

جمهوری اسلامی ایران
سازمان برنامه و بودجه کشور

دستورالعمل استفاده از میراگرها در طراحی و مقاوم سازی ساختمان ها

ضابطه شماره ۷۶۶

مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی
معاونت تحقیقات
www.bhrc.ac.ir

معاونت فنی، امور زیربنایی و تولیدی
امور نظام فنی اجرایی، مشاورین و پیمانکاران
Nezamfanni.ir

سازمان مجری ساختمانها و تاسیسات دولتی و عمومی
معاونت برنامه ریزی و مهندسی
www.cobi.gov.ir

شماره:	۹۷/۳۲۶۶۲۶
تاریخ:	۱۳۹۷/۰۶/۲۷
بخشنامه به دستگاه‌های اجرایی، مهندسان مشاور و پیمانکاران	
موضوع: دستورالعمل استفاده از میراگرها در طراحی و مقاوم‌سازی ساختمان‌ها	
در چارچوب نظام فنی و اجرایی یکپارچه کشور موضوع ماده (۳۴) قانون احکام دائمی برنامه‌های توسعه کشور و ماده (۲۳) قانون برنامه و بودجه و مواد (۶) و (۷) آیین‌نامه استانداردهای اجرایی طرح‌های عمرانی - مصوب سال ۱۳۵۲، به پیوست ضابطه شماره ۷۶۶ با عنوان «دستورالعمل استفاده از میراگرها در طراحی و مقاوم‌سازی ساختمان‌ها» از نوع گروه سوم ابلاغ می‌شود. رعایت مفاد این ضابطه در صورت نداشتن ضوابط بهتر، از تاریخ ۱۳۹۷/۱۰/۰۱ الزامی است. امور نظام فنی اجرایی، مشاورین و پیمانکاران این سازمان دریافت‌کننده نظرات و پیشنهادهای اصلاحی در مورد مفاد این ضابطه بوده و اصلاحات لازم را اعلام خواهد کرد.	
محمد باقر نوبخت	

اصلاح مدارک فنی

خواننده گرامی:

امور نظام فنی اجرایی، مشاورین و پیمانکاران معاونت فنی، امور زیربنایی و تولیدی سازمان برنامه و بودجه کشور، با استفاده از نظر کارشناسان برجسته مبادرت به تهیه این نشریه کرده و آن را برای استفاده به جامعه‌ی مهندسی کشور عرضه نموده است. با وجود تلاش فراوان، این اثر مصون از ایرادهایی نظیر غلط‌های مفهومی، فنی، ابهام، ابهام و اشکالات موضوعی نیست.

از این‌رو، از شما خواننده‌ی گرامی صمیمانه تقاضا دارد در صورت مشاهده هر گونه ایراد و اشکال فنی، مراتب را بصورت زیر گزارش فرمایید:

- ۱- در سامانه مدیریت دانش اسناد فنی و اجرایی (سما) ثبت‌نام فرمایید: sama.nezamfanni.ir
 - ۲- پس از ورود به سامانه سما و برای تماس احتمالی، نشانی خود را در بخش پروفایل کاربری تکمیل فرمایید.
 - ۳- به بخش نظرخواهی این نشریه مراجعه فرمایید.
 - ۴- شماره بند و صفحه موضوع مورد نظر را مشخص کنید.
 - ۵- ایراد مورد نظر را بصورت خلاصه بیان دارید.
 - ۶- در صورت امکان متن اصلاح شده را برای جایگزینی ارسال کنید.
- کارشناسان این امور نظرهای دریافتی را به دقت مطالعه نموده و اقدام مقتضی را معمول خواهند داشت. پیشاپیش از همکاری و دقت نظر جنابعالی قدردانی می‌شود.

نشانی برای مکاتبه: تهران، میدان بهارستان، خیابان صفی علی‌شاه - مرکز تلفن ۳۳۲۷۱

سازمان برنامه و بودجه کشور، امور نظام فنی اجرایی، مشاورین و پیمانکاران

Email: nezamfanni@mporg.ir

web: nezamfanni.ir

باسمه تعالی

پیشگفتار

با توجه به لزوم ساخت سازه‌های مقاوم در برابر زلزله و همچنین مقاوم‌سازی لرزه‌ای ساختمان‌های موجود، کاهش هزینه‌های مربوط همواره یکی از چالش‌های مهندسی بوده‌است. در این راستا استفاده از تجهیزات کنترل سازه خصوصاً در سازه‌هایی که دارای اهداف بهسازی لرزه‌ای سخت‌گیرانه هستند توصیه می‌شود. استفاده از میراگرها که در زمره سیستم‌های اتلاف انرژی غیرفعال رده‌بندی می‌شوند، باعث افزایش میرایی و در برخی موارد افزایش سختی، افزایش شکل‌پذیری و در نهایت، افزایش ایمنی سازه و ملحقات آن نسبت به آسیب‌های وارده در اثر زلزله می‌شود. علاوه بر این، هزینه منطقی این ابزار، استفاده از آنها را در مقایسه با سایر ابزارهای اتلاف انرژی، از جمله جداسازهای لرزه‌ای، وسعت بخشیده است.

با توجه به مطالب فوق، ضابطه شماره ۷۶۶ با عنوان «دستورالعمل استفاده از میراگرها در طراحی و مقاوم‌سازی ساختمان‌ها» توسط مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی و با هماهنگی سازمان مجری ساختمانها و تاسیسات دولتی و عمومی و همچنین امور نظام فنی اجرایی، مشاورین و پیمانکاران سازمان برنامه و بودجه کشور تهیه و برای تایید و ابلاغ به عوامل ذینفع نظام فنی و اجرایی کشور به این معاونت ارسال شد که پس از بررسی و تصویب، براساس نظام فنی اجرایی یکپارچه کشور، موضوع ماده ۳۴ قانون احکام دائمی برنامه‌های توسعه کشور، ماده ۲۳ قانون برنامه و بودجه و آیین‌نامه استانداردهای اجرایی مصوب هیات محترم وزیران، تصویب و ابلاغ گردید.

علی‌رغم تلاش، دقت و وقت زیادی که برای تهیه این مجموعه صرف گردیده، با این حال مطالب آن مصون از وجود اشکال و ابهام نیست؛ بنابراین در راستای تکمیل و پربار شدن این دستورالعمل از کارشناسان و خوانندگان محترم درخواست می‌گردد موارد اصلاحی را به امور نظام فنی اجرایی، مشاورین و پیمانکاران سازمان برنامه و بودجه کشور ارسال کنند تا در تجدید نظرهای آتی مورد استفاده قرار گیرد. امید است متخصصان و کارشناسان با ابراز نظرات خود درخصوص این ضابطه ما را در اصلاحات بعدی یاری فرمایند.

معاونت فنی، امور زیربنایی و تولیدی، بدین وسیله از تلاش و جدیت رییس امور نظام فنی و اجرایی جناب آقای دکتر سید جواد قانع‌فر، رییس مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی جناب آقای دکتر محمد شکرچی‌زاده، مدیرعامل سازمان مجری ساختمان‌ها و تاسیسات دولتی و عمومی، جناب آقای مهندس علیزاده، همچنین مجری محترم پروژه و تمامی کارشناسان و متخصصان همکار در امر تهیه و نهایی نمودن این ضابطه، تشکر و قدردانی می‌نماید و از ایزد منان توفیق روزافزون همه این بزرگواران را آرزومند است.

حمیدرضا عدل

معاون فنی، امور زیربنایی و تولیدی

تابستان ۱۳۹۷

تهیه و کنترل «دستورالعمل استفاده از میراگرها در طراحی و مقاوم سازی ساختمان‌ها»

[ضابطه شماره ۷۶۶]

مجری

عضو هیأت علمی مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی دکتر نادر خواجه‌احمد عطاری

اعضای کمیته تهیه کننده متن اصلی

- | | |
|------------------------------------|--|
| ۱- دکتر نادر خواجه‌احمد عطاری | عضو هیأت علمی مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی |
| ۲- دکتر فیاض رحیم‌زاده | عضو هیأت علمی دانشگاه صنعتی شریف |
| ۳- مهندس محمدرضا بیات | مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی |
| ۴- دکتر عاطفه جهان‌محمدي | مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی |
| ۵- دکتر هیمن حجت‌جلالی | عضو هیئت علمی دانشگاه آرلینگتون تگزاس |
| ۶- مهندس محمدحسین اخوان سیگاری یزد | عضو هیئت علمی دانشگاه یزد |

اعضاء کمیته داوری فنی پروژه (به ترتیب حروف الفبا)

- | | |
|----------------------------|--|
| ۱- دکتر علی اکبر آقا کوچک | عضو هیأت علمی دانشگاه تربیت مدرس |
| ۲- مهندس رضا اخباری | سازمان مجری ساختمان‌ها و تاسیسات دولتی و عمومی |
| ۳- مهندس رحیم بادامیان | سازمان مجری ساختمان‌ها و تاسیسات دولتی و عمومی |
| ۴- دکتر فیاض رحیم‌زاده | عضو هیأت علمی دانشگاه صنعتی شریف |
| ۵- دکتر محمد شکرچی زاده | استاد دانشگاه تهران و رئیس مرکز تحقیقات راه مسکن و شهرسازی |
| ۶- مهندس محمد جعفر علیزاده | مدیر عامل سازمان مجری ساختمان‌ها و تاسیسات دولتی و عمومی |
| ۷- دکتر سید علی موید علایی | مهندسین مشاور |
| ۸- دکتر محمدتقی کاظمی | عضو هیأت علمی دانشگاه صنعتی شریف |
| ۹- دکتر مجتبی فرخ | عضو هیأت علمی دانشگاه خواجه نصیر |
| ۱۰- دکتر علی نیکخو | عضو هیأت علمی دانشگاه علم و فرهنگ |

