قرار گرفته باشد. شکل (الف-۶۰) نمونه‌هایی از اتصالات انتهایی قابل استفاده برای این میراگر را به نمایش می‌گذارد. پارامترهای مورد اشاره در شکل‌های زیر



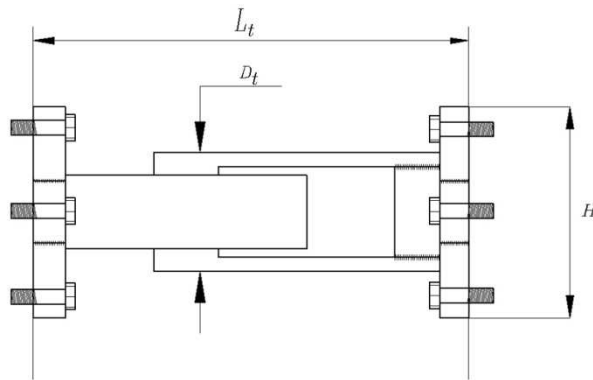
عبارتند از:  $D$  قطر استوانه (میلگرد)،  $\delta$  اختلاف قطر داخلی لوله و میلگرد (میزان تنگی قطر داخلی لوله نسبت به قطر میلگرد)،  $t$  ضخامت دیواره لوله در محدوده تماس،  $E$  حداکثر طول جابجایی به سمت داخل (فشرده‌گی) یا به سمت خارج (کشیدگی)،  $L_0$  طول محدوده تماس و  $\Delta$  افزایش قطر داخلی لوله جهت حذف تنش های حلقوی در خارج از محدوده تماس.



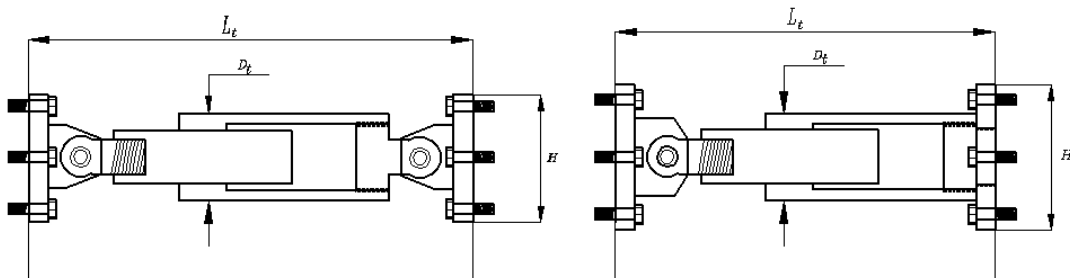
ب - بخش لوله ای شکل

الف - بخش میلگردی

شکل الف-۵۸-برش طولی اجزای اصلی میراگرهای اصطکاکی سیلندری



شکل الف-۵۹-برش طولی میراگر اصطکاکی سیلندری مونتاژ شده



شکل الف-۶۰-چند نمونه اتصال انتهایی برای میراگرهای اصطکاکی سیلندری



از جمله مشخصات فنی میراگرهای تحت آزمون در این پروژه می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

(۱) بار طراحی لغزش ۴۰ تن در نظر گرفته شده است.

(۲) حداکثر طول جابجایی به سمت داخل (فشرده‌گی) یا به سمت خارج (کشیدگی) 70 mm در نظر گرفته شده است.

(۳) میلگرد مورد استفاده از نوع فولاد CK45 دارای پوشش کروم بوده و در شرایط جوی و محیطی، احتمال خوردگی آن وجود ندارد. سطوح تماس میراگر و داخل لوله کاملاً هوا بند بوده و امکان نفوذ هوا، رطوبت و زنگ‌زدگی به آن وجود ندارد. ورق‌های اتصال انتهایی و سطح خارجی لوله باید با پوشش مناسب در برابر خوردگی محافظت گردند.

(۴) مشخصات ابعاد هندسی این میراگر را می‌توان با D برابر با ۱۲۰ میلی‌متر، t برابر با ۱۲ میلی‌متر، E برابر با ۷۰ میلی‌متر،  $L_e$  در حدود ۶۰۰ میلی‌متر و  $D_e$  برابر با ۱۴۵ میلی‌متر تعیین نمود.

با انجام آزمایش‌های چرخه‌ای بر روی میراگرهای اصطکاکی سیلندری، منحنی نیرو-تغییر مکان تحت نیروهای رفت و برگشتی حاصل می‌شود. جزئیات این کار مطابق با بخش ۸-۳-۸ دستورالعمل بهسازی لرزه‌ای ساختمانهای موجود (نشریه ۳۶۰ دفتر امور فنی، تدوین معیارها و کاهش خطر پذیری ناشی از زلزله سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور مورخ ۱۳۸۵) و استاندارد ASCE/SEI41-06-2007 کشور آمریکا، انتخاب شده که هر دو برگرفته از استاندارد FEMA356 است. عملیات آزمون با کشیدن و فشردن دو سر میراگر توسط یک جک هیدرولیکی با ظرفیت ۵۰ تن انجام می‌شود که ابزاربندی آن مطابق شکل (الف-۶۱) خواهد بود. در این حال شاسی تیر آهن بال پهن بعنوان کف صلب عمل می‌کند که لازم است به کف قوی آزمایشگاه پیچ شود، سپس سایر تجهیزات شامل فکهای قوی بعنوان تکیه گاه، جک هیدرولیکی جهت اعمال بار، میراگر اصطکاکی سیلندری و نیرو سنج، به طور مناسب روی شاسی نصب می‌شوند. به منظور اندازه گیری تغییر شکل دو سر میراگر نیز از خط کش الکترونیکی استفاده شده است که مطابق شکل (الف-۶۲) به دو سر میراگر متصل شده است.



شکل الف-۶۱- ابزاربندی و نحوه اتصال اجزای آزمایش

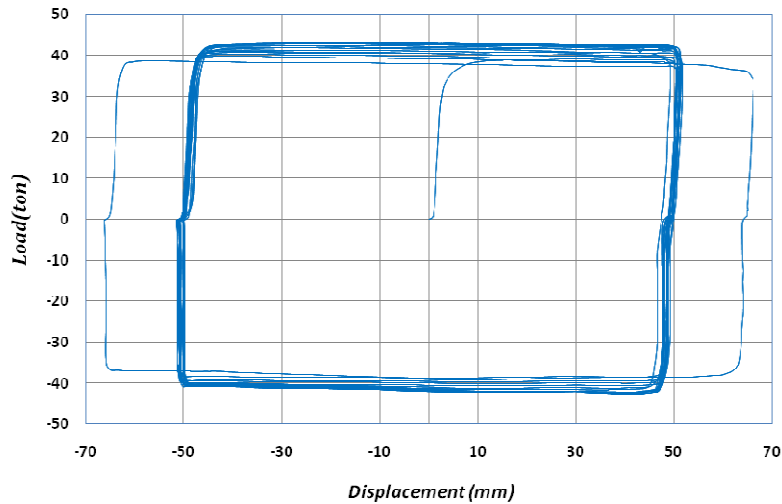


شکل الف-۶۲- نحوه اتصال خط کش الکترونیکی به دو سر میراگر

بر اساس آزمایش‌های انجام شده بر روی نمونه میراگرهای اصطکاکی سیلندری شرکت مهندسی مشاور طازند، نتایج حاصل شده شرایط کفایت و پذیرش رفتار میراگرها، از جمله از میزان تغییرات نیرو، سختی موثر و سطح داخلی منحنی های هیسترسیس از حد میانگین را برآورده می‌نمایند. این نمونه‌ها از ثبات رفتاری و چرخه‌های هیسترسیس پایدار (شکل الف-۶۳) برخوردار بوده و رفتار نامطلوبی همانند کمانش یا شکست ترد در نمونه‌ها و جزییات اتصال دو سر آن‌ها مشاهده نمی‌شود. علاوه بر این، ظرفیت میراگرها در حدود ظرفیت



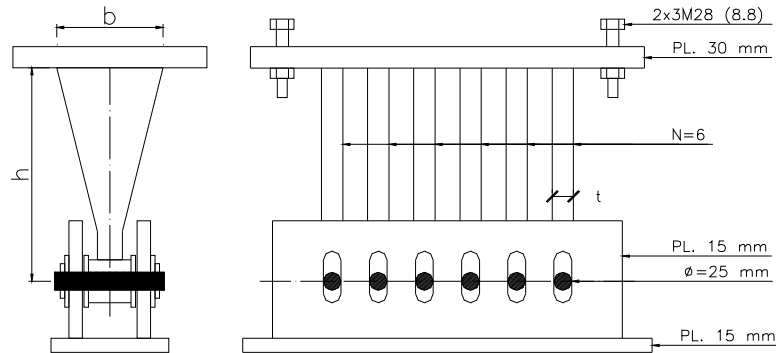
اسمی بوده و برای کاربرد در سازه‌ها، به شرط وارد کردن مدل رفتار غیرخطی این میراگرها (که از آزمایش حاصل شده‌است) در مدلسازی سازه، قابل پذیرش تلقی می‌گردند.



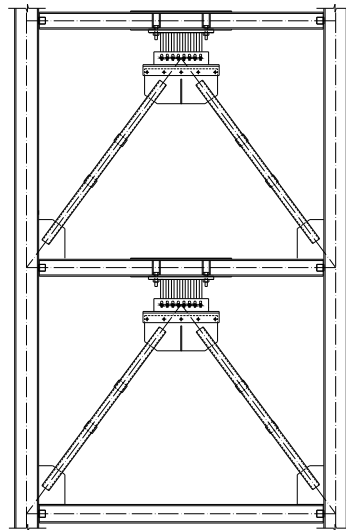
شکل الف-۶۳- منحنی هیستریسیس میراگر شماره ۲

#### الف- ۴-۲ میراگرهای TADAS

نوع دیگری از میراگرها، میراگرهای تسلیم شونده هستند که با اتفاق افتادن تسلیم در حجم گسترده‌ای از قطعات فولادی تشکیل دهنده‌شان، بخش قابل توجهی از انرژی ورودی را به انرژی حرارتی تبدیل می‌کنند. از این مجموعه، میراگرهای معروف به TADAS یا میراگرهای افزاینده میرایی و سختی با پره های مثلثی شکل (TADAS: Triangular Added Damping And Stiffness) بدلیل بهره مندی از شکل پذیری بسیار بالا، انرژی قابل توجهی را ضمن برخورداری از سختی و مقاومت پایدار، طی چرخه های پیایی بارگذاری، اتلاف می‌نماید. میراگر TADAS از پره های مثلثی تشکیل شده که از سمت قاعده بصورت گیردار به ورق فوقانی، و از طرف راس بصورت مفصلی به ورق شکاف دار تحتانی متصل می‌باشد (شکل الف-۶۴). شرایط انتهایی یادشده در امتداد عمود بر صفحه پره‌ها می‌باشد. این میراگرها در رده میراگرهای تسلیمی بوده و در حد فاصل راس بادبندهای جناقی (Chevron) و تیر طبقه مطابق شکل (الف-۶۵) نصب می‌گردد. برآیند نیروی محوری اعضا بادبندی بصورت یک مولفه افقی در محل تقاطع محورها بر المان TADAS اثر می‌نماید.



شکل الف-۶۴- جزئیات المان TADAS



شکل الف-۶۵- موقعیت نصب سیستم TADAS در یک قاب

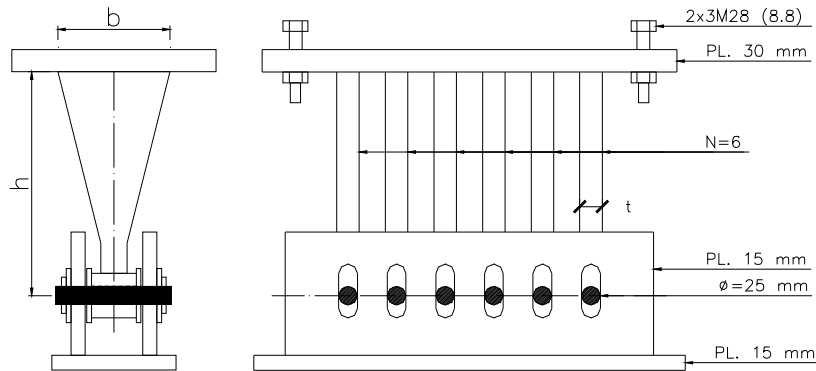
بدین ترتیب، در اثر حرکت جانبی طبقه، در تمام پره ها و در کل ارتفاع آنها فولاد به حد تسلیم رسیده، در نتیجه مکانیزم جانبی سازه به وقوع می پیوندد و این در حالی است که افزایش تغییر مکان و پیشروی فولاد در محدوده تسلیم، استهلاک انرژی بیشتری را به دنبال خواهد داشت. اصولاً این انرژی تبدیل شده به صورت گرمایی بوده و به لحاظ ناپایستار بودن آن قابل بازگشت به چرخه تبدیل انرژی پایستار سازه نمی باشد. بنابراین به سرعت از چرخه تبدیل انرژی های درونی سازه خارج می گردد.

با توجه به اینکه رفتار فولاد تشکیل دهنده پره ها در منطقه غیر خطی در بارگذاری چرخه ای پیچیده بوده و برای مدلسازی آن، لازم است پارامترهای متعددی بصورت تجربی تعیین شود، انجام آزمایشاتی هدفمند در



شناخت عوامل موثر بر این پدیده، در کنار تحلیل های تئوری اجتناب ناپذیر است. همچنین بررسی مسئله خستگی قطعات و اجزا تشکیل دهنده میراگر در سیکلهای کم در محدوده پس از تسلیم، از طریق آزمایش المان مذکور تحت بارگذاری چرخه ای میسر خواهد شد. به همین دلیل مجموعه ای از آزمایشات چرخه ای بر روی چهار نمونه از این میراگرها در آزمایشگاه سازه مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی انجام شد که در ادامه به اختصار بیان می شود.

قاب مورد استفاده برای ارزیابی این نمونه ها، به ابعاد  $300 \times 400 \text{ cm}$  و از پروفیل های فولادی 2IPE180 برای ستونها، از تیر ورق های فولادی Web/Flange  $PL200 \times 12$  برای تیرها و پروفیل فولادی  $2L100 \times 100 \times 10$  برای بادبندها ساخته شده است (شکل الف-۶۷). این قاب بر روی تکیه گاه های مفصلی به کف قوی مستقر گردیده و بار جانبی از طریق دو جک هیدرولیک از طرفین قاب، بصورت کنترل شده به آن اعمال شده است. چهار نمونه میراگر مورد آزمایش دارای ابعاد و تعداد پره های یکسانی بوده و فقط در ضخامت پره ها با یکدیگر تفاوت داشتند. جزئیات ابعادی نمونه ها بر اساس شکل (الف-۶۶) می باشد.



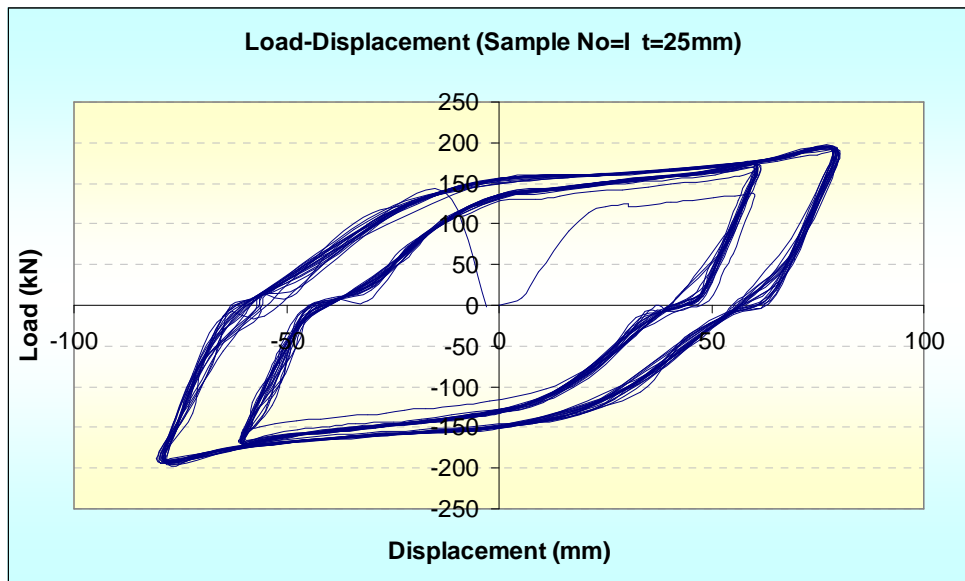
شکل الف-۶۶- میراگرهای TADAS مورد آزمایش



شکل الف-۶۷- نمایی از setup آزمایش

آنچه از نتایج بر می آید آن است که هر چهار میراگر مورد بررسی، تحت چرخه های معکوس کامل تغییر مکانی رفتار مقبولی را از خود نشان داده و چرخه های بار-تغییر مکان پایداری را تشکیل می دهند (شکل الف-۶۸). براساس ضوابط استانداردهای مرجع برای ارزیابی این میراگرها، از جمله فصل هشتم دستورالعمل بهسازی لرزه ای، توانایی میراگرها در تحمل تغییر شکلها، پایداری در سختی موثر میراگرها، پایداری در انرژی تلف شده، پایداری در نسبت میرایی موثر و پایداری نیرو در تغییر مکان صفر از جمله مواردی است که کفایت رفتاری این میراگرها را براساس بند ۸-۳-۸-۴ از دستورالعمل بهسازی لرزه ای ساختمانهای موجود، تأیید می نماید.