اعضای گروه هدایت و راهبری (سازمان برنامه و بودجه کشور)

- | | |
|-------------------|--|
| ۱- علیرضا توتونچی | معاون امور نظام فنی اجرایی، مشاورین و پیمانکاران |
| ۲- فرزاد پارسا | رئیس گروه امور نظام فنی اجرایی، مشاورین و پیمانکاران |

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
فصل اول: الزامات طراحی لرزه‌ای سازه‌ها با استفاده از سیستم‌های استهلاک انرژی	۱
۱-۱- دامنه کاربرد	۳
۲-۱- تعاریف	۳
۳-۱- ضوابط عمومی طراحی	۴
۱-۳-۱- طراحی لرزه‌ای	۴
۲-۳-۱- ضوابط سیستم	۴
۱-۲-۳-۱- سیستم باربر جانبی	۴
۲-۲-۳-۱- سیستم میرایی	۵
۳-۳-۱- شتابنگاشت	۵
۱-۳-۳-۱- طیف طرح	۵
۲-۳-۳-۱- روش تحلیل تاریخچه زمانی	۶
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	۸
۴-۱- روش غیرخطی	۸
۱-۴-۱- روش غیرخطی تاریخچه زمانی (Nonlinear Response-history)	۸
۱-۱-۴-۱- مدلسازی میراگر	۹
۲-۱-۴-۱- پارامترهای پاسخ	۹
۲-۴-۱- روش استاتیکی غیرخطی	۹
۵-۱- روش طیف پاسخ	۱۰
۱-۵-۱- مدل‌سازی	۱۰
۲-۵-۱- سیستم باربر لرزه‌ای	۱۰
۱-۲-۵-۱- برش پایه لرزه‌ای	۱۰
۲-۲-۵-۱- برش پایه مودال	۱۱
۳-۲-۵-۱- ضریب مشارکت مودی	۱۱
۴-۲-۵-۱- ضریب پاسخ لرزه‌ای مد اصلی	۱۱
۵-۲-۵-۱- تعیین دوره تناوب موثر مود اصلی	۱۱
۶-۲-۵-۱- ضریب پاسخ لرزه‌ای مودهای بالاتر	۱۲

۱۲	۷-۲-۵-۱ نیروی جانبی طرح
۱۲	۳-۵-۱ سیستم میرایی
۱۳	۱-۳-۵-۱ تغییر شکل ناشی از زلزله طرح
۱۳	۲-۳-۵-۱ تغییر مکان بام ناشی از زلزله طرح
۱۳	۳-۳-۵-۱ دریافت طبقه ناشی از زلزله طرح
۱۳	۴-۳-۵-۱ سرعت طبقه ناشی از زلزله طرح
۱۴	۵-۳-۵-۱ پاسخ بیشترین زلزله مورد نظر (MCE)
۱۴	۶-۱ روش نیروی جانبی معادل
۱۴	۱-۶-۱ مدل سازی
۱۵	۲-۶-۱ سیستم باربر لرزه ای
۱۵	۱-۲-۶-۱ برش پایه
۱۵	۲-۲-۶-۱ برش پایه مود اصلی
۱۵	۳-۲-۶-۱ مشخصات مود اصلی
۱۶	۴-۲-۶-۱ ضریب پاسخ لرزه ای مود اصلی
۱۶	۵-۲-۶-۱ تعیین دوره تناوب موثر مود اصلی
۱۶	۶-۲-۶-۱ برش پایه سایر مودها
۱۷	۷-۲-۶-۱ مشخصات سایر مودها
۱۷	۸-۲-۶-۱ ضریب پاسخ لرزه ای مودهای باقی مانده
۱۷	۹-۲-۶-۱ نیروی جانبی طرح
۱۷	۳-۶-۱ سیستم میرایی
۱۸	۱-۳-۶-۱ تغییر شکل کف ناشی از زلزله طرح
۱۸	۲-۳-۶-۱ تغییر مکان بام ناشی از زلزله طرح
۱۸	۳-۳-۶-۱ دریافت طبقات در زلزله طرح
۱۹	۴-۳-۶-۱ سرعت طبقه در زلزله طرح
۱۹	۵-۳-۶-۱ پاسخ در بیشترین زلزله محتمل (MCE)
۱۹	۷-۱ اصلاح پاسخ میرایی
۱۹	۱-۷-۱ ضریب میرایی
۲۰	۲-۷-۱ میرایی موثر
۲۱	۱-۲-۷-۱ میرایی ذاتی
۲۱	۲-۲-۷-۱ میرایی هیستریزیس
۲۱	۱-۲-۲-۷-۱ ضریب اصلاح چرخه هیستریزیس
۲۲	۳-۲-۷-۱ میرایی ویسکوز
۲۲	۳-۷-۱ شکل پذیری موثر مورد نیاز
۲۳	۴-۷-۱ بیشینه نیاز شکل پذیری موثر
۲۳	۸-۱ شرایط بارگذاری لرزه ای و معیارهای پذیرش
۲۳	۱-۸-۱ روش های غیرخطی
۲۴	۱-۱-۸-۱ سیستم باربر لرزه ای
۲۴	۲-۱-۸-۱ سیستم های میرایی
۲۴	۳-۱-۸-۱ ترکیب اثرات بارگذاری
۲۴	۲-۸-۱ روش های طیف پاسخ و نیروی جانبی معادل

۲۴	۱-۲-۸-۱- سیستم باربر لرزه ای
۲۵	۲-۲-۸-۱- سیستم میرایی
۲۵	۳-۲-۸-۱- ترکیب اثرات بارگذاری
۲۵	۱-۳-۲-۸-۱- مقدار نیروی افقی زلزله (E_h)
۲۵	۲-۳-۲-۸-۱- نیروی قائم زلزله
۲۵	۳-۳-۲-۸-۱- ترکیب بارهای لرزه ای
۲۵	۴-۲-۸-۱- نیروهای مودال طراحی سیستم میرایی
۲۶	۵-۲-۸-۱- شرایط بار لرزه ای و ترکیب پاسخ های مودال
۲۸	۶-۲-۸-۱- حدود پاسخ غیرخطی
۲۸	۹- بررسی طراحی
۲۹	۱۰-۱- آزمایش سیستم میرایی
۲۹	۱-۱۰-۱- آزمایش های نمونه شاهد
۲۹	۱-۱-۱۰-۱- ثبت اطلاعات
۲۹	۲-۱-۱۰-۱- ترتیب و تعداد سیکل های آزمایش
۳۰	۳-۱-۱۰-۱- آزمایش میراگرهای مشابه
۳۱	۴-۱-۱۰-۱- تعیین مشخصات تغییر مکان-سرعت-نیرو
۳۱	۵-۱-۱۰-۱- کفایت میراگر
۳۱	۱-۵-۱-۱۰-۱- میراگر وابسته به تغییر مکان
۳۲	۲-۵-۱-۱۰-۱- میراگر وابسته به سرعت
۳۲	۲-۱۰-۱- آزمایش میراگر
۳۲	۱۱-۱- فلوجارت طراحی ساختمان ها با استفاده از میراگر
۳۷	فصل دوم: الزامات بهسازی لرزه ای سازه ها با استفاده از سیستم های استهلاک انرژی
۳۹	۲-۱ کلیات
۳۹	۱-۱-۲- هدف
۳۹	۲-۱-۲- محدوده کاربرد
۳۹	۲-۲- سطوح خطر لرزه ای مورد استفاده در این دستورالعمل
۴۰	۳-۲- سطوح عملکرد
۴۰	۱-۳-۲- سطوح عملکرد اجزای سازه ای
۴۱	۲-۳-۲- سطوح عملکرد اجزای غیرسازه ای
۴۱	۳-۳-۲- سطوح عملکرد کل ساختمان
۴۲	۱-۳-۳-۲- سطح عملکرد خدمت رسانی بی وقفه (A-۱) (OP):
۴۲	۲-۳-۳-۲- سطح عملکرد قابلیت استفاده بی وقفه (B-۱) (IO):
۴۲	۳-۳-۳-۲- سطح عملکرد ایمنی جانی (C-۳) (LS):
۴۲	۴-۳-۳-۲- سطح عملکرد آستانه فروریزش (E-۵) (CP):
۴۲	۴-۲- انواع میراگرها
۴۳	۵-۲- مدل سازی میراگرها
۴۳	۱-۵-۲- میراگرهای وابسته به تغییر مکان
۴۴	۲-۵-۲- میراگرهای وابسته به سرعت
۴۴	۱-۲-۵-۲- میراگرهای ویسکوالاستیک جامد

۴۵	۲-۲-۵-۲- میراگرهای ویسکو-الاستیک مایع.....
۴۵	۲-۲-۵-۳- میراگرهای ویسکوز مایع.....
۴۶	۲-۵-۳- انواع دیگر میراگرها.....
۴۶	۲-۶- روش‌های خطی.....
۴۶	۲-۶-۱- روش استاتیکی خطی.....
۴۶	۲-۶-۱-۱- میراگرهای وابسته به تغییر مکان.....
۴۸	۲-۶-۱-۲- میراگرهای وابسته به سرعت.....
۴۹	۲-۶-۱-۳- نیروهای طراحی.....
۵۰	۲-۶-۲- روش دینامیکی خطی.....
۵۱	۲-۶-۲-۱- میراگرهای وابسته به تغییر مکان.....
۵۱	۲-۶-۲-۲- میراگرهای وابسته به سرعت.....
۵۲	۲-۷- روش‌های غیرخطی.....
۵۲	۲-۷-۱- روش استاتیکی غیرخطی.....
۵۳	۲-۷-۱-۱- نقطه‌ی کنترل.....
۵۳	۲-۷-۱-۲- توزیع بار جانبی.....
۵۴	۲-۷-۱-۳- مدل رفتار سه خطی نیرو-تغییر مکان سازه.....
۵۴	۲-۷-۱-۴- تغییر مکان هدف.....
۵۴	۲-۷-۱-۴- الف ساختمان با دیافراگم صلب.....
۵۶	۲-۷-۱-۴- ب ساختمان با دیافراگم نیمه صلب.....
۵۷	۲-۷-۱-۴- ج ساختمان با دیافراگم نرم.....
۵۷	۲-۷-۱-۵- میراگرهای وابسته به تغییر مکان.....
۵۷	۲-۷-۱-۶- میراگرهای وابسته به سرعت.....
۵۸	۲-۷-۲- روش دینامیکی غیرخطی.....
۵۹	۲-۸- ضوابط تفصیلی سیستم‌ها.....
۵۹	۲-۸-۱- کلیات.....
۵۹	۲-۸-۲- دمای بهره‌برداری.....
۵۹	۲-۸-۳- شرایط محیطی.....
۶۰	۲-۸-۴- نیروی باد.....
۶۰	۲-۸-۵- بازرسی و جایگزینی.....
۶۰	۲-۸-۶- کنترل کیفیت ساخت.....
۶۰	۲-۸-۷- نگهداری.....
۶۰	۲-۹- بازبینی طرح.....
۶۰	۲-۹-۱- کلیات.....
۶۱	۲-۱۰- آزمایش‌های لازم برای میراگرها.....
۶۱	۲-۱۰-۱- کلیات.....
۶۲	۲-۱۰-۲- آزمایش نمونه‌ها.....
۶۲	۲-۱۰-۱-۱- کلیات.....
۶۲	۲-۱۰-۲-۱- ثبت داده‌ها.....
۶۲	۲-۱۰-۳- دوره و چرخه‌های آزمایش.....
۶۳	۲-۱۰-۴- میراگرهای وابسته به سرعت و یا فرکانس ارتعاش.....

۶۳	۲-۱۰-۵- میراگرهای در معرض به تغییر مکان خارج از صفحه
۶۳	۲-۱۰-۶- آزمایش وسایل مشابه
۶۴	۲-۱۰-۳- تعیین مشخصات منحنی نیرو- تغییر مکان
۶۴	۲-۱۰-۴- کفایت سیستم
۶۵	۲-۱۱- فلوچارت مقاوم سازی ساختمان ها با استفاده از میراگر
۶۹	فصل سوم: راهنما و تفسیر
۷۱	۳-۱ ضوابط عمومی
۷۳	۳-۲ مدل سازی میراگرها
۷۴	۳-۲-۱- میراگرهای وابسته به تغییر مکان
۷۴	۳-۲-۲- میراگرهای وابسته به سرعت
۷۸	۳-۲-۳- سایر میراگرها
۷۸	۳-۳ طراحی ساختمان های جدید با استفاده از میراگرها
۷۹	۳-۳-۱- مقادیر طیفی پاسخ و طرح براساس ساختگاه
۸۱	۳-۳-۲- روشهای تحلیل
۸۱	۳-۳-۲-۱ کلیات
۸۲	۳-۳-۲-۲ تحلیل خطی
۸۵	۳-۳-۲-۳ روش های غیر خطی
۸۷	۳-۳-۲-۴ تخمین سرعت و شتاب حداکثر در سیستم های دارای میراگر ویسکوز
۹۱	۳-۴ بهسازی لرزه ای ساختمان های موجود با استفاده از میراگرها
۹۲	۳-۴-۱- روش های تحلیل خطی
۹۲	۳-۴-۱-۱ روش خطی استاتیکی
۹۵	۳-۴-۱-۲ روش دینامیکی خطی
۹۶	۳-۴-۲- روش های غیر خطی
۹۶	۳-۴-۲-۱ روش استاتیکی غیر خطی
۱۰۸	۳-۴-۲-۲ روش دینامیکی غیر خطی
۱۰۹	۳-۴-۳- معیارهای حدی بالا و پائین
۱۰۹	۳-۴-۳-۱ مشخصات اسمی
۱۰۹	۳-۴-۳-۲ رواداری های متناظر با مشخصات اسمی
۱۱۰	۳-۴-۳-۳ ضرایب تغییر مشخصات
۱۱۰	۳-۴-۳-۴ حدود بالا و پائین مشخصات تحلیل و طراحی
۱۱۲	پیوست الف: انواع و مشخصات سیستم های میراگر
۱۱۳	الف-۱ مقدمه
۱۱۳	الف-۲ معرفی انواع سیستم های کنترل سازه ها
۱۱۳	الف-۲-۱ طبقه بندی کلی سیستم های کنترل
۱۱۴	الف-۲-۲ کنترل غیر فعال سازه ها
۱۱۵	الف-۲-۲-۱ سیستم جداسازی پایه
۱۱۷	الف-۲-۲-۱-۱- الاستومر
۱۱۸	الف-۲-۲-۲-۱-۲ سیستم جداساز لرزه ای سرب-لاستیک (LRB)
۱۱۹	الف-۲-۲-۲-۳-۱-۲ سیستم جداساز لرزه ای لاستیکی با میرایی بالا (HDRB)

الف-۲-۱-۴- سیستم آونگی اصطكاكى (FPS).....	۱۱۹
الف-۲-۲-۲- ميراگر با جرم متوازن (TMD).....	۱۲۴
الف-۲-۲-۳- ميراگر مایع متوازن (TLD).....	۱۳۲
الف-۲-۲-۴- ميراگر جارى شونده فلزى.....	۱۳۷
الف-۲-۲-۵- ميراگر اصطكاكى.....	۱۴۲
الف-۲-۲-۶- ميراگرويسكوالاستيك.....	۱۴۷
الف-۲-۲-۷- ميراگر با سيال ويسكوز.....	۱۴۸
الف-۲-۲-۸- انتقال انرژى به صورت هدفمند.....	۱۴۹
الف-۲-۳-۳- كنترل فعال سازه‌ها.....	۱۵۱
الف-۲-۳-۱- سیستم ميراگر با جرم فعال.....	۱۵۲
الف-۲-۳-۲- سیستم تاندون فعال.....	۱۵۴
الف-۲-۳-۳- سیستم مهاربند فعال.....	۱۵۴
الف-۲-۳-۴- سیستم توليد پالس.....	۱۵۵
الف-۲-۳-۵- ميراگر فعال با سختى متغير.....	۱۵۵
الف-۲-۴-۴- كنترل نيّمه فعال سازه‌ها.....	۱۵۵
الف-۲-۴-۱- ميراگر با دريچه متغير.....	۱۵۷
الف-۲-۴-۲- ميراگر با سختى متغير.....	۱۵۸
الف-۲-۴-۳- ميراگر با جرم متوازن نيّمه فعال.....	۱۵۹
الف-۲-۴-۴- ميراگر با ستون مایع كنترل شونده (Semi active TLCD).....	۱۶۰
الف-۲-۴-۵- ميراگر با سيال كنترل شونده.....	۱۶۰
الف-۳-۳- مقايسه سیستم‌هاى كنترلى.....	۱۶۲
الف-۳-۱- مقايسه سیستم‌هاى كنترل غيرفعال.....	۱۶۳
الف-۳-۱-۱- جداگر لرزه‌اى.....	۱۶۳
الف-۳-۱-۲- وسايل استهلاك انرژى.....	۱۶۵
مراجع.....	۱۶۹

فهرست جداول

عنوان	صفحه
جدول ۱-۱- مقادیر SD1 بر حسب نوع خاک.....	۶
جدول ۲-۱- ضرایب میرایی هنگامی که دوره تناوب سازه بیشتر از T_O باشد.....	۲۰
جدول ۳-۱- ضرایب نیرو $CMFD_2$	۲۷
جدول ۴-۱- ضرایب نیرو C_{MFV}^{2-1}	۲۸
جدول ۱-۲- ضرایب B_1 و B_s بر حسب میرایی مورد نظر.....	۴۷
جدول ۲-۲- مقادیر ضریب C_M	۴۸
جدول ۳-۲- مقدار ضریب C_0^1	۵۵
جدول ۱-۳- ضرایب F_A براساس مشخصات ساختگاه.....	۸۰
جدول ۲-۳- ضرایب F_V براساس مشخصات ساختگاه.....	۸۱
جدول ۳-۳- مقادیر ضرایب اصلاح حاصل از مطالعات رامیرز و همکاران (۲۰۰۱).....	۸۸
جدول ۴-۳- مقادیر پارمتر Λ	۱۰۷
جدول الف-۱- استفاده از TMD ها در سطح بین المللی.....	۱۲۸
جدول الف-۲- استفاده از TLD ها در سطح بین المللی.....	۱۳۴
جدول الف-۳- کاربرد سیستم های جداگر لرزه ای و استهلاك انرژی.....	۱۶۳
جدول الف-۴- مقایسه میراگرهای غیرفعال مورد استفاده برای کاهش پاسخ لرزه ای سازه ها.....	۱۶۷