شکل الف-۶۸- منحنی تغییرات نیرو- تغییر مکان TADAS-25-I

#### الف-۵ شرکت‌های فعال در ایران

در این بخش، برخی شرکت‌های فعال در زمینه تولید و نصب میراگرها در داخل کشور معرفی شده و زمینه فعالیت‌ها آن‌ها بررسی می‌شود.

#### الف-۵-۱ شرکت ارتعاشات صنعتی ایران

این شرکت در زمینه‌ی تجهیزات نوین مقاوم سازی در برابر زلزله و ایجاد سطح عملکرد بی‌وقفه لرزه‌ای در انواع ساختمان‌های مسکونی، تجاری، مراکز مدیریت بحران، مراکز آتش‌نشانی، مدارس، بیمارستان‌ها، پل‌ها و دیگر سازه‌های با درجه‌ی اهمیت بالا فعالیت می‌کند.

این تجهیزات شامل انواع جداگرها و میراگرهای لرزه‌ای است که هدف از به کارگیری آن‌ها، کاهش نیروی ورودی به سازه و استهلاک انرژی است. سیستم‌های جداساز و میراگر لرزه‌ای شرکت ارتعاشات صنعتی ایران، توسط شرکت نیوزیلندی رابینسون سائزیمیک تولید و تست می‌شود.

#### الف-۵-۱-۱ انواع جداگرهای لرزه‌ای ارائه شده

چهار دسته از جداگرهای لرزه‌ای توسط شرکت ارتعاشات صنعتی ایران، ارائه می‌شوند:



- ۱- جداگر لرزه‌ای سرب-لاستیک
- ۲- جداگر لرزه‌ای لاستیکی با میرایی بالا
- ۳- جداگر اصطکاکی لغزان
- ۴- جداگر لغزنده‌ی اصطکاکی با نیروی بازگرداننده‌ی لاستیک

#### الف-۵-۱-۲ مزایای جداگرهای لرزه‌ای تولیدی

- حفظ کاربری سازه در حین و پس از زلزله و تأمین سطح عملکردی قابلیت استفاده بی وقفه (IO)
- کاهش نیروی زلزله وارد شده به سازه تا بیش از ۶۰٪
- رساندن خسارات سازه‌ای و غیر سازه‌ای به صفر
- کاستن از حجم مصالح مورد نیاز برای ساخت و ساز تا بیش از ۲۰٪
- کاهش ضرورت استفاده از سیستم‌های باربر جانبی چون مهاربند یا دیوار برشی
- قابلیت استفاده در سازه‌های موجود

#### الف-۵-۱-۳ انواع میراگرهای لرزه‌ای تولیدی

میراگرهای شرکت ارتعاشات صنعتی ایران همگی از نوع سربی- تسلیمی می‌باشند که توسط شرکت رابینسون سایزمیک طراحی، تولید و تست شده‌اند. این میراگرها در سه نوع ارائه می‌شوند:

۱- میراگر LED (Lead Extrusion Damper-LED)

۲- میراگری لرزه‌ای خطی PVD

۳- میراگرهای لرزه‌ای صفحه‌ای RVD

#### الف-۵-۱-۴ میراگرهای لرزه‌ای LED

این میراگرها در اتصالات سازه‌ای و یا به همراه جداگر لرزه‌ای در تراز جدا سازی شده، برای افزایش میرایی سازه و کاهش پاسخ لرزه‌ای کاربرد دارند.



این میراگر از دسته‌ی میراگرهای فلزی- تسلیمی است که از خصوصیت سوپر پلاستیک سرب در آن بهره گرفته شده است. میراگر LED مانند بسیاری دیگر از میراگرهای درون سازه‌ای، بین محل‌هایی نصب می‌شود که در هنگام زلزله تغییر مکان نسبی دارند. این میراگر به دو شکل ساخته می‌شود. در نوع اول میله‌ای سربی درون محفظه‌ای قرار دارد که در قطر آن در قسمت میانی کاهش می‌یابد. هنگامی که نیروی زلزله از حدی بیشتر شود، سرب تحت نیرو، درون مجرای باریک جاری می‌گردد و به این شکل هم نیروی زلزله محدود می‌شود و هم در طی حرکات رفت و برگشتی زلزله، انرژی در حلقه‌های هیستریزیس نیرو - تغییر مکان میرا می‌شود. نمونه‌ای از این میراگرها در شکل الف-۶۹ مشاهده می‌شود.



شکل الف-۶۹- میراگر LED

در نوع دوم، سرب درون محفظه‌ای و پیرامون میله‌ای قرار دارد که در محل‌هایی برجسته است. در این ساختار نیز افزایش نیروی زلزله منجر به جاری شدن سرب می‌شود. سرب جاری شده از روزنه‌ی میان برجستگی و پیرامون محفظه عبور خواهد کرد. نمونه‌ای از این میراگرها در شکل الف-۷۰ مشاهده می‌شود. ارائه شده است.



شکل الف-۷۰- میراگر LED

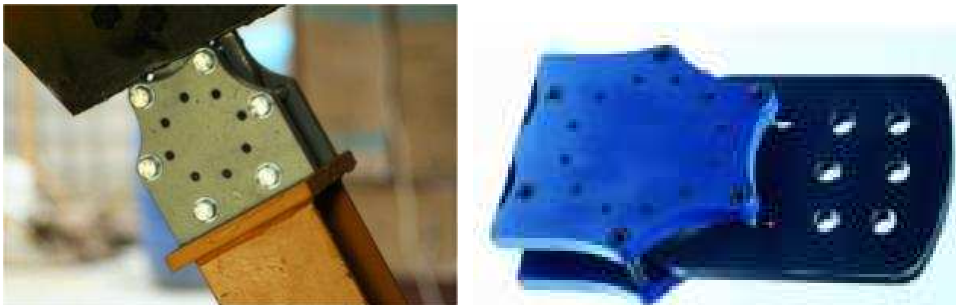
میراگر سربی - تزریقی را می‌توان برای جابه‌جایی‌های بزرگی تا ۱ متر طراحی نمود و به کمک آن میرایی سازه را بر حسب نیاز تا بیش از ۵۰٪ میرایی بحرانی افزایش داد که این به منزله‌ی کاهش قابل توجه دریافت و پاسخ لرزه‌ای است. استفاده از LED در اتصالات سازه‌ای و یا به همراه جداگر لرزه‌ای در مواردی که مشکل دریافت و سختی اولیه (در سازه جداسازی شده) داریم، بسیار کارا است.



شکل الف-۷۱- میراگر LED

#### الف-۵-۱-۵- میراگرهای لرزه ای PVD

این میراگرها به عنوان سیستم مستهلاک کننده ی انرژی ارتعاشی اعم از ترافیکی، باد و زلزله، در انواع سازه ها و پل ها استفاده می شوند. این میراگرها از دسته ی فلزی- تسلیمی هستند که از خصوصیت سوپرپلاستیک سرب بهره گرفته و در بخش هایی از سازه نصب می گردد که نسبت به هم در هنگام ایجاد وقوع بار جانبی، تغییر مکان نسبی می دهد. بادبندها و عرشه ی پل ها محل هایی بسیار مناسب برای استفاده از PVD می باشد. نمونه ای از این میراگرها در شکل (الف-۷۲) مشاهده می شود.

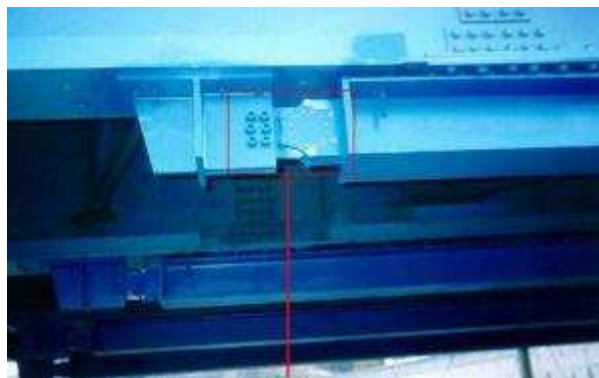


شکل الف-۷۲- میراگر PVD

ساختار این میراگرها بسیار شبیه تکیه گاه سربی لاستیکی است با این تفاوت که سرب بخش اعظم مقطع را به خود اختصاص داده که سبب افزایش میرایی تا بیش از ۲۰٪ میرایی بحرانی می شود. نبود کرنش پسماند در سرب پس از حرکات رفت و برگشتی زلزله و نیروی الاستیک لاستیک پیرامونی، سبب می شود که پس از



اتمام ارتعاشات، PVD به حالت اولیه خود بازگردد و نیاز به تعمیر و یا تعویض نداشته باشد. حساسیت این میراگر به طیف وسیعی از تغییر مکان‌های نسبی و عدم وابستگی خصوصیات استهلاک انرژی‌اش به فرکانس ارتعاشات، PVD را به گزینه‌ای بسیار مطلوب برای مقابله با ارتعاشات ناشی از بار باد، ترافیک و زلزله (در یک سازه به طور توأمان)، تبدیل نموده است. برای مثال ۰/۰۵ میلی‌متر تا ۵۰ میلی‌متر بازه‌ای است که یک PVD ۱۰۰ تنی به خوبی ارتعاشات را میرا خواهد کرد. می‌توان این میراگر را بر حسب نیاز تا ظرفیت ۲۰۰ تنی طراحی و تولید نمود. نمونه‌ای از این میراگر در شکل الف-۷۳ مشاهده می‌شود.



شکل الف-۷۳- میراگر PVD

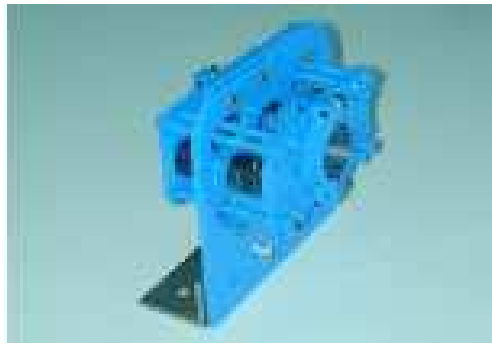
#### الف-۵-۱-۶ میراگرهای لرزه‌ای RVD

این میراگرها به عنوان مستهلک کننده‌ی ارتعاشات ناشی از باد، زلزله و بار ترافیکی در پل‌های کابلی استفاده می‌شود.

RVD از دسته‌ی میراگرهای فلزی- تسلیمی است که از خصوصیت سوپرپلاستیک سرب بهره می‌جوید. ارتعاشات ناشی از بار باد و ترافیک اثرات نامطلوبی از جمله کاهش عمر مفید را برای کابل پل‌ها به همراه دارد. به همین دلیل استفاده از میراگرها در پل‌های کابلی یک امر ضروری و مرسوم است. میراگر RVD در قیاس با میراگرهای هیدرولیکی، ویسکوز، ویسکوالاستیک و اصطکاکی که در پل‌های کابلی مورد استفاده قرار می‌گیرند، مزایا و برتری‌های زیر را دارد:



- ۱- میزان میرایی آن وابسته به تغییر مکان نسبی است نه وابسته به سرعت.
- ۲- نسبت به بازه وسیعی از تغییر مکان ها حساس است و عمل می کند.
- ۳- میرایی آن وابسته به فرکانس ارتعاشات نیست.
- ۴- با افزایش دما میرایی کاهش نمی یابد.
- ۵- به دلیل مایع نبودن، مشکل نشت (Leakage) ندارد.
- ۶- به دلیل نبود کرنش پس ماند در سرب، نیاز به تعمیر و یا تعویض ندارد.
- ۷- در برابر سیکل های بسیار زیاد بارگذاری خصوصیاتش بدون تغییر باقی می ماند.



شکل الف-۷۴-میراگر RVD

- الف-۵-۱-۷ مزایای میراگرهای لرزه ای تولیدی
- افزایش قابل توجه سطح عملکرد سازه
  - کاهش پاسخ لرزه ای سازه تا بیش از ۲۰٪
  - کاهش قابل توجه خسارات سازه ای و غیر سازه ای
  - کاستن از حجم مصالح مورد نیاز برای ساخت و ساز
  - قابلیت استفاده در سازه های موجود
  - بازیابی شکل اولیه به دلیل خصوصیت سوپر پلاستیک سرب
  - عدم نیاز به تعویض پس از وقوع زلزله

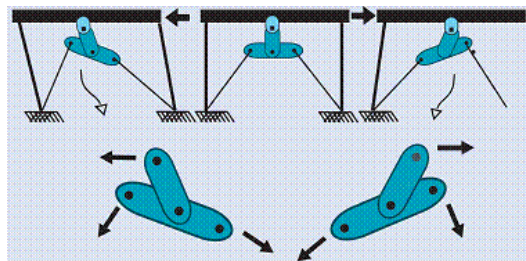


## الف-۵-۲ شرکت بهساز اندیشان تهران

شرکت بهساز اندیشان تهران به عنوان نماینده‌ی انحصاری شرکت DAMPTECH در ایران فعالیت می‌نماید.

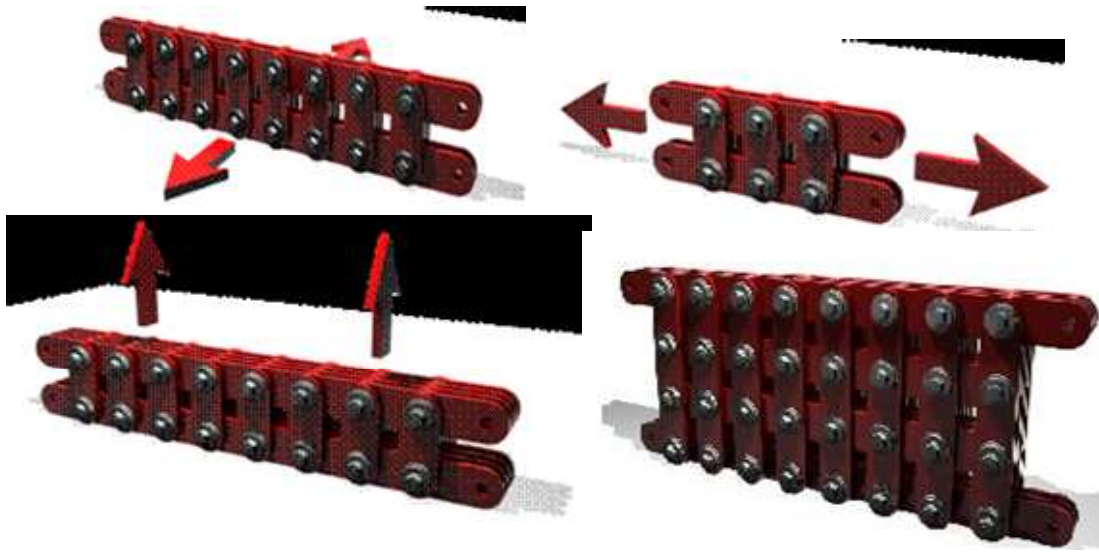
### الف-۵-۲-۱ میراگرهای اصطکاکی

میراگرهای اصطکاکی شرکت DAMPTECH از صفحات فلزی و لایه‌هایی از مواد مخصوص با خواص اصطکاکی ویژه که بین این صفحات قرار گرفته است تشکیل شده است. یک پیچ مقاومت بالا با اتصال اصطکاکی برای برقرار کردن نیروی مورد نیاز در سطح اشتراک پدهای اصطکاکی و صفحه‌های فلزی به کار برده می‌شود. این وسیله، انرژی را بوسیله اصطکاکی که در سطوح لغزشی ایجاد می‌شود، مستهلک می‌کند. مقدار انرژی مستهلک شده متناسب با مقاومت اصطکاکی و چرخش نسبی بین صفحات میراگر می‌باشد.



شکل الف-۷۵- میراگر شرکت DAMPTECH

این میراگرها خاص هر پروژه طراحی و تولید می‌شوند و با توجه به اینکه از نظر ابعاد در کلیه جهات قابل تنظیم و بسط هستند، امکان تطبیق با شرایط خاص هر پروژه را دارا می‌باشند. نمونه‌ای از میراگرهای اصطکاکی شرکت DAMPTECH در زیر نشان داده شده است.