فهرست اشکال

عنوان	صفحه
شکل ۱-۲- منحنی ساده شده نیرو- تغییر مکان.....	۵۴
شکل ۲-۲- منحنی ساده شده نیرو-تغییر مکان.....	۵۸
شکل ۳-۲- منحنی نیرو-تغییر مکان خطی، معادل و غیر خطی.....	۵۸
شکل ۱-۳- اجزای در ترکیب با ابزارهای اتلاف انرژی.....	۷۱
شکل ۲-۳- تاثیر انواع میراگرها بر پاسخ نیرو-تغییر مکان سازه.....	۷۲
شکل ۳-۳- نمودار چرخه‌ای ایده‌آل بار-تغییر مکان برای میراگرهای وابسته به تغییر مکان.....	۷۳
شکل ۴-۳- نمودار چرخه‌ای ایده‌آل بار-تغییر مکان برای میراگرهای وابسته به سرعت.....	۷۳
شکل ۵-۳- نمودار چرخه‌ای ایده‌آل بار-تغییر مکان برای میراگرهای دارای قابلیت RECENTERING.....	۷۴
شکل ۶-۳- رابطه ایده‌آل بار-تغییر مکان برای میراگر VISCOELASTIC SOLID.....	۷۵
شکل ۷-۳- سختی موثر نرمال شده (G') و ضریب میرایی (G''/ω) برای میراگر ویسکوالاستیک جامد.....	۷۵
شکل ۸-۳- مدل ویسکوالاستیک برای میراگر.....	۷۶
شکل ۹-۳- مشخصات میراگر VISCOELASTIC جامد تخمین زده شده براساس مدل خطی.....	۷۶
شکل ۱۰-۳- مدل ماکسول برای میراگرهای دارای سیال ویسکوالاستیک.....	۷۷
شکل ۱۱-۳- سیستم میراگر و قاب نگهدارنده آن به همراه قاب باربر جانبی سازه.....	۷۹
شکل ۱۲-۳- منحنی PUSHOVER و ظرفیت.....	۸۳
شکل ۱۳-۳- منحنی ایده‌آل سازی شده PUSHOVER مورد استفاده در تحلیل خطی.....	۸۴
شکل ۱۴-۳- کاهش پاسخ سازه به دلیل کاهش میرایی موثر.....	۸۶
شکل ۱۵-۳- جابجایی هارمونیک در سازه با میراگر ویسکوز غیرخطی و رابطه نیرو تغییر مکان.....	۹۱
شکل ۱۶-۳- تهیه طیف پاسخ برای میرایی‌های بیشتر از ۵ درصد.....	۱۰۰
شکل ۱۷-۳- ظرفیت و نیاز طیفی برای یک ساختمان بهسازی شده یک طبقه.....	۱۰۲
شکل ۱۸-۳- مقایسه منحنی PUSHOVER و چرخه‌های هیستریزس.....	۱۰۴
شکل ۱۹-۳- پارامترهای موثر در تحلیل غیرخطی ساده سازی شده ساختمان یک طبقه دارای میراگر ویسکوالاستیک.....	۱۰۵
شکل ۲۰-۳- تعریف زاویه و تغییر مکان نسبی در میراگرها.....	۱۰۶
شکل ۲۱-۳- معرفی پارامترهای مرتبط با تحلیل غیرخطی ساده سازی شده ساختمان یک طبقه با میراگر ویسکوز.....	۱۰۷

- شکل الف-۱- نحوه عملکرد جداساز لرزه‌ای: (الف) انتقال دوره تناوب اصلی جهت کاهش انرژی وارده، (ب) افزایش میرایی جهت محدود نمودن تغییر مکان (رابینسون ۱۹۹۸)..... ۱۱۶
- شکل الف-۲- مقایسه عملکرد سیستم جداسازی پایه با سیستم قاب معمولی (قاب خمشی)..... ۱۱۶
- شکل الف-۳- استفاده از جداساز لرزه‌ای در سازه‌های ساختمانی - بیمارستان دالوز، لیسبن، پرتغال، (ب) آزمایش انجام شده روی جداسازهای استفاده شده در این پروژه..... ۱۱۷
- شکل الف-۴- مقطع الاستومر با صفحات فولادی..... ۱۱۸
- شکل الف-۵- اجزا مختلف سیستم جداسازی لرزه‌ای سرب-لاستیک..... ۱۱۸
- شکل الف-۶- جداساز لرزه‌ای لاستیکی با میرایی بالا..... ۱۱۹
- شکل الف-۷- (الف) جداساز آونگی اصطکاکی، (ب) جداساز آونگی اصطکاکی دوگانه..... ۱۲۰
- شکل الف-۸- جداساز آونگی اصطکاکی سه‌گانه (الف) حالت سکون، (ب) حرکت آونگ داخلی در سطح زلزله بهره‌برداری،..... ۱۲۰
- (ج) حرکت آونگ پایینی در سطح زلزله طراحی، (د) حرکت آونگ بالایی در سطح حداکثر زلزله معتبر (MCE)..... ۱۲۰
- شکل الف-۹- (الف) ساختمان شهرداری اوکلند، (ب) ساختمان مرکز پست غرب ژاپن..... ۱۲۱
- شکل الف-۱۰- (الف) جداگر لرزه‌ای بیمارستان کالیفرنیا جنوبی، (ب) ساختمان اداری جداسازی شده در ایتالیا..... ۱۲۱
- شکل الف-۱۱- (الف) سازه جداسازی لرزه‌ای شده در مرکز مدیریت بحران شهری شهر فولینیو در ایتالیا، (ب) سازه جداسازی لرزه‌ای شده. (ج) سیستم جداساز لرزه‌ای در یک ساختمان ۵ طبقه در ژاپن همراه با بکارگیری سیستم میرایی..... ۱۲۲
- شکل الف-۱۲- (الف) ساختمان دادگاه استیناف ایالات متحده در شهر سان فرانسیسکو، (ب) پایانه بین‌المللی فرودگاه سان فرانسیسکو..... ۱۲۳
- شکل الف-۱۳- جداساز FPS، (الف) بکارفته در پل BENICIA MARTINEZ در سان فرانسیسکو (ونگ ۲۰۰۲)، (ب) بکاررفته در پل HERNANDO DESOTO در ممفیس..... ۱۲۳
- شکل الف-۱۴- (الف) پایانه بین‌المللی فرودگاه سیبیا-گوکن شهر استانبول، (ب) جزئیات جداساز مورد استفاده و نحوه اجرای آن..... ۱۲۴
- شکل الف-۱۵- سیستم سازه‌ای دارای میراگر با جرم متوازن..... ۱۲۵
- شکل الف-۱۶- پاسخ دینامیکی سیستم در حالت با و بدون میراگر با جرم متوازن..... ۱۲۵
- شکل الف-۱۷- طرح‌های مختلف برای میراگر جرمی تنظیم شده..... ۱۲۶
- (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..... ۱۲۶
- شکل الف-۱۸- برج جان هانکوک..... ۱۲۷
- شکل الف-۱۹- (الف) برج CITY CORP، (ب) TMD نصب شده در برج..... ۱۳۰
- شکل الف-۲۰- (الف) برج بندر چیبا، (ب) TMD نصب شده در برج..... ۱۳۰

- شکل الف-۲۱- نمونه‌ای از TMD ساخته شده با میراگر و فنر..... ۱۳۱
- شکل الف-۲۲- نمونه ای از TMD آزمایش شده بر روی میز لرزه، (ب) TMD برج TEN BOSCH ناگاساکی..... ۱۳۱
- شکل الف-۲۳- (الف) برج تایپه ۱۰۱، (ب) میراگر جرمی متوازن پاندول کابلی و میراگرهای ویسکوز..... ۱۳۲
- شکل الف-۲۴- (الف) میراگر TLD، (الف) ستونی روزنهدار، (ب) نوسانی حاوی میله و مش..... ۱۳۳
- شکل الف-۲۵- برج فرودگاه بین المللی در توکیو و نمایی از واحدهای میراگر مایع که روی برج نصب شده است..... ۱۳۵
- شکل الف-۲۶- (الف) برج کامکست، (ب) مخزن بتنی متشکل از دو بخش..... ۱۳۵
- شکل الف-۲۷- (الف) ساختمان ONE WALL CENTER در کانادا، (ب) پلان ساختمان نشان دهنده موقعیت میراگرها..... ۱۳۶
- شکل الف-۲۸- (الف) هتل سافیتل، (ب) جزئیات میراگر مایع متوازن با قابلیت تنظیم پررود..... ۱۳۷
- شکل الف-۲۹- (الف) سیستم میراگر جاری شونده فلزی در بادبند (تایلر ۱۹۸۵)، (ب) میراگر ADAS، (ج) میراگر TADAS..... ۱۳۸
- شکل الف-۳۰- تغییر شکل ها ورق ها با شکل های گوناگون..... ۱۳۹
- شکل الف-۳۱- (الف) بادبند دارای هسته فلزی با خاصیت جاری‌شدگی، (ب) مقایسه رفتار چرخه‌ای بادبند کمانش ناپذیر با بادبند معمولی..... ۱۴۰
- شکل الف-۳۲- (الف) ساختمان فدرال WALLACE F. BENNETT، (ب) مقاوم سازی با بادبندهای BRB..... ۱۴۱
- شکل الف-۳۳- (الف) بیمارستان KAISER SANTA CLARA، (ب) بکارگیری بادبندهای BRB..... ۱۴۲
- شکل الف-۳۴- (الف) میراگر اصطکاکی صرفاً کششی (ب) میراگر اصطکاکی انتقالی (ج) میراگر سومیتسو (د) میراگر اصطکاکی - دورانی..... ۱۴۳
- شکل الف-۳۵- میراگر اصطکاکی صرفاً کششی مورد استفاده در دانشگاه کُنکُردیا..... ۱۴۶
- شکل الف-۳۶- (الف) ساختمان برج ترمینال آبنوباشی، (ب) سیستم میرایی اصطکاکی - دورانی..... ۱۴۷
- شکل الف-۳۷- نمونه کاربردی میراگر ویسکو الاستیک و منحنی هیستریزیس آن..... ۱۴۸
- شکل الف-۳۸- جزئیات میراگر با سیال ویسکوز..... ۱۴۸
- شکل الف-۳۹- جایگذاری میراگر با سیال ویسکوز در یک قاب سازهای..... ۱۴۹
- شکل الف-۴۰- نحوه انتقال انرژی به صورت هدفمند..... ۱۵۰
- شکل الف-۴۱- نحوه عملکرد سیستم کنترل فعال..... ۱۵۱
- شکل الف-۴۲- شماتیک سیستم AMD..... ۱۵۲
- شکل الف-۴۳- اولین نمونه دستکاه AMD در ژاپن..... ۱۵۳
- شکل الف-۴۴- جرم میراگر فعال (AMD) نصب شده بر روی محل فرود هلی کوپتر در یکی از ساختمان های ژاپن..... ۱۵۳
- شکل الف-۴۵- جرم میراگر فعال: (الف) جک‌های جرم میراگر فعال نصب شده در زیر محل فرود هلی کوپتر، (ب) لایه‌های تکیه گاهی..... ۱۵۳
- شکل الف-۴۶- شماتیک سیستم تاندون فعال..... ۱۵۴
- شکل الف-۴۷- شماتیک سیستم مهاربند فعال..... ۱۵۵

- شکل الف-۴۸- نحوه عملکرد سیستم کنترل نیمه فعال..... ۱۵۶
- شکل الف-۴۹- میراگر با دریچه متغیر..... ۱۵۷
- شکل الف-۵۰- میراگر روزنه متغیر نصب شده بر روی پل اینتر استیت در اکلاهاما..... ۱۵۸
- شکل الف-۵۱- شماتیک وسیله سختی متغیر نیمه فعال..... ۱۵۸
- شکل الف-۵۲- بکارگیری میراگرهای با سختی متغیر در ساختمان مرکز تحقیقات KOBORI..... ۱۵۹
- شکل الف-۵۳- میراگر با جرم متوازن نیمه فعال..... ۱۶۰
- شکل الف-۵۴- نمونه‌ای از میراگرهای MR با مقیاس کوچک..... ۱۶۱
- شکل الف-۵۵- پل کابلی EILAND، واقع در هلند، تقویت شده با میراگر MR در سال ۲۰۰۴ میلادی..... ۱۶۲
- شکل الف-۵۶- پل کابلی DUBROVNIK، تقویت شده با میراگر MR در سال ۲۰۰۶ میلادی..... ۱۶۲
- شکل الف-۵۷- نخستین کاربرد سیستمهای نیمه فعال در ساختمان NIHON – KAGAKU – MIRAIKAN (موزه ملی توکیو)..... ۱۶۲

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.

۲-۱- 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 پیچشی در پلان:** در صورتیکه بیشترین دریافت (گریز) طبقه، با در نظر گرفتن پیچش تصادفی و ضریب بزرگنمایی پیچش $A_j=1.0$ ، در یک انتهای سازه، بیشتر از $1/2$ برابر میانگین دریافت (گریز) طبقه در دو سمت سازه باشد، سازه دارای نامنظمی پیچشی در پلان می‌باشد. ضوابط نامنظمی پیچشی تنها در سازه‌های با دیافراگم صلب و نیمه صلب اعمال می‌شود.
- نامنظمی شدید پیچشی در پلان:** در صورتیکه بیشترین دریافت (گریز) طبقه، با در نظر گرفتن پیچش تصادفی و ضریب بزرگنمایی پیچش $A_j=1.0$ ، در یک انتهای سازه، بیشتر از $1/4$ برابر میانگین دریافت (گریز) طبقه در دو انتهای سازه باشد، سازه دارای نامنظمی پیچشی شدید در پلان می‌باشد. ضوابط نامنظمی پیچشی شدید 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 سختی های 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 سختی های 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 می باشد.

نامنظمی جرمی در ارتفاع: در شرایطی که جرم طبقه ای (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.

۳-۱- ضوابط عمومی طراحی

۱-۳-۱- طراحی لرزه ای

طراحی لرزه ای سازه های 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 دريغت (گريز) مجاز می باشد.

۱-۳-۲-۱- سیستم باربر جانبی

سازه های مجهز به سیستم میرایی لازم است دارای سیستم باربر جانبی بگونه ای 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 لرزه ای برای طراحی سیستم باربر جانبی نباید از V_{min} کمتر در نظر گرفته شود V_{min} از بزرگ ترین مقادیر محاسبه شده از روابط ۱-۱ و ۲-۱ بدست می آید.

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

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

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، β_I (در پریود 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 $1/0V$ 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 ۲-۷-۱ 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 ۱-۸-۲-۱ 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 گرفته‌است نیز می‌شود (شکل ۱-۳-۱ 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 ۱-۸-۲-۶ 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 فصل سوم ارائه شده‌است.

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 فصل سوم راهنما ارائه شده‌است. (سازه بر روی سایت با S_{D1} بزرگتر و یا مساوی مقادیر ارائه شده در جدول ۱-۱ باشد.)

جدول ۱-۱- مقادیر SD_1 بر حسب نوع خاک

نوع خاک	SD_1
I	۰/۴
II	۰/۵۲
III	۰/۶
IV	۰/۹۶

۱-۳-۲- 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 SD_1 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 SD_1 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 ۴-۱ 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 ۵-۱ 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 ثقلی.
 - ۵- زوال اجزای میراگر در اثر خوردگی یا سایش، تجزیه بیولوژیکی، رطوبت یا قرار گرفتن در معرض مواد شیمیایی.
- قرار گرفتن در معرض شرایط محیطی شامل، دما، رطوبت، تابش (به عنوان مثال نور فرابنفش)، و مواد خورنده 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.

کاربرد میراگرهای با سطوح اصطکاک فلز روی فلز به دلیل امکان ایجاد جوشهای سرد در سطح لغزش در سیستم میرایی ممنوع می‌باشد.

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 برگیرد.

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 غیر خطی

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 باربر 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 لرزه ای از $1/5$ برابر مقاومت اسمی آن تجاوز نکند، می توان عضو مورد نظر را به صورت خطی مدل نمود.

۱-۴-۱-۱- مدلسازی میراگر

در مدل سازی ریاضی میراگرهای وابسته به تغییر مکان، باید رفتار هیستریزیس 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 هیستریزیس در نظر گرفته شود. در مدل سازی ریاضی میراگرهای وابسته به سرعت، باید منحنی رفتاری وابسته به سرعت میراگر که با اطلاعات بدست آمده از آزمایش سازگار است، لحاظ شود. همچنین در صورت لزوم باید تغییرات این منحنی رفتاری در اثر گذشت زمان و یا تغییرات دما به طور صریح در نظر گرفته شود. اجزای میراگر که آن را به سازه متصل می نمایند، باید در مدلسازی لحاظ شوند.

- در صورت تغییر مشخصات وسایل میرایی در طول تحلیل تاریخچه زمانی، می توان از پوش پاسخ های دینامیکی تحلیل های 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 تغییر مکان 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، می توان از میانگین مقادیر نیروهای میراگر، جابجایی، و سرعت های بدست آمده از تحلیل ها 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 سرعت های بدست آمده از تحلیل ها جهت طراحی استفاده نمود. در این راستا باید حداقل از سه زوج شتابنگاشت استفاده گردد.

۱-۴-۲- روش استاتیکی غیرخطی

مدل سازی استاتیکی غیرخطی ذکر شده در دستورالعمل ۳۶۰ و نیروهای جانبی ناشی از آن باید بر سیستم لرزه ای مقاوم در برابر زلزله اعمال شوند. نتایج منحنی های نیرو-جابجایی ناشی از تحلیل باید به جای جابجایی تسلیم موثر فرضی، D_Y ، در معادله ۵۴-۱ استفاده شود تا شکل پذیری موثر مورد نیاز ناشی از زلزله طرح، μ_D و بشینه زلزله

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

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- 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 سیستم های لرزه ای در نظر گرفته شود. سختی و خصوصیات میراگر استفاده شده در مدل باید بر اساس آزمایش میراگر مطابق با بخش ۱۰-۱ بدست آید. همچنین سختی الاستیک المان های 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 می توان 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 می توان 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 لرزه ای

۱-۲-۵-۱- برش پایه لرزه ای

برش پایه لرزه ای، V ، سازه در جهت مورد نظر باید از ترکیب مولفه های برش پایه مودال، V_m ، تعیین گردد به طوریکه رابطه ۳-۱ برقرار باشد.

$$V \geq V_{\min} \quad (3-1)$$

برش پایه لرزه ای، V ، سازه باید با روش جذر مجموع مربعات (SRSS) یا روش CQC، مولفه های برش پایه مودال، V_m ، تعیین شود.