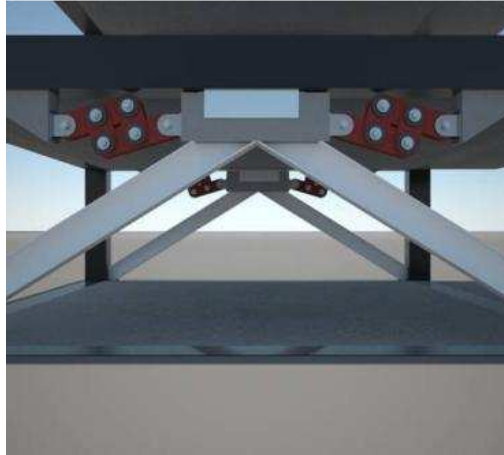


شکل الف-۷۶- میراگر شرکت DAMPTECH



شکل الف-۷۷- میراگر شرکت DAMPTECH





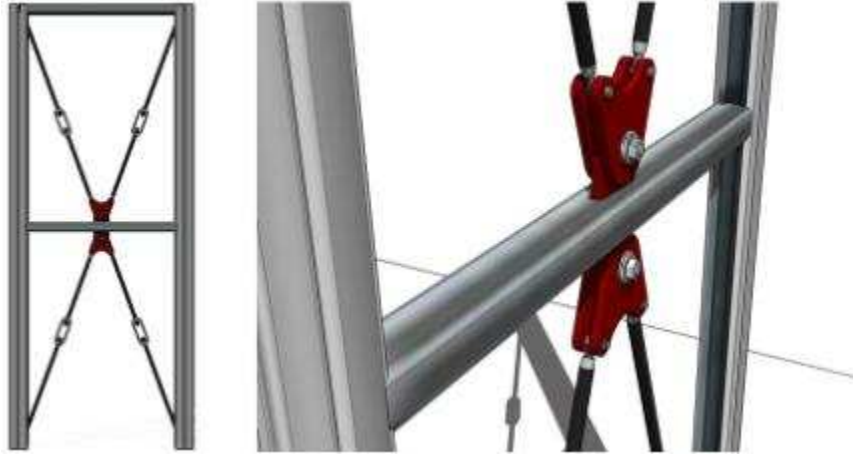
شکل الف-۷۸- میراگر شرکت DAMPTECH



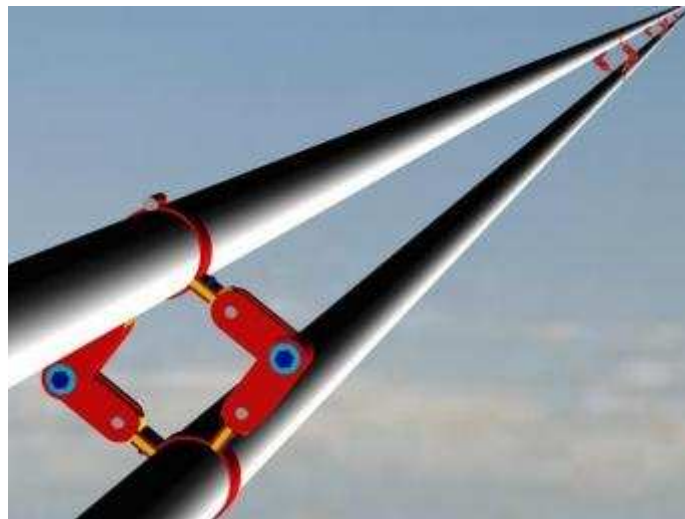
شکل الف-۷۹- میراگر شرکت DAMPTECH



شکل الف-۸۰- میراگر شرکت DAMPTECH



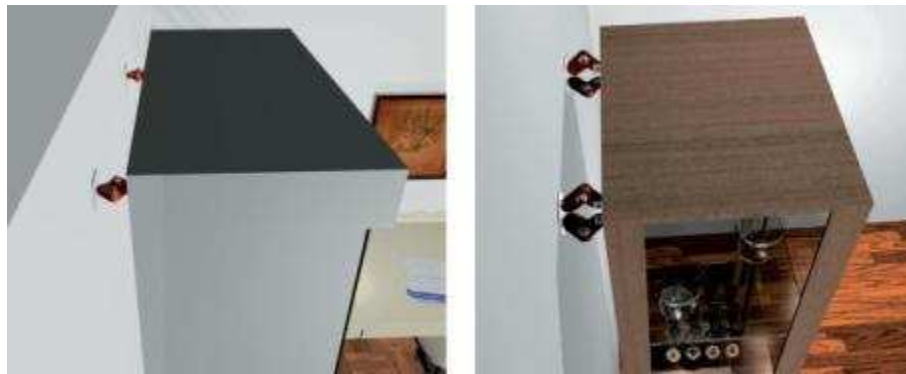
شکل الف-۸۱- میراگر شرکت DAMPTECH



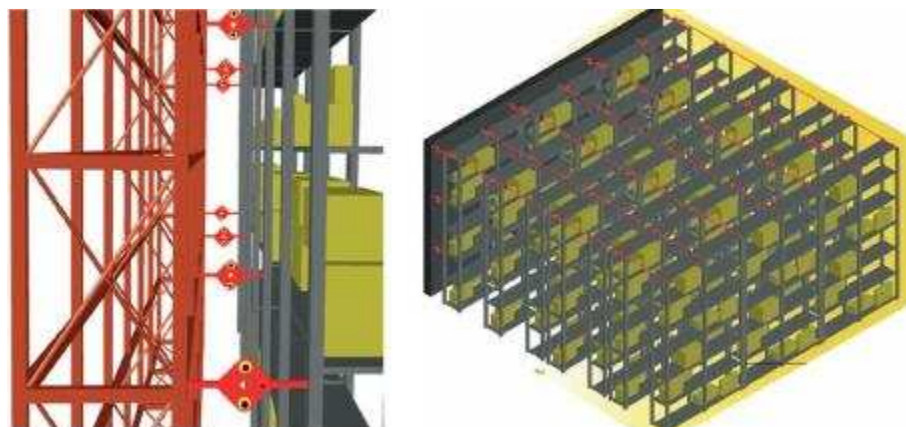
شکل الف-۸۲- میراگر شرکت DAMPTECH



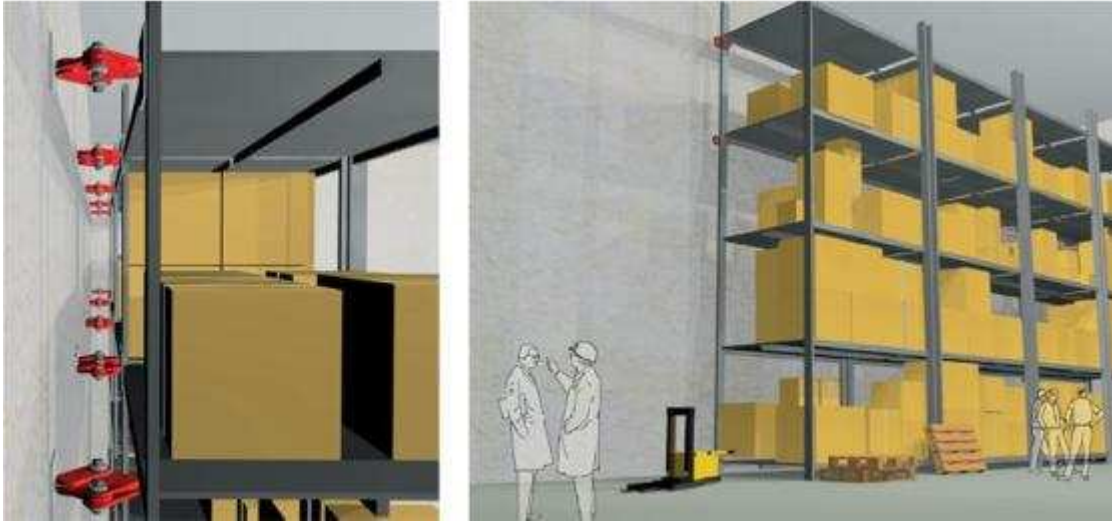
شکل الف-۸۳- میراگر شرکت DAMPTECH



شکل الف-۸۴- میراگر شرکت DAMPTECH



شکل الف-۸۵- میراگر شرکت DAMPTECH



شکل الف-۸۶- میراگر شرکت DAMPTech



شکل الف-۸۷- میراگر شرکت DAMPTech



شکل الف-۸۸- میراگر شرکت DAMPTECH

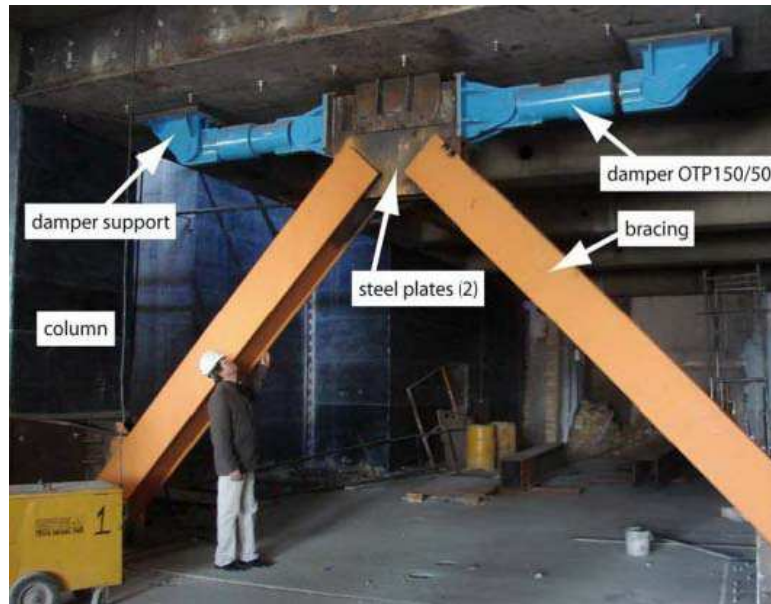
### الف-۵-۳ شرکت رادیاب

#### الف-۵-۳-۱ مطالعه موردی پروژه هتل آزادی تهران

پروژه بهسازی لرزه‌ای هتل آزادی توسط شرکت رادیاب و همکاری شرکت سوئیسی EMPA صورت گرفت که جزئیات آن در زیر اشاره شده است.

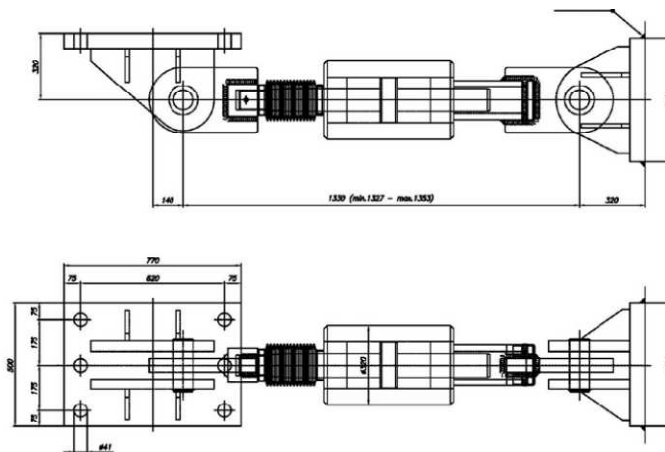
ساختمان هتل بزرگ آزادی تهران (هایت سابق) در دهه ۱۹۷۰ میلادی توسط یک شرکت آلمانی طراحی و در سال ۱۳۵۳-۱۳۵۶ اجرا شد. سازه این ساختمان از نوع بتن مسلح با قاب خمشی و دیوار برشی بوده و سقف طبقات از نوع دال دو طرفه می‌باشد. ساختمان برج اصلی در ۲۴ طبقه فوقانی از دیوار بتنی با سختی جانبی در هر دو جهت X و Y تشکیل شده ولی دیوارهای فوقانی در طبقه همکف و اول (لابی) وجود ندارد. به عبارت دیگر در این دو طبقه میزان دیوارهای برشی کمتر از طبقات دیگر است و از لحاظ رفتار جانبی طبقه نرم محسوب می‌شود. به علاوه در این سازه تعداد آرماتور عرضی (خاموت) نسبت به تعداد آرماتور طولی کم است. در این سازه از مهاربندهای فلزی به صورت متقارن در هر دو جهت X و Y در ترکیب با میراگرهای هیدرولیکی (ویسکوز) برای رفع مشکل طبقه نرم و محدود کردن جابجایی‌ها استفاده شده است.

میراگر مورد استفاده در این پروژه در شکل الف-۸۹ نشان داده شده است.



شکل الف-۸۹- میراگر هیدرولیکی در هتل آزادی

در این پروژه صفحات اتصال دهنده مهاربندها و میراگرها به یکدیگر به تیر سقف متصل نبوده و نیروی جانبی ناشی از جابجایی طبقات فقط به صورت نیروهای کششی و فشاری به میراگرها و اعضای قطری وارد می‌شوند. جزئیات اتصال و ابعاد میراگرها در شکل الف-۹۰ نشان داده شده است.

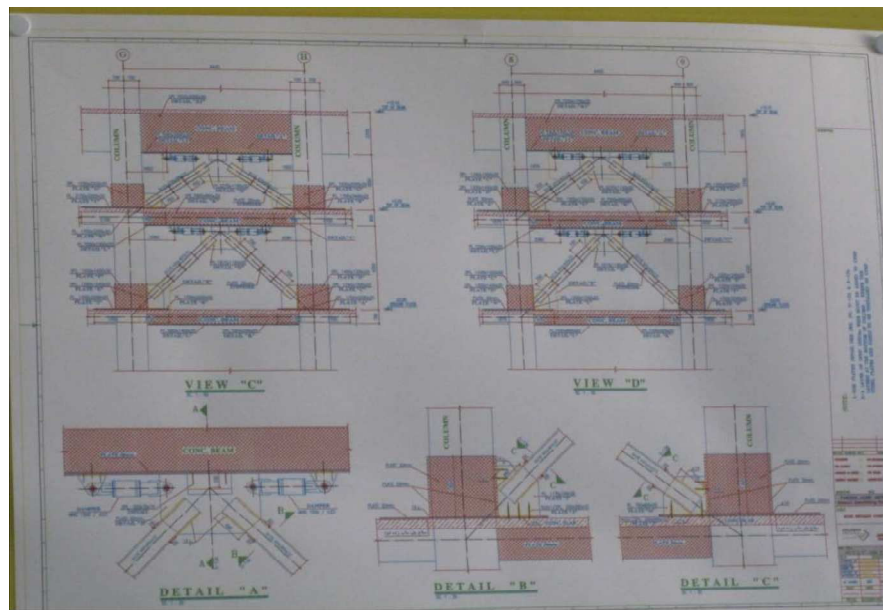


شکل الف-۹۰- جزئیات میراگرهای هیدرولیکی

میراگرهای استفاده شده در این پروژه ساخت کارخانه FIP بوده و در شکل الف-۹۱ تعدادی از میراگرهای آماده حمل به همراه مشخصات فنی این کارخانه نشان داده شده است.



(الف)

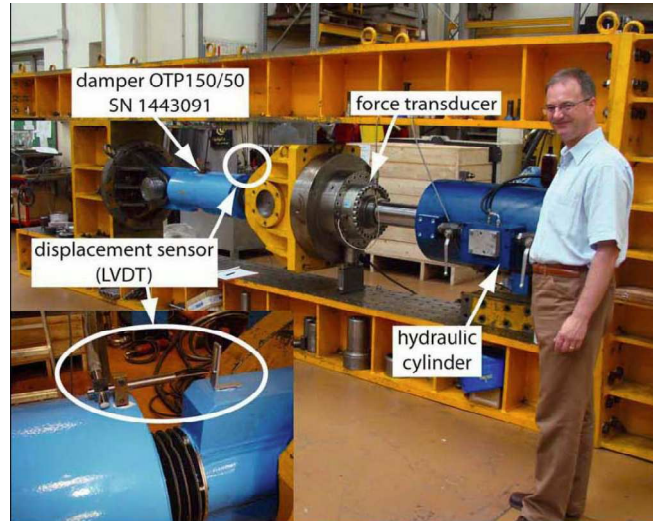


(ب)

شکل الف-۹۱ (الف) میراگرهای شرکت FIP، (ب) مشخصات فنی

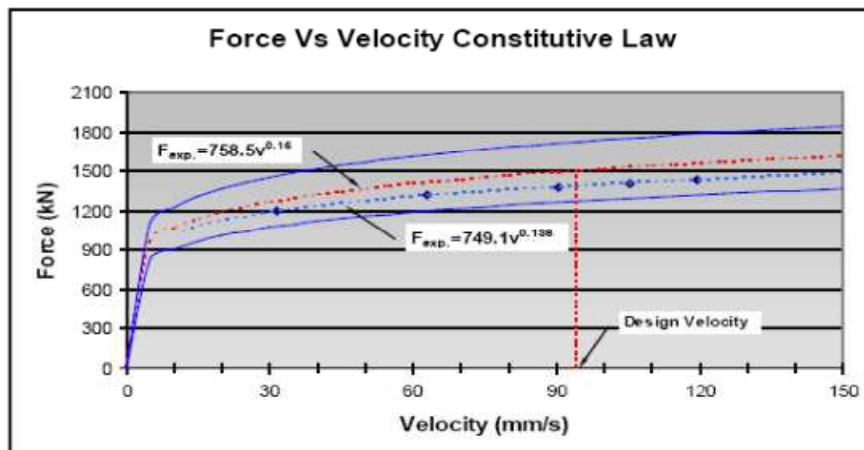


در شکل الف-۹۲ سیستم تست و محل سنسورها نشان داده شده است.



شکل الف-۹۲- سیستم تست میراگرها

نتایج تست فوق در نمودارهای نیرو-سرعت متعدی ارائه گردیده که در شکل الف-۹۳ نمونه‌ای از آن ارائه شده است.



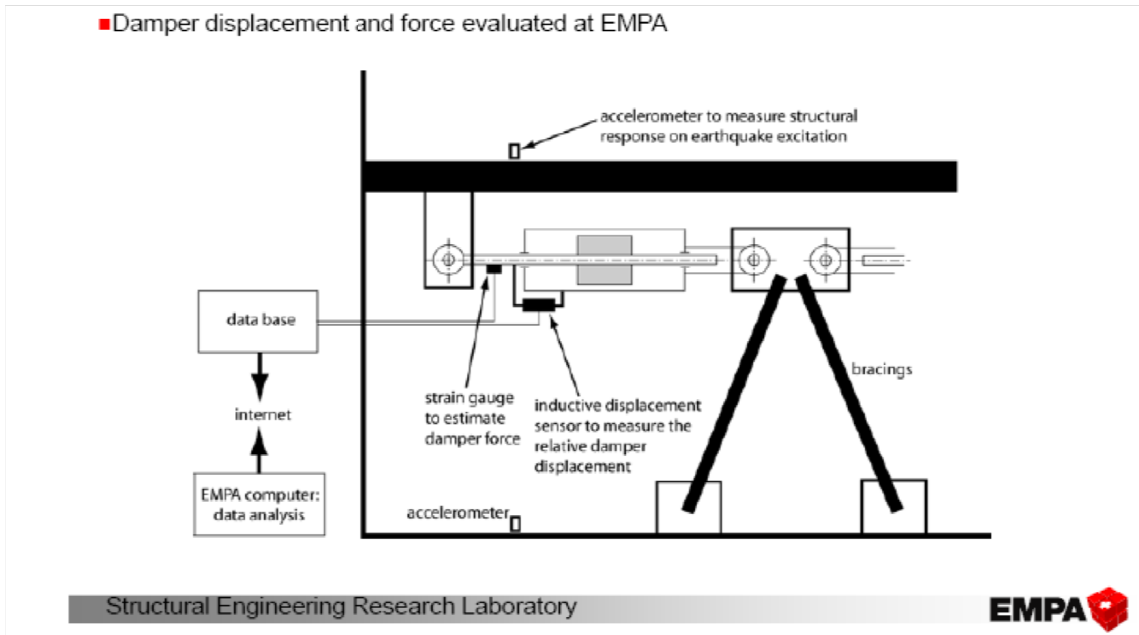
شکل الف-۹۳- نمودار نیرو-سرعت میراگر ویسکوز هتل آزادی

وقوع زمین لرزه‌های متعدد با شدت کم این امکان را فراهم می‌کند تا بتوان عملکرد سیستم نصب شده را کنترل و رفتار واقعی آن را در عمل بررسی کرد. برای انجام این کار تیزاب به سیستم مانیتورینگ شامل سنسورها و شتاب سنج‌های متعدد در نقاط مناسب به همراه تجهیزات جمع‌آوری و پردازش اطلاعات





می باشد. شکل شماتیک سیستم پیشنهادی موسسه EMPA برای پروژه هتل آزادی تهران در شکل الف-۹۴ ارائه شده است. تمامی اجزای این سیستم به صورت بی سیم بوده و در نوع خود از آخرین فن آوری های موجود محسوب می شود.



شکل الف-۹۴ سیستم مانیتورینگ میراگرهای هتل آزادی



## پیوست ب

### مقایسه ساختمان‌های دارای سیستم‌های استهلاک انرژی

#### ب-۱- مقدمه

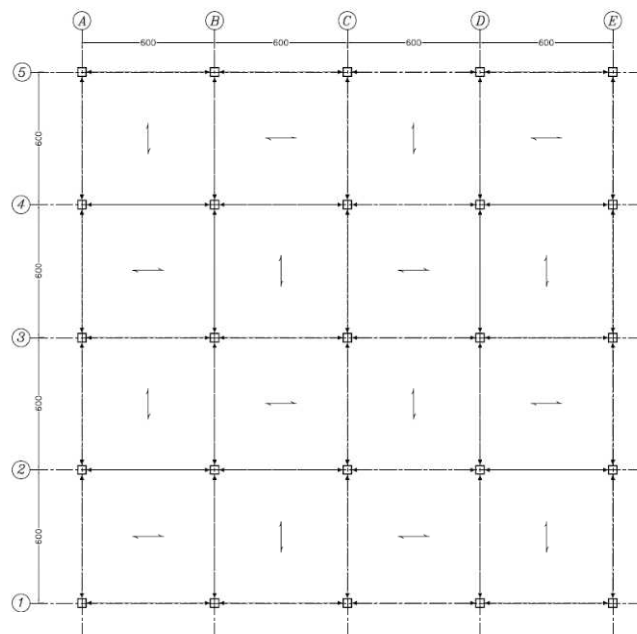
پیرو مطالب ارائه شده در فصول پیشین و با هدف بررسی شرایط اقتصادی حاصل از بهره‌گیری از سیستم‌های کنترل غیرفعال در بهبود رفتار لرزه‌ای ساختمان‌ها، در این فصل تلاش می‌شود تا با استفاده از تعدادی از سیستم‌های استهلاک انرژی در ساختمان‌های کوتاه، میان و بلند مرتبه، ضوابط و بایدهای طراحی به همراه نتایج اقتصادی حاصله مورد ارزیابی قرار گیرد.

در ابتدای این فصل سه ساختمان ۴، ۸ و ۱۲ طبقه با روش تحلیل طیفی طراحی شده و به عنوان ساختمان مبنا مدنظر قرار گرفته‌اند. پس از آن و به منظور بررسی تاثیر استفاده از میراگرهای غیرفعال در طراحی ساختمان‌ها، از مجموع سیستم‌های استهلاک انرژی، سه سیستم میراگرهای ویسکوز، میراگرهای ویسکو الاستیک و میراگرهای اصطکاکی انتخاب و در طراحی ساختمان‌های مبنای مورد اشاره به کار رفته است. نتایج حاصل از طراحی نشان می‌دهد که بهره‌گیری از میراگرهای غیرفعال در طراحی ساختمان‌های جدید، در کاهش میزان مصالح مصرفی و قیمت تمام‌شده مصالح به طور قابل ملاحظه‌ای تاثیر داشته‌است حال آنکه باید هزینه مورد نیاز برای تامین تجهیزات و قطعات میراگر و نصب آن‌ها در ساختمان در کنار این کاهش هزینه مورد بررسی قرار گیرد.

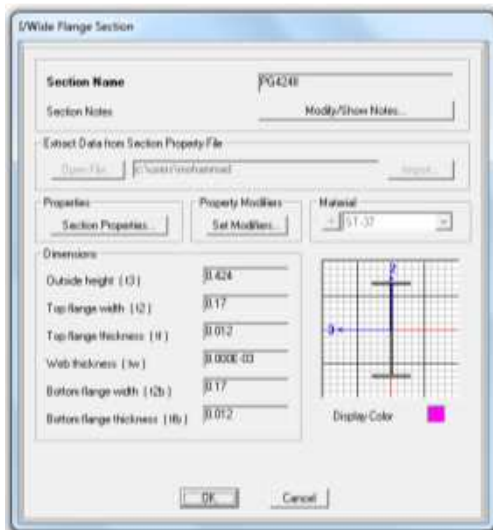


## ب-۲- معرفی ساختمان‌های مبنا

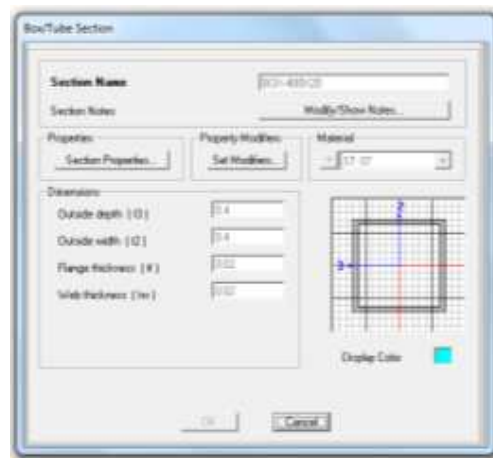
ساختمان‌های مبنا، ساختمان‌های با اسکلت فلزی و سیستم قاب خمشی متوسط فولادی در هر دو راستا تعریف شده‌اند که برای احداث در شهر سمنان و با زمینی دارای خاک نوع II طراحی خواهند شد. این ساختمان‌ها در رده ساختمان‌های با اهمیت متوسط و با ضریب اهمیت  $I=1$  تعریف شده‌اند. ارتفاع تمام طبقات  $3/2$  متر در نظر گرفته شده و ساختمان دارای پلانی منظم و متقارن با طول و عرض  $24$  متر و  $5$  قاب  $4$  دهانه با دهانه‌های به طول  $6$  متر در هر راستا تعیین شده‌است. بار مرده کف طبقات برابر با  $600 \text{ kg/m}^2$  و بار زنده آن‌ها برابر با  $250 \text{ kg/m}^2$  و بار دیوارهای پیرامونی در طبقات  $600 \text{ kg/m}$  و در بام،  $250 \text{ kg/m}$  تعریف شده‌است. لازم به ذکر است که فولاد به کاررفته در این ساختمان از نوع ST.37 با تنش تسلیم  $f_y = 2400 \text{ kg/cm}^2$  می‌باشد. به طور کلی در ستون‌ها از مقاطع جعبه‌ای و در تیرها از مقاطع تیرورق استفاده شده‌است. در طراحی این ساختمان از روش تنش مجاز استفاده شده و محاسبات تحلیل و طراحی با استفاده از نرم افزار SAP2000 (نسخه 15.1.0) انجام شده است.



شکل ب-۱ پلان ساختمان مبنا



ب) مقاطع تیورق برای تیرها



الف) مقاطع جعبه‌ای برای ستون‌ها

شکل ب-۲ مقاطع معرفی شده برای اعضای قاب

### ب-۳- مشخصات دینامیکی سازه‌های مینا

با استناد بر استاندارد ۲۸۰۰ ایران، محاسبات مربوط به زمان تناوب سازه، ضریب زلزله و برش پایه استاتیکی ساختمان‌ها، به شرح ارائه شده در این بخش می‌باشد. لازم به ذکر است که در طراحی ساختمان مینا که براساس روش تحلیل طیفی انجام شده‌است، برش پایه دینامیکی با ۱۰۰ درصد برش پایه استاتیکی همپایه شده‌است و طیف طرح مربوط به خاک نوع II به عنوان طیف طرح ساختگاه در نرم‌افزار معرفی شده‌است.

### ب-۳-۱ ساختمان ۴ طبقه

الف) وزن برآورد شده سازه برای مشارکت در بار لرزه‌ای: ۱۸۰۹ تن

ب) زمان تناوب محاسباتی و آئین‌نامه‌ای

$$T_{experimental} = 0.08H^{3/4} = 0.08 \times 12.8^{3/4} = 0.541 s$$

$$T_{analytical} = 1.19 s$$

$$\Rightarrow use 1.25T_{experimental} = 0.676 s$$



ج) ضریب زلزله استاتیکی

$$B = (S + I)(T_S / T)^{2/3} = 2.04$$

$$C = \frac{ABI}{R} = \frac{0.3 \times 2.04 \times 1.0}{7} = 0.087$$

د) برش پایه استاتیکی

$$V = CW = 0.087 \times 1809 = 157.4 \text{ ton}$$

ه) محاسبات کنترل جابجائی: در این محاسبات لازم است ضریب زلزله براساس دوره تناوب واقعی سازه محاسبه شود.

$$C = \frac{ABI}{R} = \frac{0.3 \times 1.38 \times 1.0}{7} = 0.059$$

جدول ب-۱ کنترل جابجائی در دو راستای ساختمان ۴ طبقه مبنا

TABLE: Joint Displacements							
Story	OutputCase	U1	U2	Disp.	Disp.*0.7R	Allowable (=0.025H)	Condition
Text	Text	cm	cm	cm	cm	cm	
1	SPECX	0.64	0.00	0.64	3.15	8.00	OK
2	SPECX	1.63	0.00	0.99	4.85	8.00	OK
3	SPECX	2.67	0.00	1.04	5.09	8.00	OK
4	SPECX	3.46	0.00	0.79	3.88	8.00	OK

TABLE: Joint Displacements							
Story	OutputCase	U1	U2	Disp.	Disp.*0.7R	Allowable (=0.025H)	Condition
Text	Text	cm	cm	cm	cm	cm	
1	SPECY	0.00	0.64	0.64	3.15	8.00	OK
2	SPECY	0.00	1.63	0.99	4.85	8.00	OK
3	SPECY	0.00	2.67	1.04	5.09	8.00	OK
4	SPECY	0.00	3.46	0.79	3.88	8.00	OK



و) جدول مقاطع و وزن

وزن تمام شده اسکلت برای ساختمان مبنای ۴ طبقه تقریباً برابر با ۸۴ تن تخمین زده شده است. جزئیات این موارد در جدول (ب-۲) آمده است.

ب-۳-۲ ساختمان ۸ طبقه

الف) وزن برآورد شده سازه برای مشارکت در بار لرزه‌ای: ۳۶۵۰ تن

ب) زمان تناوب محاسباتی و آئین نامه‌ای

$$T_{\text{experimental}} = 0.08H^{3/4} = 0.08 \times 25.6^{3/4} = 0.910 \text{ s}$$

$$T_{\text{analytical}} = 1.85 \text{ s}$$

$$\Rightarrow \text{use } 1.25T_{\text{experimental}} = 1.138 \text{ s}$$

جدول ب-۲ وزن نهائی اسکلت ساختمان ۴ طبقه مبنا

Section Name	Number	Weight
BOX-250X10	26	6.27
BOX-300X10	32	9.32
BOX-300X15	42	18.04
PG220I	8	1.36
PG224III	12	3.39
PG230I	20	6.78
PG320I	8	1.81
PG324I	16	4.07
PG324III	56	17.40
PG330I	24	8.81
PG330II	16	7.01
		84.25

ج) ضریب زلزله استاتیکی

$$B = (S + I)(T_S / T)^{2/3} = 1.44$$



$$C = \frac{ABI}{R} = \frac{0.3 \times 1.44 \times 1.0}{7} = 0.062$$

(د) برش پایه استاتیکی

$$V = CW = 0.062 \times 3650 = 226.3 \text{ ton}$$

(هـ) محاسبات کنترل جابجائی: در این محاسبات لازم است ضریب زلزله براساس دوره تناوب واقعی سازه محاسبه شود.

$$C = \frac{ABI}{R} = \frac{0.3 \times 1.05 \times 1.0}{7} = 0.045$$

جدول ب-۳ کنترل جابجائی در دو راستای ساختمان ۸ طبقه مبنا

TABLE: Joint Displacements							
Story	OutputCase	U1	U2	Disp.	Disp.*0.7R	Allowable (=0.02H)	Condition
Text	Text	cm	cm	cm	cm	cm	
1	SPECX	0.48	0.00	0.48	2.34	6.40	OK
2	SPECX	1.34	0.00	0.86	4.20	6.40	OK
3	SPECX	2.24	0.00	0.90	4.41	6.40	OK
4	SPECX	3.10	0.00	0.87	4.26	6.40	OK
5	SPECX	4.08	0.00	0.97	4.78	6.40	OK
6	SPECX	5.03	0.00	0.95	4.66	6.40	OK
7	SPECX	6.03	0.00	1.00	4.88	6.40	OK
8	SPECX	6.79	0.00	0.77	3.75	6.40	OK

TABLE: Joint Displacements							
Story	OutputCase	U1	U2	Disp.	Disp.*0.7R	Allowable (=0.02H)	Condition
Text	Text	cm	cm	cm	cm	cm	
1	SPECY	0.00	0.48	0.48	2.34	6.40	OK
2	SPECY	0.00	1.34	0.86	4.21	6.40	OK
3	SPECY	0.00	2.24	0.90	4.42	6.40	OK
4	SPECY	0.00	3.11	0.87	4.26	6.40	OK
5	SPECY	0.00	4.08	0.97	4.78	6.40	OK
6	SPECY	0.00	5.03	0.94	4.63	6.40	OK
7	SPECY	0.00	6.02	0.99	4.85	6.40	OK
8	SPECY	0.00	6.78	0.76	3.75	6.40	OK





### و) جدول مقاطع و وزن

وزن تمام شده اسکلت برای ساختمان مبنای ۸ طبقه تقریباً برابر با ۲۰۰ تن تخمین زده شده است. جزئیات این موارد در جدول (ب-۴) آمده است.