۱-۵-۲-۲- 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:

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

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

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

۱-۵-۲-۳- ضریب مشارکت مودی

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

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

Φ_{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 ۶-۱ و ۷-۱ تعیین شود.

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

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

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 ۸-۱ و ۹-۱ تعیین شود.

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

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

۱-۵-۲-۶- ضریب پاسخ لرزه‌ای موده‌های بالاتر

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

$$C_{Sm} = \left(\frac{R}{C_d}\right) \frac{S_{D1}}{\Omega_o B_{mD}} \quad \text{برای } T_m < T_s \quad (۱۰-۱)$$

$$C_{Sm} = \left(\frac{R}{C_d}\right) \frac{S_{D1}}{T_m (\Omega_o B_{mD})} \quad \text{برای } T_m \geq T_s \quad (۱۱-۱)$$

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

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

۱-۵-۲-۷- نیروی جانبی طرح

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

$$F_{im} = w_i \phi_{im} \frac{\Gamma_m}{W_m} V_m \quad (۱۲-۱)$$

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، δ_{iD} و δ_{iM} ، دریافت طبقه Δ_D و Δ_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 مود m ام ارتعاش سازه، δ_{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 مود m ام، در جهت مورد نظر می‌باشد. 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.

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

تغییر مکان بام سازه در مود اصلی ($m=1$) 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.

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

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

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

۱-۳-۵-۳- دریافت طبقه ناشی از زلزله طرح

دریافت طرح طبقه در مود اصلی، Δ_{1D} ($m=1$)، و در مودهای بالاتر ارتعاش سازه، Δ_{mD} ($m>1$)، در جهت مورد نظر باید با استفاده از جابجایی مودال سقف، ارائه شده در بخش ۱-۳-۵-۲ تعیین شود. دریافت کل طرح طبقه، Δ_D ، باید با استفاده از روش SRSS و یا روش CQC دریافت مودال زلزله طرح تعیین شود.

۱-۳-۵-۴- 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.

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

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

سرعت کل طرح طبقه، V_D ، باید با استفاده از روش SRSS و یا روش CQC سرعت های 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 ۱-۱۸ و ۱-۱۹ محاسبه شود.

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

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

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

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

۱-۶-۱- روش نیروی جانبی معادل

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

۱-۶-۱-۱- 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).

۱-۶-۲- سیستم باربر لرزه‌ای

۱-۶-۲-۱- برش پایه

برش پایه سیستم باربر لرزه‌ای، V ، در جهت مورد نظر باید با ترکیب دو مولفه مودی، V_1 و V_R با توجه به رابطه ۲۰-۱ 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 ۱-۶-۲-۶ تعیین شده است.

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

۱-۶-۲-۲- برش پایه مود اصلی

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

$$V_1 = C_{s1} \bar{W}_1 \quad (21-1)$$

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

۱-۶-۲-۳- مشخصات مود اصلی

شکل مد اصلی، ϕ_{il} ، و ضریب مشارکت Γ_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.

$$\phi_{il} = \frac{h_i}{h_r} \quad (22-1)$$

$$\Gamma_1 = \frac{\bar{W}_1}{\sum_{i=1}^n w_i \phi_{il}} \quad (23-1)$$

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

پیرو اصلی، T_1 ، باید با تحلیل دینامیکی و استفاده از مشخصات الاستیک سازه و خصوصیات تغییرشکل المانهای مقاوم یا رابطه ۲۴-۱ 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

δ_i : تغییرشکل الاستیک در تراز i ام سازه ناشی از نیروی جانبی اعمالی f_i

۱-۶-۲-۴- 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)

۱-۶-۲-۵- 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.

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

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

۱-۶-۲-۶- 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 باقی مانده سازه (رابطه ۱-۳۲)

۱-۶-۲-۷- مشخصات سایر مودها

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

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

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

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

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

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

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

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

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

۱-۶-۲-۹- نیروی جانبی طرح

نیروی جانبی طرح در المان‌های سیستم باربر 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 ۱-۳۴ و ۱-۳۵ تعیین شود.

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

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

نیروهای طرح در المان‌های سیستم باربر 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 جهت‌گیری هر وسیله در افق را در نظر گرفته شده و اثر افزایش پاسخ ناشی از پیچش مورد نیاز سیستم باربر لرزه‌ای لحاظ گردد.

تغییر شکل کف در تراز i ام، δ_{iD} و δ_{iM} ، دریافت طبقه Δ_D و Δ_M ، سرعت های 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 δ_{iD} و δ_{iRD} در مرکز سختی تراز i ام سازه در جهت مورد نظر باید از رابطه ۳۷-۱ و ۳۸-۱ تعیین شود.

$$\delta_{iD} = D_{iD} \phi_{i1} \quad (۳۷-۱)$$

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

D_{iD} : تغییر مکان طراحی مود اصلی در مرکز سختی تراز بام سازه در جهت مورد نظر با توجه به بخش ۲-۳-۶-۱
 D_{iRD} : تغییر مکان طراحی مودهای باقی مانده در مرکز سختی تراز بام سازه در جهت مورد نظر با توجه به بخش ۲-۳-۶-۱.

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

تغییر مکان مودهای اصلی و مودهای باقی مانده ناشی از زلزله طرح، D_{iD} ، D_{iRD} ، در مرکز سختی تراز بام سازه در جهت مورد نظر با توجه به روابط ۳۹-۱ و ۴۰-۱ تعیین شود.

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

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

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

۱-۳-۶-۳- دریافت طبقات در زلزله طرح

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

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

Δ_{iD} : دریافت طرح طبقه ناشی از مود اصلی ارتعاش سازه در جهت مورد نظر

Δ_{iRD} : دریافت طرح طبقه ناشی از مودهای باقی مانده ارتعاش سازه در جهت مورد نظر

دریافت های مودال طرح طبقه، Δ_{iD} ، Δ_{iRD} باید از تفاضل تغییر شکل های بالا و پایین طبقه با در نظر گرفتن تغییر شکل های کف در بخش ۱-۳-۶-۱ باید تعیین شوند.

۱-۳-۴- سرعت طبقه در زلزله طرح

سرعت‌های طرح طبقه، ∇_D ، در جهت مورد نظر باید از روابط ۱-۴۱ تا ۱-۴۳ محاسبه شوند.

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

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

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

∇_{1D} : سرعت طرح طبقه ناشی از مود اصلی ارتعاش سازه در جهت مورد نظر

∇_{RD} : سرعت طرح طبقه ناشی از مودهای باقی‌مانده ارتعاش سازه در جهت مورد نظر

۱-۳-۵- 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 ۱-۳-۶، ۲-۳-۶، ۳-۳-۶ و ۴-۳-۶ 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.

$$D_{1M} = \left(\frac{g}{4\pi^2}\right) \Gamma_1 \frac{S_{MT1M}^2}{B_{1M}} \geq \left(\frac{g}{4\pi^2}\right) \Gamma_1 \frac{S_{MT1}^2}{B_{1E}} \quad T_{1M} < T_s \quad (۱-۴۴ \text{ الف})$$

$$D_{1M} = \left(\frac{g}{4\pi^2}\right) \Gamma_1 \frac{S_{M1T1M}}{B_{1M}} \geq \left(\frac{g}{4\pi^2}\right) \Gamma_1 \frac{S_{M1T1}}{B_{1E}} \quad T_{1M} \geq T_s \quad (۱-۴۴ \text{ ب})$$

$$D_{RM} = \left(\frac{g}{4\pi^2}\right) \Gamma_R \frac{S_{M1TR}}{B_R} \leq \left(\frac{g}{4\pi^2}\right) \Gamma_R \frac{S_{MT_R}^2}{B_R} \quad (۱-۴۵)$$

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 فصل سوم 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 فصل سوم دستورالعمل ارائه شده است.

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

۱-۷- اصلاح پاسخ میرایی

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

۱-۷-۱- 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 ۲-۱ درون یابی شود. لازم به ذکر است که مقادیر β مفهومی متناظر با ضریب اصلاح طیف پاسخ براساس میزان میرائی خواهند داشت.

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

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

۲-۷-۱ - میرایی موثر

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

$$\beta_{mD} = \beta_1 + \beta_{Vm}\sqrt{\mu_D} + \beta_{HD} \quad (45-1)$$

$$\beta_{mM} = \beta_1 + \beta_{Vm}\sqrt{\mu_M} + \beta_{HM} \quad (46-1)$$

β_{HD} : جزء میرایی موثر در سازه در جهت مورد نظر ناشی از رفتار هیستریک پس از جاری شدگی (post-yield) سیستم باربر لرزه ای و المان های سیستم میرایی در شکل پذیری موثر مورد نیاز، μ_D
 β_{HM} : جزء میرایی موثر در سازه در جهت مورد نظر ناشی از رفتار هیستریک پس از جاری شدگی (post-yield) سیستم باربر لرزه ای و المان های سیستم میرایی در شکل پذیری موثر مورد نیاز، μ_M
 β_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 لرزه ای

β_{Vm} : جزء میرایی موثر در مود m ام ارتعاش سازه در جهت مورد نظر ناشی از میرایی ویسکوز توسط سیستم میرایی در تغییر مکان موثر تسلیم یا دقیقاً زیر این مقدار در سیستم باربر لرزه ای

μ_D : شکل پذیری موثر مورد نیاز در سیستم باربر لرزه ای در جهت مورد نظر ناشی از زلزله طرح

μ_M : شکل‌پذیری 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، شکل‌پذیری موثر مورد نیاز در مودهای بالاتر ارتعاش در جهت مورد نظر باید $1/0$ در نظر گرفته شود.