جدول ب-۴ وزن نهائی اسکلت ساختمان ۸ طبقه مینا

Section Name	Number	Weight
BOX-250X10	30	7.23
BOX-300X10	32	9.32
BOX-300X15	54	23.19
BOX-400X15	75	43.51
BOX-400X20	9	6.87
PG220I	8	1.36
PG224III	24	6.78
PG230I	8	2.71
PG320I	8	1.81
PG324I	8	2.03
PG324II	12	3.32
PG324III	24	7.46
PG330I	26	9.55
PG330II	2	0.88
PG424I	40	12.43
PG424II	16	5.48
PG424III	44	14.92
PG430I	76	30.06
PG430II	16	6.93
PG430III	8	3.73
		199.56

### ب-۳-۳ ساختمان ۱۲ طبقه

الف) وزن برآورد شده سازه برای مشارکت در بار لرزه‌ای: ۵۵۳۱ تن

ب) زمان تناوب محاسباتی و آئین‌نامه‌ای

$$T_{\text{experimental}} = 0.08H^{3/4} = 0.08 \times 38.4^{3/4} = 1.234 \text{ s}$$

$$T_{\text{analytical}} = 2.47 \text{ s}$$

$$\Rightarrow \text{use } 1.25T_{\text{experimental}} = 1.543 \text{ s}$$



ج) ضریب زلزله استاتیکی

$$B = (S+1)(T_s/T)^{2/3} = 1.18$$

$$C = \frac{ABI}{R} = \frac{0.3 \times 1.18 \times 1.0}{7} = 0.051$$

د) برش پایه استاتیکی

$$V = CW = 0.051 \times 5531 = 282.1 \text{ ton}$$

ه) محاسبات کنترل جابجائی: در این محاسبات لازم است ضریب زلزله براساس دوره تناوب واقعی سازه محاسبه شود.

$$C = \frac{ABI}{R} = \frac{0.3 \times 0.86 \times 1.0}{7} = 0.037$$

جدول ب-۵ کنترل جابجائی در دو راستای ساختمان ۱۲ طبقه مبنا

TABLE: Joint Displacements							
Story	OutputCase	U1	U2	Disp.	Disp.*0.7R	Allowable (=0.02H)	Condition
Text	Text	cm	cm	cm	cm	cm	
1	SPECX	0.42	0.00	0.42	2.08	6.40	OK
2	SPECX	1.23	0.00	0.81	3.97	6.40	OK
3	SPECX	2.18	0.00	0.94	4.62	6.40	OK
4	SPECX	3.14	0.00	0.96	4.71	6.40	OK
5	SPECX	4.09	0.00	0.95	4.64	6.40	OK
6	SPECX	5.02	0.00	0.93	4.56	6.40	OK
7	SPECX	5.91	0.00	0.89	4.37	6.40	OK
8	SPECX	6.75	0.00	0.84	4.11	6.40	OK
9	SPECX	7.67	0.00	0.92	4.50	6.40	OK
10	SPECX	8.53	0.00	0.87	4.26	6.40	OK
11	SPECX	9.38	0.00	0.84	4.12	6.40	OK
12	SPECX	9.97	0.00	0.60	2.92	6.40	OK



TABLE: Joint Displacements							
Story	OutputCase	U1	U2	Disp.	Disp.*0.7R	Allowable (=0.02H)	Condition
Text	Text	cm	cm	cm	cm	cm	
1	SPECY	0.00	0.42	0.42	2.08	6.40	OK
2	SPECY	0.00	1.23	0.81	3.97	6.40	OK
3	SPECY	0.00	2.18	0.94	4.62	6.40	OK
4	SPECY	0.00	3.14	0.96	4.71	6.40	OK
5	SPECY	0.00	4.09	0.95	4.64	6.40	OK
6	SPECY	0.00	5.02	0.93	4.56	6.40	OK
7	SPECY	0.00	5.91	0.89	4.37	6.40	OK
8	SPECY	0.00	6.75	0.84	4.11	6.40	OK
9	SPECY	0.00	7.66	0.92	4.50	6.40	OK
10	SPECY	0.00	8.53	0.87	4.26	6.40	OK
11	SPECY	0.00	9.38	0.84	4.12	6.40	OK
12	SPECY	0.00	9.97	0.60	2.92	6.40	OK

و) جدول مقاطع و وزن

وزن تمام شده اسکلت برای ساختمان مبنای ۱۲ طبقه تقریباً برابر با ۳۵۲ تن تخمین زده شده است. جزئیات این موارد در جدول (ب-۶) آمده است.

#### ب-۴ مدل سازی ساختمان های مینا با استفاده از سیستم های استهلاک انرژی

به منظور ارزیابی میزان تاثیر وجود سیستم های استهلاک انرژی در ساختمان های مینا، از سه میراگر اصطکاکی، ویسکوالاستیک و ویسکوز استفاده شده است که در ادامه به بررسی آنها پرداخته می شود. در ابتدا جایابی این میراگرها در پلان ساختمان معرفی شده و سپس، ضوابط آئین نامه ای که برای مدلسازی و تحلیل ساختمان های دارای سیستم های استهلاک انرژی مورد نیاز است، ارائه خواهد شد. به طور کلی تلاش شده است تا نحوه سنجش کارایی میراگرها در گزارش حاضر بدین صورت سنجیده شود که میرایی مود غالب در محدوده ۲۰ تا ۳۰٪ باشد.

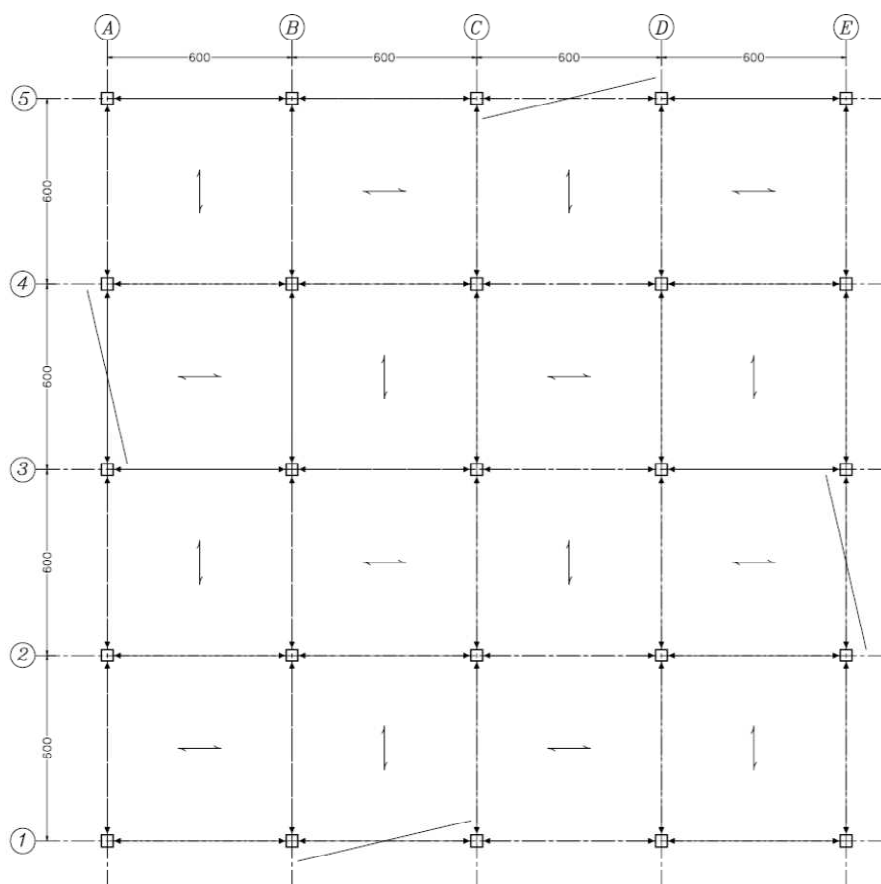


جدول ب-۶ وزن نهائی اسکلت ساختمان ۱۲ طبقه مینا

Section Name	Number	Weight
BOX-300X10	12	3.50
BOX-400X20	51	38.93
BOX-400X25	18	16.95
BOX-300X15	74	31.78
BOX-400X15	103	59.75
BOX-500X20	12	11.57
BOX-250X10	30	7.23
PG320I	48	10.85
PG324I	8	2.03
PG324II	12	3.32
PG324III	24	7.46
PG330I	24	8.81
PG330II	4	1.75
PG424I	40	12.43
PG424II	48	16.45
PG424III	36	12.20
PG430I	56	22.15
PG430II	36	15.59
PG430III	120	55.94
PG440II	24	12.66
		351.6

### ب-۴-۱ پلان

در تعیین موقعیت میراگرها، تلاش شده‌است تا از هرگونه ایجاد پیچش در ساختمان جلوگیری شود. به همین منظور میراگرها تنها در قابهای میانی و در هر دو راستا تعبیه شده است. نمای جایابی این میراگرها در پلان سازه در شکل (ب-۳) ارائه شده‌است.



شکل ب-۳ پلان ساختمان با جانمایی میراگرها

### ب-۴-۲ اصول مدلسازی و ضوابط آئین نامه‌ای

به منظور مدل سازی ساختمان با استفاده از میراگرها، توجه به موارد زیر ضروری است:

الف) با توجه به اینکه استفاده از میراگرها باعث تغییر در زمان تناوب سازه و رفتار مودال آن خواهد شد، لازم است در اولین گام، ضریب زلزله و ضریب B برای شرایط جدید براساس استاندارد ۲۸۰۰ ایران محاسبه شود.

ب) با استفاده از میراگرها، میزان میرائی سازه تغییر خواهد کرد که لازم است میرائی موثر سازه در هر ساختمان محاسبه شود. برای محاسبه میرائی موثر ساختمان با توجه به اینکه تحلیل خطی دینامیکی مورد توجه قرار گرفته است، استفاده از ضوابط بند ۲-۱۲-۴-۲ این گزارش الزامی است. بدین ترتیب، برای میراگرهای ویسکوز و میراگرهای ویسکوالاستیک، که دارای مشخصه میرائی هستند، با استفاده از رابطه (۲-۲)



۸۱) میرائی موثر قابل محاسبه خواهد بود. برای میراگرهای اصطکاکی نیز که مشخصه میرائی در آن‌ها وجود نداشته و تمرکز بیشتر بر روی سختی آنهاست، رابطه (۲-۷۳) قابل استفاده می‌باشد.

ج) طیف طرح پیشنهادی استاندارد ۲۸۰۰ ایران برای درصد میرائی ۵ درصد تعیین شده‌است. لذا لازم است این طیف برای درصد میرائی موثر ساختمان (بند ب) اصلاح شود. برای اصلاح این طیف، استفاده از ضریب

$B_1$  که در جدول

(۳-۲) معرفی شده است و یا بهره‌گیری از رابطه (ب-۱) توصیه می‌شود. به این ترتیب که طیف طرح متناظر

با

۵ درصد، باید بر عدد  $B_1$  تقسیم شود تا طیف برای میرائی موثر اصلاح گردد.

(ب-۱)  $B_1 = 4/[5/6 -$

$\ln(10\beta_{eff})]$

د) در انجام محاسبات کنترلی بر روی تغییر مکان نسبی طبقات، باید از طیف اصلاح شده بند ج) استفاده شود.

هـ) برش پایه دینامیکی باید براساس استاندارد ۲۸۰۰ ایران با ۹۰ درصد برش پایه استاتیکی همپایه شود.

و) براساس بند (۲-۳-۱) نیروی برش پایه دینامیکی که قرار است برای طراحی به کار رود، باید براساس

روابط (۲-۱) یا (۲-۲) هر کدام که حاکم باشد، کاهش داده شود. در ساختمان‌های مورد بررسی، این نیرو به

میزان ۲۵ درصد (به استناد رابطه (۲-۲)) کاهش داده می‌شود.

### ب-۴-۳ مشخصات میراگرهای استفاده شده

#### ب-۴-۳-۱ میراگر اصطکاکی

با توجه به اینکه مشخصه سختی به عنوان پارامتر مشخصه این میراگرها موجود بوده و تعریف سختی‌های

متفاوت بعضاً ممکن نمی‌باشد، لذا در مدل‌سازی ساختمان‌های حاضر با استفاده از میراگرهای اصطکاکی، از



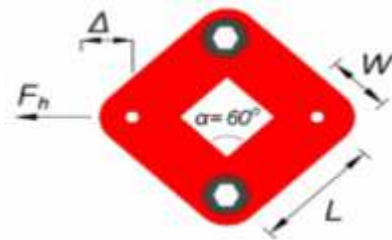
مشخصات یک نمونه میراگر اصطکاکی موجود در سابقه تولیدات شرکت damptech (شکل‌های (ب-۴) و (ب-۵)) استفاده می‌شود. این میراگر که در شکل (ب-۶) نشان داده شده است، از یک سری صفحات صلب که در مفاصل دورانی به یکدیگر متصل شده‌اند، تشکیل شده است. با اعمال نیرو و اصطکاک ناشی از دوران مفاصل، انرژی ورودی زلزله مستهلک می‌گردد.



شکل ب-۴ نمونه ای از میراگرهای شرکت Damptech



شکل ب-۵ میراگر اصطکاکی ۴ مفصله با ظرفیت ۲۲۵۰ کیلونیوتن



شکل ب-۶ میراگر مورد استفاده در پروژه



خصوصیات میراگر با توجه میرایی مورد نیاز و کاتالوگ‌های موجود انتخاب گردید که در جدول (ب-۷) ارائه شده است.

جدول ب-۷ مشخصات میراگرهای اصطکاکی به کار رفته در ساختمان‌های مینا

تعداد طبقات	ظرفیت (kN)	جابجایی (mm)	سختی (N/m)
۴	۳۰۰	۵۰	۶۰۰۰۰۰
۸	۳۰۰	۵۰	۶۰۰۰۰۰
۱۲	۲۲۵	۵۰	۴۵۰۰۰۰۰

#### ب-۴-۳-۲ میراگر ویسکوالاستیک

میراگرهای ویسکوالاستیک در رده سیستم‌های استهلاک انرژی وابسته به تغییر مکان و سرعت دسته‌بندی می‌شوند. این میراگرها ضمن داشتن مشخصه سختی، دارای مشخصه میرایی نیز هستند که اغلب به نوع مصالح به کار رفته در این ادوات وابسته است. در مدل‌سازی ساختمان‌های مینا با در نظر گرفتن میراگرهای ویسکوالاستیک به عنوان سیستم مستهلک کننده انرژی، از مشخصات برخی میراگرهای معرفی شده در سابقه تحقیقات و مطالعات آزمایشگاهی استفاده شده است که این موارد به طور خلاصه در جدول (ب-۸) ارائه شده‌است. بدیهی است در ساختمان‌های کم مرتبه که میزان نیروی برشی بوجود آمده در سازه تحت اثر زلزله کم است، انتخاب میراگرهای با سختی و میرایی کم، مقرون به صرفه‌تر و دارای توجیه اقتصادی بیشتری خواهد بود.

جدول ب-۸ مشخصات میراگرهای ویسکوالاستیک به کار رفته در ساختمان‌های مینا

تعداد طبقات	میرایی (kN.s/mm)	سختی (kN/mm)
۴	۳/۲	۲۸
۸	۵/۴	۵۵/۸
۱۲	۸/۴	۵۵/۸





### ب-۴-۴-۳ میراگر ویسکوز

با توجه به اینکه معیار سختی در مشخصات میراگر ویسکوز دیده نشده است و تنها مشخصه این میراگر، میزان میرائی آن است، لذا طراحی ساختمان با میراگر ویسکوز با هدف دستیابی به میرائی موثر ۲۰ درصد برای کل سازه انجام شده و تلاش شده است تا مقدار میرائی مناسب برای میراگرها، براساس روش مهندسی معکوس محاسبه شود. به همین دلیل، مقدار میرائی از ابتدا به عنوان ورودی تعریف نشده و براساس تحلیل مودال ساختمان، محاسبه می‌شود.

### ب-۵ ارزیابی رفتار ساختمان‌های دارای میراگر اصطکاکی

#### ب-۵-۱ محاسبات میرائی موثر

با توجه به رابطه (۲-۷۳)، محاسبات مربوط به تعیین میرائی موثر، پس از انجام تکرارهای مختلف بر روی محاسبات سازه و بر روی وضعیت نهائی سازه انجام شده است که خلاصه نتایج آن به شرح جدول (ب-۹) است.

جدول ب-۹ میرائی موثر ساختمان‌های دارای میراگر اصطکاکی

تعداد طبقات	میرائی موثر محاسباتی	میرائی ذاتی سازه
۴	۰/۲۱	۰/۰۵
۸	۰/۲۵	۰/۰۵
۱۲	۰/۲۲	۰/۰۵

ریز محاسبات مربوط به استفاده از رابطه (۲-۷۳) در جداول (ب-۱۰) تا (ب-۱۲) ارائه شده است.



جدول ب-۱۰ محاسبات میرائی موثر در ساختمان ۴ طبقه با میراگر اصطکاکی

Story	$\delta m_i$ Displacement (m)	$F m_i$ Force (kg)	Work of Forces on Story=0.5FD	Drift	$\delta m_{rj}$ Relative Displacement	$\delta m_{rj}^2$
4	0.003479	18816.17	32.73072772	0.000911	0.001032	1.07E-06
3	0.002568	14128.05	18.1404162	0.001006	0.00114	1.3E-06
2	0.001562	8598.57	6.71548317	0.000931	0.001055	1.11E-06
1	0.000631	3476.13	1.096719015	0.000631	0.000715	5.11E-07
0	0	0	0	0	0	0
$0.5 \times \sum F m_i \times \delta m_i$			58.6833461	$\sum \delta m_{rj}^2$		3.99E-06
$4\pi \times (0.5 \times \sum (F m_i \times \delta m_i))$			<b>737.436676</b>	$(1/2K) \times \sum (\delta m_{rj}^2)$		<b>119.7129</b>

جدول ب-۱۱ محاسبات میرائی موثر در ساختمان ۸ طبقه با میراگر اصطکاکی

Story	$\delta m_i$ Displacement (m)	$F m_i$ Force (kg)	Work of Forces on Story=0.5FD	Drift	$\delta m_{rj}$ Relative Displacement	$\delta m_{rj}^2$
8	0.002777	3978.68	5.52439718	0.000394	0.000446523	1.99383E-07
7	0.002383	3483.49	4.150578335	0.000423	0.000479389	2.29814E-07
6	0.00196	2886.01	2.8282898	0.000415	0.000470322	2.21203E-07
5	0.001545	2283.79	1.764227775	0.000406	0.000460123	2.11713E-07
4	0.001139	1693.35	0.964362825	0.000365	0.000413657	1.71112E-07
3	0.000774	1158.32	0.44826984	0.000331	0.000375125	1.40719E-07
2	0.000443	663.25	0.146909875	0.000277	0.000313926	9.85496E-08
1	0.000166	248.9	0.0206587	0.000166	0.000188129	3.53925E-08
0	0	0	0	0	0	0
$0.5 \times \sum F m_i \times \delta m_i$			15.84769433	$\sum \delta m_{rj}^2$		1.30789E-06
$4\pi \times (0.5 \times \sum (F m_i \times \delta m_i))$			<b>199.1480003</b>	$(1/2K) \times \sum (\delta m_{rj}^2)$		



جدول ب-۱۲ محاسبات میرائی موثر در ساختمان ۱۲ طبقه با میراگر اصطکاکی

Story	$\delta_{mi}$	$F_{mi}$	Work of Forces on Story=0.5FD	Drift	$\delta_{mrj}$	$\delta_{mrj}^2$
	Displacement (m)	Force (kg)			Relative Displacement	
12	0.002315	1342.49	1.553932	0.00021	0.000238	5.66E-08
11	0.002105	1252.75	1.318519	0.000229	0.00026	6.74E-08
10	0.001876	1123.03	1.053402	0.00023	0.000261	6.79E-08
9	0.001646	988.69	0.813692	0.000233	0.000264	6.97E-08
8	0.001413	852.85	0.602539	0.000224	0.000254	6.44E-08
7	0.001189	720.72	0.428468	0.000224	0.000254	6.44E-08
6	0.000965	586.15	0.282817	0.000217	0.000246	6.05E-08
5	0.000748	456.15	0.1706	0.000202	0.000229	5.24E-08
4	0.000546	334.54	0.091329	0.000182	0.000206	4.25E-08
3	0.000364	224.11	0.040788	0.000158	0.000179	3.21E-08
2	0.000206	127.06	0.013087	0.00013	0.000147	2.17E-08
1	0.000076	46.82	0.001779	0.000076	8.61E-05	7.42E-09
0	0	0	0	0	0	0
$0.5 \times \sum F_{mi} \times \delta_{mi}$			6.370953	$\sum \delta_{mrj}^2$		6.07E-07
$4\pi \times (0.5 \times \sum (F_{mi} \times \delta_{mi}))$			<b>80.05976</b>	$(1/2K) \times \sum (\delta_{mrj}^2)$		<b>13.6615</b> 2

ب-۵-۲ کنترل تغییر مکان

براساس آخرین وضعیت طراحی شده برای ساختمان و با توجه به طرح لرزه‌ای براساس طیف دینامیکی اصلاح شده نهائی، جابجائی‌های نسبی بوجود آمده در ساختمان‌های مبنا که با استفاده از میراگرهای اصطکاکی مجدداً طراحی شده‌اند، به شرح مندرج در جداول (ب-۱۳) تا (ب-۱۵) می‌باشد.

جدول ب-۱۳ کنترل جابجائی در دو راستای ساختمان ۴ طبقه با میراگر اصطکاکی

Drift Control							
Story	OutputCase	U1 (cm)	U2 (cm)	Delta (cm)	Delta*0.7R	Allowable (=0.025H)	Condition
4	SPECX	0.834972	0.027966	0.218767	1.0719583	8	O.K.
3	SPECX	0.616205	0.020754	0.239965	1.1758285	8	O.K.
2	SPECX	0.37624	0.012747	0.222542	1.0904558	8	O.K.
1	SPECX	0.153698	0.005228	0.153698	0.7531202	8	O.K.



Drift Control							
Story	OutputCase	U1 (cm)	U2 (cm)	Delta (cm)	Delta*0.7R	Allowable (=0.025H)	Condition
4	SPECY	0.028161	0.814179	0.209834	1.0281866	8	O.K.
3	SPECY	0.020786	0.604345	0.2327	1.14023	8	O.K.
2	SPECY	0.012641	0.371645	0.218394	1.0701306	8	O.K.
1	SPECY	0.00511	0.153251	0.153251	0.7509299	8	O.K.

جدول ب-۱۴ کنترل جابجایی در دو راستای ساختمان ۸ طبقه با میراگر اصطکاکی

Drift Control							
Story	OutputCase	U1 (cm)	U2 (cm)	Delta (cm)	Delta*0.7R	Allowable (=0.020H)	Condition
8	SPECX	2.067358	0.00263	0.29237	1.432613	6.4	O.K.
7	SPECX	1.774988	0.001368	0.310665	1.5222585	6.4	O.K.
6	SPECX	1.464323	0.000607	0.306142	1.5000958	6.4	O.K.
5	SPECX	1.158181	0.000598	0.297546	1.4579754	6.4	O.K.
4	SPECX	0.860635	0.000948	0.273251	1.3389299	6.4	O.K.
3	SPECX	0.587384	0.001011	0.243427	1.1927923	6.4	O.K.
2	SPECX	0.343957	0.000913	0.210732	1.0325868	6.4	O.K.
1	SPECX	0.133225	0.000519	0.133225	0.6528025	6.4	O.K.

Drift Control							
Story	OutputCase	U1 (cm)	U2 (cm)	Delta (cm)	Delta*0.7R	Allowable (=0.020H)	Condition
8	SPECY	0.002537	2.047577	0.283342	1.3883758	6.4	O.K.
7	SPECY	0.001258	1.764235	0.301882	1.4792218	6.4	O.K.
6	SPECY	0.000528	1.462353	0.299231	1.4662319	6.4	O.K.
5	SPECY	0.000668	1.163122	0.295851	1.4496699	6.4	O.K.
4	SPECY	0.000911	0.867271	0.275557	1.3502293	6.4	O.K.
3	SPECY	0.000973	0.591714	0.245412	1.2025188	6.4	O.K.
2	SPECY	0.000888	0.346302	0.212236	1.0399564	6.4	O.K.
1	SPECY	0.000507	0.134066	0.134066	0.6569234	6.4	O.K.



جدول ب-۱۵ کنترل جابجائی در دو راستای ساختمان ۱۲ طبقه با میراگر اصطکاکی

Drifte Control							
Story	OutputCase	U1 (cm)	U2 (cm)	Delta (cm)	Delta*0.7R	Allowable (=0.020H)	Condition
12	SPECX	4.408681	0.008456	0.388061	1.9014989	6.4	O.K.
11	SPECX	4.02062	0.006074	0.419617	2.0561233	6.4	O.K.
10	SPECX	3.601003	0.004244	0.43027	2.108323	6.4	O.K.
9	SPECX	3.170733	0.003194	0.436168	2.1372232	6.4	O.K.
8	SPECX	2.734565	0.002843	0.430408	2.1089992	6.4	O.K.
7	SPECX	2.304157	0.002943	0.420743	2.0616407	6.4	O.K.
6	SPECX	1.883414	0.00301	0.403949	1.9793501	6.4	O.K.
5	SPECX	1.479465	0.00311	0.381998	1.8717902	6.4	O.K.
4	SPECX	1.097467	0.002871	0.353471	1.7320079	6.4	O.K.
3	SPECX	0.743996	0.002495	0.318594	1.5611106	6.4	O.K.
2	SPECX	0.425402	0.001815	0.271747	1.3315603	6.4	O.K.
1	SPECX	0.153655	0.000832	0.153655	0.7529095	6.4	O.K.
Drift Control							
Story	OutputCase	U1 (cm)	U2 (cm)	Delta (cm)	Delta*0.7R	Allowable (=0.020H)	Condition
12	SPECY	0.009164	4.415842	0.391655	1.9191095	6.4	O.K.
11	SPECY	0.006666	4.024187	0.422871	2.0720679	6.4	O.K.
10	SPECY	0.004681	3.601316	0.433052	2.1219548	6.4	O.K.
9	SPECY	0.003323	3.168264	0.4382	2.14718	6.4	O.K.
8	SPECY	0.002788	2.730064	0.430422	2.1090678	6.4	O.K.
7	SPECY	0.002883	2.299642	0.420068	2.0583332	6.4	O.K.
6	SPECY	0.003028	1.879574	0.403242	1.9758858	6.4	O.K.
5	SPECY	0.003118	1.476332	0.381516	1.8694284	6.4	O.K.
4	SPECY	0.002927	1.094816	0.352815	1.7287935	6.4	O.K.
3	SPECY	0.00254	0.742001	0.317822	1.5573278	6.4	O.K.
2	SPECY	0.001856	0.424179	0.271	1.3279	6.4	O.K.
1	SPECY	0.000847	0.153179	0.153179	0.7505771	6.4	O.K.



## ب-۶ ارزیابی رفتار ساختمان‌های دارای میراگر ویسکوالاستیک

### ب-۶-۱ محاسبات میرائی موثر:

با توجه به رابطه (۲-۸۱)، محاسبات مربوط به تعیین میرائی موثر، پس از انجام تکرارهای مختلف بر روی محاسبات سازه و بر روی وضعیت نهائی سازه طراحی شده، انجام شده‌است که خلاصه نتایج آن به شرح جدول (ب-۱۶) است. ریز محاسبات مربوط به استفاده از رابطه (۲-۸۱) در جداول (ب-۱۷) تا (ب-۱۹) ارائه شده‌است.

جدول ب-۱۶ میرائی موثر ساختمان‌های دارای میراگر ویسکوالاستیک

تعداد طبقات	میرائی موثر محاسباتی	میرائی ذاتی سازه
۴	۰/۲۹	۰/۰۵
۸	۰/۲۷	۰/۰۵
۱۲	۰/۲۸	۰/۰۵

جدول ب-۱۷ محاسبات میرائی موثر در ساختمان ۴ طبقه با میراگر ویسکوالاستیک

Story	$\delta_{mi}$	$F_{mi}$	Work of Forces on Story 0.5FD	Drift	$\delta_{mrj}$	$\delta_{mrj}^2$
	Displacement (mm)	Force (kN)			Relative Displacement	
0	0	0	0	0	0	0
1	0.741278	10.277	3.809057003	0.741278	0.84009562	0.70576065
2	1.808097	25.048	22.64460683	1.066819	1.209033546	1.461762115
3	2.723872	37.708	51.35588269	0.915775	1.037854309	1.077141566
4	3.295189	44.841	73.87978497	0.571317	0.647477612	0.419227258
$0.5 \times \sum F_{mi} \times \delta_{mi}$			151.6893315	$\sum \delta_{mrj}^2$		3.663891589
$4\pi \times (0.5 \times \sum (F_{mi} \times \delta_{mi}))$			<b>1906.184358</b>	$(2\pi^2/T_m) \times \sum (\delta_{mrj}^2)$		<b>72.08659793</b>



جدول ب-۱۸ محاسبات میرائی موثر در ساختمان ۸ طبقه با میراگر ویسکوالاستیک

Story	$\delta_{mi}$	$F_{mi}$	Work of Forces on Story=0.5FD	Drift	$\delta_{mrj}$	$\delta_{mrj}^2$
	Displacement (mm)	Force (kN)			Relative Displacement	
0	0	0	0	0	0	0
1	-0.194939	-0.972	0.094740354	-0.194939	-0.220925753	0.048808188
2	-0.552661	-2.755	0.761290528	-0.357722	-0.405408882	0.164356362
3	-0.948253	-4.71	2.233135815	-0.395592	-0.448327222	0.200997298
4	-1.351592	-6.677	4.512289892	-0.403339	-0.457106952	0.208946766
5	-1.724457	-8.478	7.309973223	-0.372865	-0.422570551	0.178565871
6	-2.060249	-10.103	10.40734782	-0.335792	-0.380555457	0.144822456
7	-2.322278	-11.388	13.22305093	-0.262029	-0.296959326	0.088184841
8	-2.507258	-12.105	15.17517905	-0.18498	-0.209639147	0.043948572
$0.5 \times \sum F_{mi} \times \delta_{mi}$			53.71700761	$\sum \delta_{mrj}^2$		1.078630354
$4\pi \times (0.5 \times \sum (F_{mi} \times \delta_{mi}))$			<b>675.0278259</b>	$(2\pi^2/T_m) \times \sum (\delta_{mrj}^2)$		<b>14.08155408</b>

جدول ب-۱۹ محاسبات میرائی موثر در ساختمان ۱۲ طبقه با میراگر ویسکوالاستیک

Story	$\delta_{mi}$	$F_{mi}$	Work of Forces on Story=0.5FD	Drift	$\delta_{mrj}$	$\delta_{mrj}^2$
	Displacement (mm)	Force (kN)			Relative Displacement	
0	0	0	0	0	0	0
1	-0.08176	-0.215	0.0087892	-0.08176	-0.092659188	0.008585725
2	-0.246029	-0.647	0.079590381	-0.164269	-0.186167224	0.034658235
3	-0.439759	-1.154	0.253740943	-0.19373	-0.219555584	0.048204655
4	-0.645065	-1.687	0.544112327	-0.205306	-0.232674747	0.054137538
5	-0.855347	-2.22	0.94943517	-0.210282	-0.238314083	0.056793602
6	-1.070374	-2.756	1.474975372	-0.215027	-0.243691626	0.059385608
7	-1.291106	-3.307	2.134843771	-0.220732	-0.250157143	0.062578596
8	-1.50343	-3.83	2.87906845	-0.212324	-0.240628296	0.057901977
9	-1.702301	-4.316	3.673565558	-0.198871	-0.225381916	0.050797008
10	-1.882156	-4.761	4.480472358	-0.179855	-0.203830948	0.041547055
11	-2.022736	-5.12	5.17820416	-0.14058	-0.159320312	0.025382962
12	-2.123911	-5.272	5.598629396	-0.101175	-0.114662346	0.013147454
$0.5 \times \sum F_{mi} \times \delta_{mi}$			27.25542709	$\sum \delta_{mrj}^2$		0.513120416
$4\pi \times (0.5 \times \sum (F_{mi} \times \delta_{mi}))$			<b>342.501798</b>	$(2\pi^2/T_m) \times \sum (\delta_{mrj}^2)$		<b>4.752083619</b>

**ب-۶-۲ کنترل تغییر مکان**

بر اساس آخرین وضعیت طراحی شده برای ساختمان و با توجه به طرح لرزه‌ای براساس طیف دینامیکی اصلاح شده نهائی، جابجائی‌های نسبی بوجود آمده در ساختمان‌های مبنا که با استفاده از میراگرهای اصطکاکی مجدداً طراحی شده‌اند، به شرح مندرج در جداول (ب-۲۰) تا (ب-۲۲) می‌باشد.

**جدول ب-۲۰ کنترل جابجائی در دو راستای ساختمان ۴ طبقه با میراگر ویسکوالاستیک**

Drifte Control							
Story	OutputCase	U1 (cm)	U2 (cm)	Delta (cm)	Delta*0.7 R	Allowable (=0.025H)	Condition
4	SPECX	2.288459	0.001019	0.351553	1.7226097	8	O.K.
3	SPECX	1.936906	0.000072	0.595508	2.9179892	8	O.K.
2	SPECX	1.341398	0.00053	0.761631	3.7319919	8	O.K.
1	SPECX	0.579767	0.0004	0.579767	2.8408583	8	O.K.
Drift Control							
Story	OutputCase	U1 (cm)	U2 (cm)	Delta (cm)	Delta*0.7 R	Allowable (=0.025H)	Condition
4	SPECY	0.001019	2.288459	0.351553	1.7226097	8	O.K.
3	SPECY	0.000072	1.936906	0.595508	2.9179892	8	O.K.
2	SPECY	0.00053	1.341398	0.761631	3.7319919	8	O.K.
1	SPECY	0.0004	0.579767	0.579767	2.8408583	8	O.K.





جدول ب-۲۱ کنترل جابجائی در دو راستای ساختمان ۸ طبقه با میراگر ویسکوالاستیک

Drifte Control							
Story	OutputCase	U1 (cm)	U2 (cm)	Delta (cm)	Delta*0.7R	Allowable (=0.020H)	Condition
8	SPECX	4.232514	0.003216	0.274166	1.3434134	6.4	O.K.
7	SPECX	3.958348	0.001442	0.389907	1.9105443	6.4	O.K.
6	SPECX	3.568441	0.00015	0.505234	2.4756466	6.4	O.K.
5	SPECX	3.063207	0.00087	0.575325	2.8190925	6.4	O.K.
4	SPECX	2.487882	0.001388	0.662307	3.2453043	6.4	O.K.
3	SPECX	1.825575	0.001403	0.713883	3.4980267	6.4	O.K.
2	SPECX	1.111692	0.00108	0.705844	3.4586356	6.4	O.K.
1	SPECX	0.405848	0.000476	0.405848	1.9886552	6.4	O.K.

Drift Control							
Story	OutputCase	U1 (cm)	U2 (cm)	Delta (cm)	Delta*0.7R	Allowable (=0.020H)	Condition
8	SPECY	0.003471	4.266774	0.279647	1.3702703	6.4	O.K.
7	SPECY	0.001686	3.987127	0.395953	1.9401697	6.4	O.K.
6	SPECY	0.00031	3.591174	0.511403	2.5058747	6.4	O.K.
5	SPECY	0.000627	3.079771	0.580641	2.8451409	6.4	O.K.
4	SPECY	0.001195	2.49913	0.667378	3.2701522	6.4	O.K.
3	SPECY	0.001354	1.831752	0.719002	3.5231098	6.4	O.K.
2	SPECY	0.001084	1.11275	0.706515	3.4619235	6.4	O.K.
1	SPECY	0.000482	0.406235	0.406235	1.9905515	6.4	O.K.