۱-۲-۷-۱- میرایی ذاتی

میرایی ذاتی، β_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.

۱-۲-۷-۲- 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.

$$\beta_{HD} = q_H(0.64 - \beta_1)(1 - \frac{1}{\mu_D}) \quad (۴۷-۱)$$

$$\beta_{HM} = q_H(0.64 - \beta_1)(1 - \frac{1}{\mu_M}) \quad (۴۸-۱)$$

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

μ_D : شکل‌پذیری موثر مورد نیاز در سیستم باربر لرزه‌ای در جهت مورد نظر ناشی از زلزله طرح

μ_M : شکل‌پذیری 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 مودهای بالاتر ارتعاش در جهت مورد نظر باید صفر در نظر گرفته شود.

۱-۲-۲-۷-۱- 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 هیستریزیس سیستم باربر لرزه‌ای باید برای طراحی استفاده شود. بدین منظور ضریب اصلاح q_H با استفاده از رابطه ۴۹-۱ محاسبه می‌شود.

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

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 فصل سوم 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، β_{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، δ_{im}

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

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

δ_{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 جهت گیری 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 انعطاف پذیری المانها شامل پینها، پیچها، ورقهای اتصال، مهاربندهای کشش و اجزاء دیگر که میراگر را به المانهای دیگر سازه متصل می کنند، کاهش یابد.

۱-۷-۳- شکل پذیری موثر مورد نیاز

در سیستم باربر لرزه ای، شکل پذیری موثر مورد نیاز ناشی از زلزله طرح، μ_D و ناشی از بیشترین زلزله مورد نظر (MCE)، μ_M باید با استفاده از روابط ۱-۵۲ الی ۱-۵۴ محاسبه شوند.

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

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

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

D_{1D} : تغییر مکان طراحی مد اصلی در مرکز سختی تراز بام سازه در جهت مورد نظر با توجه به بخشهای ۱-۵-۳-۲ و ۱-۶-۳-۲

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

D_Y : تغییرمکان در مرکز سختی تراز بام سازه در نقطه تسلیم موثر سیستم باربر لرزه‌ای

R : ضریب رفتار طبق استاندارد ۲۸۰۰

C_d : ضریب تشدید تغییر شکل طبق استاندارد ۲۸۰۰

Ω_0 : ضریب اضافه مقاومت طبق استاندارد ۲۸۰۰

T_1 : ضریب مشارکت مود اصلی ارتعاش سازه در جهت مورد نظر، مطابق بخش‌های ۱-۲-۵-۳ یا ۱-۲-۶-۳ ($m=1$)

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

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

شکل‌پذیری مورد نیاز طرح، μ_D ، نباید از بیشینه مقدار شکل‌پذیری نیاز موثر، μ_{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، μ_{max} ، از روابط ۱-۵۵ و ۱-۵۶ محاسبه شود.

$$T_{1D} \leq T_S \quad (1-55)$$

$$\mu_{max} = 0.5[(R/(\Omega_0 I_e))^2 + 1]$$

$$T_1 \geq T_S \quad (1-56)$$

$$\mu_{max} = R/(\Omega_0 I_e)$$

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 μ_{max} ، باید از درون‌یابی خطی بین مقادیر روابط ۱-۵۵ و ۱-۵۶ تعیین شود.

۱-۸-۱- 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 ۱-۸-۲ مورد بررسی قرار گیرد.

۱-۸-۱-۱- روش‌های غیرخطی

اگر از روش‌های غیرخطی در تحلیل استفاده می‌شود، سیستم باربر 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 لرزه ای باید ضوابط مقاومتی ارائه شده در استاندارد ۲۸۰۰ تحت برش پایه لرزه ای، V_{min} ، ارائه شده در بخش ۱-۲-۳-۱ در نظر گرفته شود. دریافت طبقه باید برای زلزله طرح تعیین شود.

۱-۱-۸-۲- سیستم های میرایی

مشخصات و ابعاد میراگر و اتصالات آن باید با توجه به نیروها، تغییرمکان ها و سرعت های بیشترین زلزله مورد نظر (MCE) تعیین شوند.

۱-۱-۸-۳- ترکیب اثرات بارگذاری

اثر بارهای ثقلی و لرزه ای روی سیستم میرایی، باید با توجه به بخش ۱-۲-۸-۳ با استفاده از اثر افقی نیروی زلزله، Q_E ، که طبق تحلیل ها 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.

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

مولفه های سیستم میرایی باید با استفاده از معیارهای پذیرش مقاومت این استاندارد و نیروهای لرزه ای و شرایط بارگذاری لرزه ای 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.

۱-۸-۲- روش های 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 لرزه ای و معیارهای پذیرش باید مطابق با ضوابط این بند باشند.

۱-۲-۸-۱- سیستم باربر لرزه ای

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 لرزه ای صادق باشند.

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

۱-۸-۲-۲- سیستم میرایی

سیستم میرایی باید ضوابط استاندارد ۲۸۰۰ برای نیروهای لرزه‌ای طرح و شرایط بارگذاری لرزه‌ای مشخص شده در این بخش را تامین نماید. المان‌های کنترل شونده توسط نیرو در سیستم میرایی باید برای نیروهای لرزه‌ای افزایش داده شده به مقدار ۱.۲ برابر پاسخ‌های لرزه‌ای منتج از زلزله MCE طراحی شوند.

۱-۸-۲-۳- 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 ۱-۸-۲-۵ مشخص شده)، مطابق با بخش ۱-۸-۲-۳-۱ ترکیب شوند. فاکتور افزایش، ρ ، 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.

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

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

$$E_h = \rho Q_E \quad (1-57)$$

۱-۸-۲-۳-۲- نیروی قائم زلزله

نیروی قائم زلزله از رابطه ۱-۵۸ بدست می‌آید.

$$E_v = 0.2 S_{DS} D \quad (1-58)$$

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

D : بار مرده

۱-۸-۲-۳-۳- ترکیب بارهای لرزه‌ای

ترکیب بارها برای طراحی، مطابق با آخرین ویرایش مبحث ششم مقررات ملی ساختمان می‌باشند.

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

نیروهای مودال طراحی سیستم میرایی باید بر اساس نوع میراگر و تغییرمکان‌های مودال طراحی طبقه و سرعت‌های تعیین شده در هر یک از بخش‌های ۱-۵-۳ یا ۱-۶-۳ محاسبه شوند.

۱- در صورتیکه جهت تایید بیشینه پاسخ‌ها نیاز به تحلیل تاریخچه زمانی باشد، باید در صورت لزوم تغییرمکان مودال طراحی طبقه و سرعت‌ها برای پوشش کل تغییرمکان‌های طراحی طبقه و سرعت‌های مشخص شده با توجه به بخش ۱-۴ افزایش یابد. میراگرهای وابسته به تغییر مکان: نیروی طراحی لرزه‌ای در میراگرهای وابسته به

تغییرمکان، باید بر اساس بیشینه نیروی میراگر در تغییرمکان‌های ایجاد شده تا تغییرمکان نظیر دریافت طراحی طبقه، Δ_D ، باشد.

۲- میراگرهای وابسته به سرعت: نیروی طراحی لرزه‌ای در هر مد ارتعاش در میراگرهای وابسته به سرعت باید بر اساس بیشینه نیروی میراگر در سرعت‌های 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 می‌باشد:

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

$$Q_E = \Omega_0 \sqrt{\sum_m (Q_{mSFRS})^2} \pm Q_{DSD} \quad (1-59)$$

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 می‌باشد.

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.

$$Q_E = \sqrt{\sum_m (Q_{mSDV})^2} \quad (1-60)$$

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 می‌باشد.

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 شبه استاتیکی، محاسبه شوند. راستای اعمال نیروهای طراحی مودال باید همراستا با شکل مودی مود مورد نظر باشد. نیروهای تکیه گاه‌های افقی باید در هر تراز، i ، سیستم تغییرشکل نیافته سیستم میرایی، همزمان با نیروهای طراحی وسیله میراگر وابسته به سرعت به گونه‌ای که تغییرمکان افقی در هر تراز برابر صفر شود، اعمال شوند. در هر تراز، i ، نیروهای تکیه گاهی باید متناسب بوده و در محل هر مرکز جرم قرار گیرد.

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

$$Q_E = \sqrt{\sum_m (C_{mFD} \Omega_o Q_{mSF} + C_{mFV} Q_{mDSV})^2} \pm Q_{DSD} \quad (۱-۶۱)$$

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، α ، که نیروی میراگر را به سرعت میراگر وابسته می‌کند، تعیین گردند. مقدار توان سرعت، α ، براساس مطالب مندرج در تفسیر این دستورالعمل محاسبه می‌شود.

جدول ۱-۳- ضرایب نیرو C_{mFD}

	$\mu \leq 1/0$				
$C_{mFD}=1/0$ (۳)	$\alpha \geq 1/0$	$\alpha = 0/75$	$\alpha = 0/5$	$\alpha \leq 0/25$	میرایی موثر
$\mu \geq 1/0$	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	$\geq 1/0$

^۱ مقدار C_{mFD} برای سیستم‌های ویسکوالاستیک برابر ۱/۰ در نظر گرفته می‌شود.

^۲ در مورد سایر ضرایب توان سرعت، α ، و نیاز شکل پذیری، μ ، می‌توان از درون یابی استفاده نمود.