جدول ب-۲۲ کنترل جابجائی در دو راستای ساختمان ۱۲ طبقه با میراگر ویسکوالاستیک

Drifte Control							
Story	OutputCase	U1 (cm)	U2 (cm)	Delta (cm)	Delta*0.7R	Allowable (=0.020H)	Condition
12	SPECX	7.48031	0.00035	0.3279	1.60671	6.4	O.K.
11	SPECX	7.15241	0.000373	0.452828	2.2188572	6.4	O.K.
10	SPECX	6.699582	0.000361	0.579197	2.8380653	6.4	O.K.
9	SPECX	6.120385	0.000288	0.640644	3.1391556	6.4	O.K.
8	SPECX	5.479741	0.000237	0.684798	3.3555102	6.4	O.K.
7	SPECX	4.794943	0.000203	0.720865	3.5322385	6.4	O.K.
6	SPECX	4.074078	0.000175	0.722775	3.5415975	6.4	O.K.
5	SPECX	3.351303	0.000165	0.740535	3.6286215	6.4	O.K.
4	SPECX	2.610768	0.00014	0.772501	3.7852549	6.4	O.K.
3	SPECX	1.838267	0.00009	0.781396	3.8288404	6.4	O.K.
2	SPECX	1.056871	0.000047	0.698766	3.4239534	6.4	O.K.
1	SPECX	0.358105	0.000014	0.358105	1.7547145	6.4	O.K.

Drift Control							
Story	OutputCase	U1 (cm)	U2 (cm)	Delta (cm)	Delta*0.7R	Allowable (=0.020H)	Condition
12	SPECY	0.000642	7.479316	0.328518	1.6097382	6.4	O.K.
11	SPECY	0.000436	7.150798	0.45303	2.219847	6.4	O.K.
10	SPECY	0.000332	6.697768	0.578399	2.8341551	6.4	O.K.
9	SPECY	0.000302	6.119369	0.640576	3.1388224	6.4	O.K.
8	SPECY	0.000282	5.478793	0.684672	3.3548928	6.4	O.K.
7	SPECY	0.000227	4.794121	0.720767	3.5317583	6.4	O.K.
6	SPECY	0.000171	4.073354	0.722558	3.5405342	6.4	O.K.
5	SPECY	0.000161	3.350796	0.739779	3.6249171	6.4	O.K.
4	SPECY	0.000168	2.611017	0.771854	3.7820846	6.4	O.K.
3	SPECY	0.000153	1.839163	0.781611	3.8298939	6.4	O.K.
2	SPECY	0.000061	1.057552	0.699368	3.4269032	6.4	O.K.
1	SPECY	0.000021	0.358184	0.358184	1.7551016	6.4	O.K.



## ب-۷ ارزیابی رفتار ساختمان‌های دارای میراگر ویسکوز

### ب-۷-۱ محاسبات میرائی موثر

با توجه به رابطه (۲-۷۳)، محاسبات مربوط به تعیین میرائی موثر، پس از انجام تکرارهای مختلف بر روی محاسبات سازه و بر روی وضعیت نهائی سازه طراحی شده، انجام شده‌است که خلاصه نتایج آن به شرح جدول (ب-۲۳) است. ریز محاسبات مربوط به استفاده از رابطه (۲-۷۳) در جداول (ب-۲۴) تا (ب-۲۶) ارائه شده‌است. همانطور که پیشتر ذکر شد، در مدلسازی ساختمان‌های دارای میراگر ویسکوز، فرض بر این است که میرائی موثر سازه به ۲۰ درصد محدود شود، و با این فرض، میزان میرائی ای که باید توسط میراگرها تامین شود، محاسبه شده‌است.

جدول ب-۲۳ میرائی موثر ساختمان‌های دارای میراگر ویسکوز

تعداد طبقات	میرائی موثر محاسباتی	میرائی ذاتی سازه	میرائی مورد نیاز برای میراگرها (kN.s/m)
۴	۰/۲۰	۰/۰۵	$C = 2145.82 \text{ KN.s/m}$
۸	۰/۲۰	۰/۰۵	$C = 4129.49 \text{ KN.s/m}$
۱۲	۰/۲۰	۰/۰۵	$C = 7874.83 \text{ KN.s/m}$

جدول ب-۲۴ محاسبات میرائی موثر در ساختمان ۴ طبقه با میراگر ویسکوز

طبقات	جرم لرزه ای مود اول (kg.sec <sup>2</sup> /m)	شکل مودی مود اول	دریفت مودی مود اول	پریود مود اول (s)	cosθ	m*φ <sup>2</sup>	(φ <sub>r</sub> *cosθ) <sup>2</sup>
اول	34,970	0.174	0.174	1.37	0.882	1,062.635	0.024
دوم	34,949	0.458	0.284			7,341.228	0.063
سوم	34,735	0.765	0.307			20,350.391	0.073
چهارم	34,428	1.000	0.235			34,427.550	0.043
					Σ	63,181.804	0.203



جدول ب-۲۵ محاسبات میرائی موثر در ساختمان ۸ طبقه با میراگر ویسکوز

طبقات	جرم لرزه ای مود اول (kg.sec <sup>2</sup> /m)	شکل مودی مود اول	دریفت مودی مود اول	پریود مود اول (s)	COSθ	m*φ <sup>2</sup>	(φ <sub>r</sub> *cosθ) <sup>2</sup>
اول	33,925	0.057	0.057	2.27	0.882	108.859	0.002
دوم	33,925	0.164	0.107			907.106	0.009
سوم	33,839	0.302	0.138			3,080.870	0.015
چهارم	33,744	0.455	0.153			6,976.015	0.018
پنجم	33,487	0.620	0.165			12,860.517	0.021
ششم	33,304	0.772	0.152			19,843.565	0.018
هفتم	33,198	0.906	0.134			27,270.966	0.014
هشتم	32,918	1.000	0.094			32,917.768	0.007
Σ						103,965.666	0.105

جدول ب-۲۶ محاسبات میرائی موثر در ساختمان ۱۲ طبقه با میراگر ویسکوز

طبقات	جرم لرزه ای مود اول (kg.sec <sup>2</sup> /m)	شکل مودی مود اول	دریفت مودی مود اول	پریود مود اول (s)	COSθ	m*φ <sup>2</sup>	(φ <sub>r</sub> *cosθ) <sup>2</sup>
اول	35,664	0.042	0.042	2.89	0.882	63.650	0.001
دوم	35,664	0.125	0.083			558.440	0.005
سوم	35,582	0.221	0.096			1,743.989	0.007
چهارم	35,413	0.320	0.099			3,633.531	0.008
پنجم	35,254	0.420	0.099			6,212.474	0.008
ششم	35,119	0.518	0.098			9,410.313	0.007
هفتم	35,119	0.610	0.092			13,051.579	0.007
هشتم	35,075	0.694	0.084			16,899.153	0.006
نهم	34,782	0.778	0.084			21,056.982	0.005
دهم	34,516	0.865	0.087			25,839.919	0.006
یازدهم	34,386	0.948	0.082			30,875.910	0.005
دوازدهم	33,991	1.000	0.052			33,990.893	0.002
Σ						163,336.833	0.068

### ب-۷-۲ کنترل تغییر مکان

براساس آخرین وضعیت طراحی شده برای ساختمان و با توجه به طرح لرزه‌ای براساس طیف دینامیکی اصلاح شده نهائی، جابجائی‌های نسبی بوجود آمده در ساختمان‌های مینا که با استفاده از میراگرهای اصطکاکی مجدداً طراحی شده‌اند، به شرح مندرج در جداول (ب-۲۷) تا (ب-۲۹) می‌باشد.



جدول ب-۲۷ کنترل جابجائی در دو راستای ساختمان ۴ طبقه با میراگر ویسکوز

TABLE: Joint Displacements							
Story	OutputCase	U1	U2	Disp.	Disp.*0.7R	Allowable (=0.025H)	Condition
Text	Text	cm	cm	cm	cm	cm	
1	SPECX	0.42	0.04	0.42	2.07	8.00	OK
2	SPECX	1.06	0.10	0.64	3.13	8.00	OK
3	SPECX	1.68	0.17	0.62	3.06	8.00	OK
4	SPECX	2.13	0.23	0.44	2.17	8.00	OK

TABLE: Joint Displacements							
Story	OutputCase	U1	U2	Disp.	Disp.*0.7R	Allowable (=0.025H)	Condition
Text	Text	cm	cm	cm	cm	cm	
1	SPECY	0.04	0.42	0.42	2.07	8.00	OK
2	SPECY	0.10	1.06	0.64	3.13	8.00	OK
3	SPECY	0.17	1.68	0.62	3.06	8.00	OK
4	SPECY	0.23	2.13	0.44	2.17	8.00	OK

جدول ب-۲۸ کنترل جابجائی در دو راستای ساختمان ۸ طبقه با میراگر ویسکوز

TABLE: Joint Displacements							
Story	OutputCase	U1	U2	Disp.	Disp.*0.7R	Allowable (=0.02H)	Condition
Text	Text	cm	cm	cm	cm	cm	
1	SPECX	0.30	0.00	0.30	1.47	6.40	OK
2	SPECX	0.85	0.01	0.55	2.67	6.40	OK
3	SPECX	1.51	0.01	0.66	3.23	6.40	OK
4	SPECX	2.18	0.02	0.68	3.32	6.40	OK
5	SPECX	2.87	0.02	0.68	3.35	6.40	OK
6	SPECX	3.47	0.03	0.60	2.94	6.40	OK
7	SPECX	3.98	0.04	0.51	2.50	6.40	OK
8	SPECX	4.32	0.04	0.34	1.69	6.40	OK



TABLE: Joint Displacements							
Story	OutputCase	U1	U2	Disp.	Disp. *0.7R	Allowable (=0.02H)	Condition
Text	Text	cm	cm	cm	cm	cm	
1	SPECY	0.00	0.30	0.30	1.47	6.40	OK
2	SPECY	0.01	0.85	0.55	2.67	6.40	OK
3	SPECY	0.01	1.51	0.66	3.23	6.40	OK
4	SPECY	0.02	2.18	0.68	3.32	6.40	OK
5	SPECY	0.02	2.87	0.68	3.35	6.40	OK
6	SPECY	0.03	3.47	0.60	2.94	6.40	OK
7	SPECY	0.04	3.98	0.51	2.50	6.40	OK
8	SPECY	0.04	4.32	0.34	1.69	6.40	OK

جدول ب-۲۹ کنترل جابجائی در دو راستای ساختمان ۱۲ طبقه با میراگر ویسکوز

TABLE: Joint Displacements							
Story	OutputCase	U1	U2	Disp.	Disp. *0.7R	Allowable (=0.02H)	Condition
Text	Text	cm	cm	cm	cm	cm	
1	SPECX	0.31	0.00	0.31	1.52	6.40	OK
2	SPECX	0.90	0.01	0.59	2.91	6.40	OK
3	SPECX	1.57	0.01	0.66	3.25	6.40	OK
4	SPECX	2.23	0.01	0.66	3.22	6.40	OK
5	SPECX	2.85	0.02	0.62	3.05	6.40	OK
6	SPECX	3.43	0.02	0.58	2.86	6.40	OK
7	SPECX	3.96	0.03	0.53	2.59	6.40	OK
8	SPECX	4.43	0.03	0.47	2.31	6.40	OK
9	SPECX	4.89	0.04	0.46	2.23	6.40	OK
10	SPECX	5.35	0.04	0.46	2.27	6.40	OK
11	SPECX	5.78	0.04	0.42	2.08	6.40	OK
12	SPECX	6.04	0.05	0.27	1.30	6.40	OK



TABLE: Joint Displacements							
Story	OutputCase	U1	U2	Disp.	Disp.*0.7R	Allowable (=0.02H)	Condition
Text	Text	cm	cm	cm	cm	cm	
1	SPECY	0.00	0.31	0.31	1.52	6.40	OK
2	SPECY	0.01	0.90	0.59	2.91	6.40	OK
3	SPECY	0.01	1.57	0.66	3.26	6.40	OK
4	SPECY	0.01	2.23	0.66	3.22	6.40	OK
5	SPECY	0.02	2.85	0.62	3.05	6.40	OK
6	SPECY	0.02	3.43	0.58	2.86	6.40	OK
7	SPECY	0.03	3.96	0.53	2.59	6.40	OK
8	SPECY	0.03	4.43	0.47	2.31	6.40	OK
9	SPECY	0.04	4.89	0.46	2.23	6.40	OK
10	SPECY	0.04	5.35	0.46	2.26	6.40	OK
11	SPECY	0.04	5.78	0.42	2.08	6.40	OK
12	SPECY	0.05	6.04	0.27	1.30	6.40	OK

### ب-۸ مقایسه تغییر رفتار سازه‌های دارای میراگر

در این بخش به طور خلاصه، تغییرات بوجود آمده در تغییرمکان نسبی طبقات و برش پایه به تفکیک ساختمان و با توجه به نوع میراگر استفاده شده در سازه، ارائه شده‌است.

### ب-۸-۱ مقایسه تغییرمکان نسبی طبقات

جدول ب-۳۰ مقایسه میزان متوسط جابجائی نسبی طبقات در ساختمان ۴ طبقه با و بدون میراگر

نوع میراگر	متوسط جابجائی نسبی در ساختمان بدون میراگر (cm)	متوسط جابجائی نسبی در ساختمان با میراگر (cm)	درصد کاهش دریافت
اصطکاکی ویسکوالاستیک ویسکوز	۴/۲۴	۱/۰۲۲	۷۵/۷۸
		۲/۸۰	۳۳/۹۶
		۲/۶۱	۳۸/۴۴



جدول ب-۳۱ مقایسه میزان متوسط جابجائی نسبی طبقات در ساختمان ۸ طبقه با و بدون میراگر

نوع میراگر	متوسط جابجائی نسبی در ساختمان بدون میراگر (cm)	متوسط جابجائی نسبی در ساختمان با میراگر (cm)	درصد کاهش دررفت
اصطکاکی	۴/۱۶	۱/۲۷	۶۹/۴۷
ویسکوالاستیک		۲/۵۹	۳۷/۷۴
ویسکوز		۲/۶۵	۳۶/۳۰

جدول ب-۳۲ مقایسه میزان متوسط جابجائی نسبی طبقات در ساختمان ۱۲ طبقه با و بدون میراگر

نوع میراگر	متوسط جابجائی نسبی در ساختمان بدون میراگر (cm)	متوسط جابجائی نسبی در ساختمان با میراگر (cm)	درصد کاهش دررفت
اصطکاکی	۴/۰۷	۱/۸۰	۵۵/۷۸
ویسکوالاستیک		۳/۰۵	۲۵/۰۶
ویسکوز		۲/۴۷	۳۹/۳۱

ب-۸-۲ مقایسه برش و نیروی جانبی طبقات

جدول ب-۳۳ مقایسه میزان برش پایه در ساختمان ۴ طبقه با و بدون میراگر

نوع میراگر	برش پایه در ساختمان بدون میراگر (Ton)	برش پایه در ساختمان با میراگر (Ton)	درصد کاهش نیرو
اصطکاکی	۱۵۸/۹	۱۱۱/۶	۲۹/۸
ویسکوالاستیک		۹۸/۲۲	۳۸/۲۰
ویسکوز		۹۲/۲۸	۴۲/۵۰

جدول ب-۳۴ مقایسه میزان برش پایه در ساختمان ۸ طبقه با و بدون میراگر

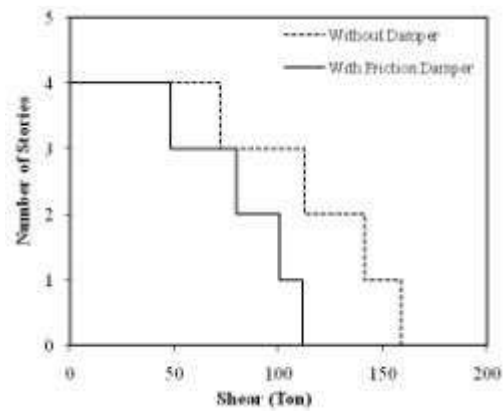
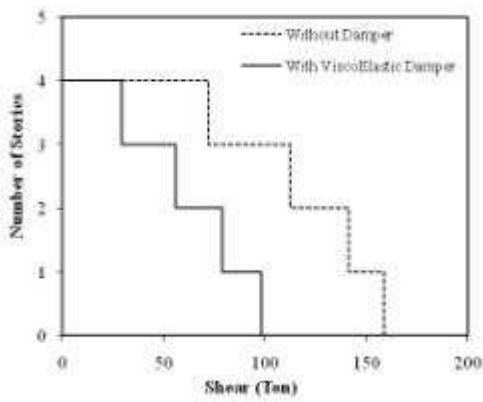
نوع میراگر	برش پایه در ساختمان بدون میراگر (Ton)	برش پایه در ساختمان با میراگر (Ton)	درصد کاهش نیرو
اصطکاکی	۲۲۷/۶	۱۲۳/۷۷	۴۵/۶
ویسکوالاستیک		۱۲۷/۶۷	۴۳/۹
ویسکوز		۱۳۰/۷۸	۴۲/۵۰





جدول ب-۳۵ مقایسه میزان برش پایه در ساختمان ۱۲ طبقه با و بدون میراگر

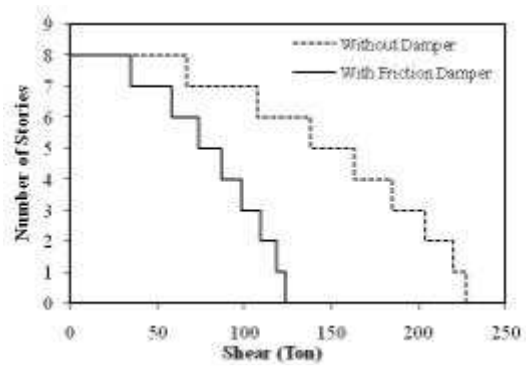
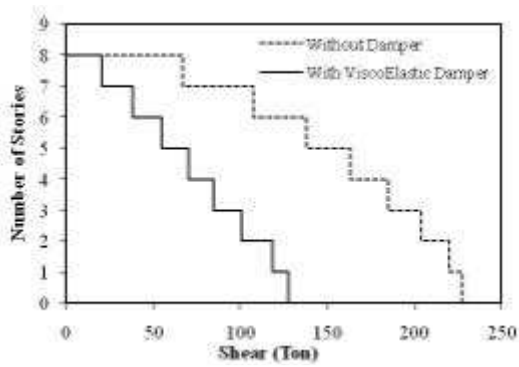
نوع میراگر	برش پایه در ساختمان بدون میراگر (Ton)	برش پایه در ساختمان با میراگر (Ton)	درصد کاهش نیرو
اصطکاکی	۲۸۱/۳۲	۱۴۲/۴۶	۴۹/۴
ویسکوالاستیک		۱۶۴/۵۰	۴۱/۵
ویسکوز		۱۶۱/۷۴	۴۲/۵۰



ب) میراگر ویسکوالاستیک

الف) میراگر اصطکاکی

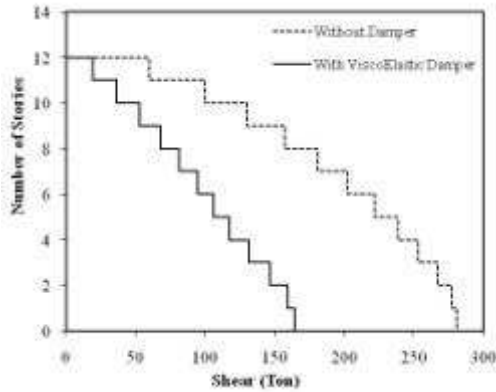
شکل ب-۷ مقایسه برش و نیروی طبقات در ساختمان ۴ طبقه



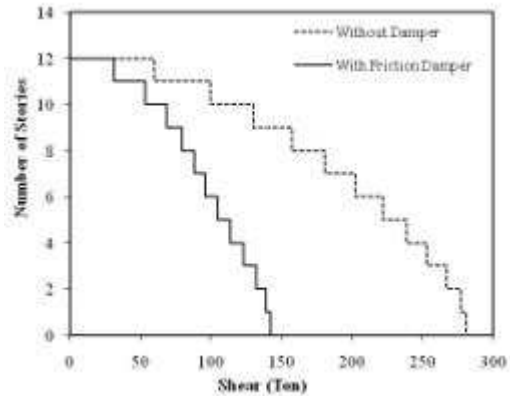
ب) میراگر ویسکوالاستیک

الف) میراگر اصطکاکی

شکل ب-۸ مقایسه برش و نیروی طبقات در ساختمان ۸ طبقه



ب) میراگر ویسکوالاستیک



الف) میراگر اصطکاکی

شکل ب-۹ مقایسه برش و نیروی طبقات در ساختمان ۱۲ طبقه

### ب-۹ مقایسه وزن اسکلت

در این بخش، مقایسه کلی بر روی وزن نهائی اسکلت ساختمان‌های طراحی شده با میراگر، به تفکیک ساختمان و براساس نوع میراگر استفاده شده، ارائه شده‌است.

جدول ب-۳۶ مقایسه وزن اسکلت در ساختمان ۴ طبقه با و بدون میراگر

نوع میراگر	وزن سازه در ساختمان بدون میراگر (Ton)	وزن سازه در ساختمان با میراگر (Ton)	درصد کاهش وزن
اصطکاکی	۸۴	۶۳	۲۴/۸
ویسکوالاستیک		۶۳	۲۴/۸
ویسکوز		۷۱	۱۵/۴

جدول ب-۳۷ مقایسه وزن اسکلت در ساختمان ۸ طبقه با و بدون میراگر

نوع میراگر	وزن سازه در ساختمان بدون میراگر (Ton)	وزن سازه در ساختمان با میراگر (Ton)	درصد کاهش وزن
اصطکاکی	۲۰۰	۱۶۰	۱۹/۷
ویسکوالاستیک		۱۵۳/۲	۲۳/۲
ویسکوز		۱۶۸	۱۵/۷



جدول ب-۳۸ مقایسه مقایسه وزن اسکلت در ساختمان ۱۲ طبقه با و بدون میراگر

نوع میراگر	وزن سازه در ساختمان بدون میراگر (Ton)	وزن سازه در ساختمان با میراگر (Ton)	درصد کاهش وزن
اصطکاکی	۳۵۱	۲۸۹	۱۷/۸
ویسکوالاستیک		۲۹۳/۸	۱۶/۴
ویسکوز		۲۹۸	۱۵/۳

### ب-۱۰ جمع بندی نتایج

طبق نتایج حاصل از تحلیل سازه های مورد بررسی ملاحظه می شود که با استفاده از وسایل میراگر دریافت طبقات حدود ۶۰٪، میزان برش پایه حدود ۵۰٪ و وزن سازه حدود ۲۰٪ کاهش یافته است. لازم به ذکر است که علت کاهش برش پایه در ساختمان های مجهز به وسیله میراگر در واقع کاهش وزن نهایی اسکلت ساختمان می باشد. به عبارت دیگر در صورت استفاده از میراگر بخشی از انرژی وارد به سازه توسط میراگر ها جذب شده، لذا مقاطع مورد استفاده در سازه سبک تر شده و وزن نهایی اسکلت سازه کاهش می یابد. کاهش وزن سازه موجب کاهش برش پایه ساختمان می شود. مثال هایی که مورد بررسی قرار گرفته اند در واقع نمونه هایی تحلیلی بوده که در آنها بررسی سازه های مجهز به میراگر به طور صرفاً تحلیلی انجام شده است، اما در صورتی که نیاز باشد در سازه های واقعی از این وسایل میراگر استفاده شود باید به مسائل دیگری نیز توجه نموده و تمام بررسی های لازم انجام شود. یکی از مسائلی که در استفاده از وسایل میراگر باید به آن توجه نمود توجیه اقتصادی استفاده از وسیله میراگر در سازه می باشد. همچنین در سازه های بلند و سازه های با اهمیت زیاد باید تحلیل ها و بررسی شرایط موجود به طور بسیار دقیق انجام شود. اگرچه که در مثال ها سازه های ۴ و ۸ طبقه نیز مورد بررسی قرار گرفته اند، اما به طور کلی می توان گفت که استفاده از وسیله های میراگر برای سازه های بلند و یا سازه هایی که تحت شرایط خاصی قرار دارند، مانند سازه هایی که دارای کاربری و اهمیت خاصی (از جمله بیمارستانها) بوده و یا دارای شرایط خاصی از لحاظ محیط و ساختگاه هستند، توجیه پذیر می باشد. در این سازه ها، استفاده از میراگرها عملاً عملکرد و سطح



سرویس‌دهی سازه را بالا می‌برد و در نتیجه، خطر آسیب‌دیدن سازه و تجهیزات داخل آن را در طول زلزله و بعد از آن، به میزان قابل توجهی کاهش می‌دهد.

## مراجع

- [1] ASCE 7-10 (2010), Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures, American Society of Civil Engineers.
- [2] ASCE 41-06 (2007). Seismic Rehabilitation of Existing Buildings, American Society of Civil Engineers.
- [3] IBC (2012), International Building Code.
- [4] Fema P-750 (2009), NEHRP Recommended Seismic Provisions for new buildings and other structures.
- [5] Fema P-751 (2012), NEHRP recommended Seismic Provisions, Design Examples.
- [6] A.S. Whittaker, V.V. Bertero, J.L. Alonso and C.L. Thompson, "Earthquake Simulator Testing of Steel Plate Added Damping and Stiffness Elements," Report No. UCB/EERC-89/02, University of California, Berkeley, 1989.
- [7] Ahsan Kareem, Tracy Kijewski, Yukio Tamura. "Mitigation of Motion of Tall Buildings with Specific Examples of Applications" Wind and Structures , vol. 2 , No. 3, 201-251 (1999)
- [8] Aiken, I.D. and Kelly, J.M. (1992). Comparative study of four passive energy dissipation systems, Bulletin of New Zealand National Society of Earthquake Engineering, Vol. 25, No. 3, pp. 175-192.
- [9] Aiken, I.D. et al., Testing of passive energy dissipation systems, EERI Earthquake Spectra, 335, 1993.



- [10] Aiken, I.D., Nims, D.K., Whittaker, A.S., Kelly, J.M. (1993). Testing of passive energy dissipation systems, *Earthquake Spectra*, Vol. 9, No.3, pp. 335-370.
- [11] Bauer, H.F. (1984). Oscillations of inviscible liquids in a rectangular container: a new damper for excited structures, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 93, pp. 117-133.
- [12] Cheng, F. Y., Jiang, H., Lou, K., (2008). *Smart structures: innovative systems for seismic response control*, CRC press.
- [13] Cheng, F. Y., Jiang, H., Lou, K., (2008). *Smart structures: innovative systems for seismic response control*, CRC press.
- [14] Fitzgerald, T.F., Anagnos, T., Goodson, M., and Zsutty, T. (1994). Slotted bolted connections in seismic design for concentrically braced connections, *Earthquake Spectra*, Vol. 5, No.2, pp. 383-391.
- [15] Fujino, Y. and Abe, M. (1993). Design formulas for tuned mass dampers based on a perturbation technique, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 22, No. 10, pp. 833-854, 1993.
- [16] Holmes, J.D. (1995). Listing of Installations, *Engineering Structures*, Vol.17, No.9, pp.676-678.
- [17] Kelly, J.M., Skinner, R.I., and Heine, A.J. (1972). Mechanisms of energy absorption in special devices for use in earthquake resistant structures, *Bulletin of New Zealand National Society for Earthquake Engineering*, Vol. 5, No.3, pp. 63-88.
- [18] Kelly, T.E. (2001). *Base Isolation of Structures, Design Guidelines*, Holmes Consulting Group Ltd., Wellington, New Zealand.
- [19] Kitamura, H., Fujita, T., Teramoto, T., and Kihara, H., (1998). Design and analysis of a tower structure with a tuned mass damper, *Proceedings of the Ninth World Conference on Earthquake Engineering*, Vol. 8, pp. 415-420.
- [20] Lewandowski, R. and Grzymislawska, J. (2009). Dynamic Analysis of Structures with Multiple Tuned Mass Dampers, *Journal of Civil Engineering and Management*, Vol. 15, No. 1, pp. 77-86, 2009.
- [21] Luft, R.W (1979). Optimal tuned mass dampers for buildings, *ASCE Journal of the Structural Division*, Vol. 105, No. 12, pp. 2766-2772.
- [22] M. D. Symans, A.M.ASCE; F. A. Charney, F.ASCE2; A. S. Whittaker, M.ASCE3; M. C. Constantinou, M.ASCE4; C. A. Kircher, M.ASCE5; M. W.



- Johnson, M. ASCE<sup>6</sup>; and R. J. McNamara, F. ASCE<sup>7</sup> Energy Dissipation Systems for Seismic Applications: Current Practice and Recent Developments *Journal of Structural Engineering*, Vol. 134, No. 1, January 1, 2008
- [23] Murty, C. V. R. (2004). "How to Reduce Earthquake Effects on Buildings? Learning Earthquake Design and Construction."
- [24] Nims, D.K., Richter, P.J., and Bachman, R.E. (1993). The use of the energy dissipating restraint for seismic hazard mitigation, *Earthquake Spectra*, Vol. 9, No.3, pp. 467-489.
- [25] P. Chaiviriyawong, W. Prachaseree." Applications of Passive Mass Dampers for Civil Engineering Structural Control" RSID6-STR33
- [26] Pall, A. et al., Friction dampers for seismic control of Canadian Space Agency headquarters, *Earthquake Spectra*, 9, 547, 1993.
- [27] Pall, A.S. and Marsh, C. (1982). Response of friction damped braced frames, *ASCE Journal of Structural Division*, Vol. 108, No. ST-6, pp. 1313-1323.
- [28] Patten, W. N., Sun, J., Li, G., Kuehn, J., and Song, G. (1999). "Field Test of an Intelligent Stiffener for Bridges at the I-35 Walnut Creek Bridge", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 28, 109-126.
- [29] Pull, A., Vezina, S., Proulx, P., and Paul, R. (1993). Friction dampers for seismic control of Canadian Space Agency Headquarters, *Earthquake Spectra*, Vol. 9, No.3, pp. 547-557.
- [30] Rana, R. and Soong, T.T. (1998). Parametric study and simplified design of tuned mass dampers, *Engineering Structures*, Vol. 20, No. 3, pp. 193-203.
- [31] Robinson, W.H. (1998). Passive Control of Structures, The New Zealand Experience, *ISET Journal of Earthquake Technology*, Paper No. 375, Vol. 35, No. 4, pp. 63-75.
- [32] Robinson, W.H. (1998). Passive Control of Structures, The New Zealand Experience. *ISET Journal of Earthquake Technology*, Paper No. 375, Vol. 35, No. 4, pp. 63-75
- [33] Sakamoto, M., Kobori, T., Yamada, T., and Takahashi, M. (1994), "Practical Applications of Active and Hybrid Response Control Systems and Their Verifications by Earthquake and Strong Wind Observations", First World Conference on Structural Control, Los Angeles, CA, WP2-90 - WP2-99.



- [34] Shimizu, K. and Teramura, A. (1994), Development of vibration control system using U-shaped tank, Proceedings of the 1st International Workshop and Seminar on Behavior of Steel Structures in Seismic Areas, Timisoara, Romania:7.25-7.34.
- [35] Skinner, R.J., Kelly, J.M., and Heine, A.J. (1974). Hysteresis dampers for earthquake resistant structures, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol.3, No.3, pp. 287-296.
- [36] Soong, T. T.; Dargush, Gary F. (1997). *Passive Energy Dissipation Systems in Structural Engineering*, John Wiley & Sons, Ltd. (UK).
- [37] Soong, T. T.; Dargush, Gary F., *Passive Energy Dissipation Systems in Structural Engineering*, John Wiley & Sons, Ltd. (UK), 1997.
- [38] Soong, T.T. and Spencer, B.F. Jr. (2002). Supplemental energy dissipation: state-of-the-art and state-of-the-practice, *Engineering Structures*, Vol. 24, No.3, pp. 243-259.
- [39] Spencer Jr., B. F., and Nagarajaiah, S. (2003), "State of the Art of Structural Control." *Journal of Structural Engineering*, 129(7), 845-856.
- [40] 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", *International Post-SMiRT Conference Seminar on Seismic Isolation, Passive Energy Dissipation and Active Control of Vibration of Structures*, Cheju, Korea.
- [41] Symans, M.D., Charney, F.A., Whittaker, A.S., Constantinou, M.C., Kircher, C.A.; Johnson, M.W., and McNamara, R.J. (2008). Energy Dissipation Systems for Seismic Applications: Current Practice and Recent Developments, *Journal of Structural Engineering*, Vol. 134, No. 1, pp. 3-21.
- [42] T.T. Soong, B.F. Spencer Jr, Supplemental energy dissipation: state-of-the-art and state-of-the-practice *Engineering Structures* 24 (2002) 243–259
- [43] Tamura, Y., Kohsaka, R., Nakamura, O., Miyashita, K., and Modi, V.J. (1996). Wind-Induced Responses of an Airport Tower- Efficiency of Tuned Liquid Damper, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 65, No. (1-3), pp. 121-131.
- [44] Tyler, R.G.(1985). Further notes on a steel energy-absorbing-element for braced frameworks, *Bulletin of New Zealand National Society for Earthquake Engineering*, Vol. 18, No.3, pp. 270-279.





- [45] Wang, Y.P. (2002). Fundamentals of Seismic Base Isolation, International Training Programs for Seismic Design of Building Structures Hosted by National Center for Research on Earthquake Engineering Sponsored by Department of International Programs, National Science Council.
- [46] Warburton, G.B. (1982). Optimal absorber parameters for various combinations of response and excitation parameters, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 10, No. 3, pp. 381-401.
- [47] Whittaker, A.S., Bertero, V.V., Alonso, J.L., and Thompson, C.L. (1989). Earthquake Simulator Testing of Steel Plate Added Damping and Stiffness Elements, Report No. UCB/EERC-89/02, University of California, Berkeley.