^۳ برای نیاز شکل پذیری، μ ، 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 ($\beta_{1D} - \beta_{HD}$) یا ($\beta_{1M} - \beta_{HM}$) 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 α برابر ۱ بدست آیند. میرایی مودال موثر باید برابر میرایی موثر کل مود مورد نظر (β_{mD} یا β_{mM}) در نظر گرفته شود. برای تعیین ضریب C_{mFD} ، نیاز شکل‌پذیری باید برابر نیاز شکل‌پذیری مود اصلی ($\mu = \mu_D$ یا $\mu = \mu_M$) فرض شود.

جدول ۴-۱- ضرایب نیرو $C_{mFV}^{۲-۱}$

میرایی موثر	$\alpha \leq ۰/۲۵$	$\alpha = ۰/۵$	$\alpha = ۰/۷۵$	$\alpha \geq ۱/۰$
$\leq ۰/۰۵$	۱/۰۰	۰/۳۵	۰/۲۰	۰/۱۰
۰/۱	۱/۰۰	۰/۴۴	۰/۳۱	۰/۲۰
۰/۲	۱/۰۰	۰/۵۶	۰/۴۶	۰/۳۷
۰/۳	۱/۰۰	۰/۶۴	۰/۵۸	۰/۵۱
۰/۴	۱/۰۰	۰/۷۰	۰/۶۹	۰/۶۲
۰/۵	۱/۰۰	۰/۷۵	۰/۷۷	۰/۷۱
۰/۶	۱/۰۰	۰/۸۰	۰/۸۴	۰/۷۷
۰/۷	۱/۰۰	۰/۸۳	۰/۹۰	۰/۸۱
۰/۸	۱/۰۰	۰/۹۰	۰/۹۴	۰/۹۰
۰/۹	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰
$\geq ۱/۰$	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰

^۱ مقدار C_{mFV} برای سیستم های ویسکوالاستیک برابر ۱/۰ در نظر گرفته می شود، مگر نتایج تحلیل یا آزمایش مقادیر دیگری نشان دهند

^۲ در مورد سایر ضرایب توان سرعت، α ، می توان از درون یابی استفاده نمود.

۱-۸-۲-۶- حدود پاسخ غیرخطی

پاسخ المان های سیستم میرایی می توانند 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 ۱-۸-۲-۵ با در نظر گرفتن Ω_0 برابر با ۱/۰ نباید از مقاومت مورد نیاز بر اساس ترکیب بارهای بخش ۱-۸-۲-۳ بیشتر شود.

۱-۹- بررسی طراحی

بررسی طراحی سیستم میرایی و برنامه های آزمایش باید توسط یک تیم طراحی حرفه ای مستقل در زمینه روش تحلیل لرزه ای 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 لرزه ای ویژه ساختگاه، شامل تهیه طیف ویژه ساختگاه و تاریخچه حرکات زمین و تمامی معیارهای دیگر طراحی مربوط به پروژه.

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

۳. بررسی طراحی نهایی سیستم باربر لرزه ای و سیستم میرایی و تمامی تحلیل های تکمیلی

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

۱-۱۰-۱- 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 نمونه های شاهد میراگر و میراگرهای تولیدی باید یکسان باشد.

۱-۱۰-۱-۱- 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 نمونه های شاهد و تولید تامین گردند.

۱-۱۰-۱-۱- ثبت اطلاعات

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

۱-۱۰-۱-۲- 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. ($f_1=1/T_1$).

می‌توان به عنوان روش جایگزین از پروتکل‌های بارگذاری که جابجایی کل باد را به مولفه‌های استاتیکی، شبه استاتیکی و دینامیکی مورد انتظار تقسیم می‌کند، استفاده کرد.

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 در دمای محیط و به ترتیب زیر در سیکل‌های سینوسی کامل زیر با فرکانس معادل $1/1.5T_1$ بارگذاری شود.

الف- ده سیکل کامل با جابجایی دستگاه میراگر متناظر با $0/33$ برابر جابجایی دستگاه تحت بیشترین زلزله مورد انتظار (MCE)

ب- پنج سیکل کامل با جابجایی دستگاه میراگر متناظر با $0/67$ برابر جابجایی دستگاه تحت بیشترین زلزله مورد انتظار (MCE)

پ- سه سیکل کامل با جابجایی دستگاه میراگر متناظر با $1/0$ برابر جابجایی دستگاه تحت بیشترین زلزله مورد انتظار (MCE)

ت- در میراگرهای وابسته به سرعت در صورتی که آزمایش بند پ نیرویی در دستگاه میراگر تولید کند که کمتر از نیروی بدست آمده از تحلیل تحت زلزله MCE باشد، این آزمایش باید با فرکانسی که نیرویی برابر یا بیشتر از نیروی حاصل از تحلیل تحت زلزله MCE تولید می‌کند تکرار شود.

۳- در صورت تغییر مشخصات میرایی وسیله با دمای محیطی، میراگر باید اضافه بر آزمایش در دمای محیطی، حداقل در دو دمای (کمترین دما و بیشترین دما) تحت آزمایش های بند ۲ قرار گیرد.

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

الف- روش‌های جایگزین، معادل ضوابط آزمایش های چرخه ای 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.

۴- اگر در میراگرهای وابسته به سرعت تغییرات مشخصات نیرو-تغییر شکل میراگر در تغییر مکانی معادل با بیشترین تغییر مکان میراگر یا کمتر از این مقدار، در محدوده فرکانس آزمایش از $1/1.5T_1$ تا $2/5/T_1$ بیش از ۱۵٪ باشد، آزمایش های تکمیلی بند ۲ در فرکانس‌های معادل $1/T_1$ و $2/5/T_1$ باید اعمال شود.

در صورتی که آزمایش تمام مقیاس دینامیکی بدلیل محدودیت‌های دستگاه آزمایش میسر نباشد، می‌توان از نمونه‌های شاهد با مقیاس کاهش یافته برای تأیید مشخصات وابسته به فرکانس میراگرها استفاده کرد، با این شرط که اصول مقیاس کردن و شبیه‌سازی در طراحی دستگاه‌های با مقیاس کاهش یافته و پروتکل‌های آزمایش رعایت گردد.

۱-۱۰-۳- آزمایش میراگرهای مشابه

در صورتی که آزمایش قبلی نمونه شاهد که تمامی شروط زیر را برآورده سازد موجود باشد، نیازی به آزمایش نمونه شاهد روی یک میراگر خاص نمی‌باشد:

۱- دارای ابعاد، ساختار داخلی و فشارهای داخلی (در صورت وجود) مشابه با میراگر مد نظر باشد.

۲- نوع و مصالح آن با میراگر مدنظر یکسان باشد.

۳- با استفاده از مستندات تولید و روند کنترل کیفیت مشابه با میراگر مد نظر ساخته شده باشد.

۴- تحت بارها و جابجایی‌های مشابه (با اختلاف کمتر از ۲۰٪) با بارهای مورد نیاز میراگرهای مدنظر آزمایش شده باشد.

۱-۱۰-۴- تعیین مشخصات تغییرمکان-سرعت-نیرو

مشخصات تغییرمکان-سرعت-نیرو میراگر باید بر اساس آزمایش‌های بارگذاری چرخه‌ای و تغییرمکان میراگر شاهد که پیش از این مشخص شد، تعیین گردد. برای هر چرخه تغییرشکل بایستی نیروی بیشینه و کمینه در تغییرمکان صفر، نیروی بیشینه و کمینه در بیشینه تغییرمکان دستگاه و مساحت حلقه هیستریزیس (E_{loop}) محاسبه شود. سختی موثر میراگر برای هر سیکل تغییر شکل باید از رابطه ۱-۶۲ محاسبه شود.

$$k_{eff} = \frac{|F^+| + |F^-|}{|\Delta^+| + |\Delta^-|} \quad (۱-۶۲)$$

مشخصات اسمی سیستم میرایی برای تحلیل و طراحی باید بر اساس میانگین مقادیر سه چرخه اول آزمایش در تغییرمکان مفروض تعیین گردد.

۱-۱۰-۵- کفایت میراگر

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

۱-۱۰-۵-۱- میراگر وابسته به تغییرمکان

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

- ۱- برای آزمایش ۱، هیچ اثری از خرابی شامل نشت، تسلیم یا شکست وجود نداشته باشد.
- ۲- برای آزمایش‌های ۲، ۳ و ۴، 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، ۳ و ۴، 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، ۳ و ۴، 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 توالی تستهای ۲، ۳ و ۴ برای بندهای ب و پ محاسبه شده، نباید بیشتر از ۱۵٪ با مقدار اسمی مشخص شده توسط مسئول 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، 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 آزمایش‌های ۲، ۳ و ۴ 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 آزمایش‌های ۲، ۳ و ۴، بیشترین نیرو و کمترین نیرو در تغییرمکان 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 آزمایش‌های ۲، ۳ و ۴، مساحت چرخه هیستریزیس وسیله میراگر برای هیچ یک از چرخه‌ها، نباید بیشتر از ۱۵٪ با میانگین مساحت چرخه هیستریزیس که از تمامی سیکل‌ها در آن تست در فرکانس و دمای معین محاسبه شده، اختلاف داشته باشد.
- ۵- میانگین بیشترین و کمترین نیروها در تغییرمکان صفر، سختی موثر (برای میراگرهای دارای سختی) و میانگین مساحت چرخه هیستریزیس که برای آزمایش‌های ۲، ۳ و ۴ محاسبه شده، نباید بیشتر از ۱۵٪ با مقدار هدف مشخص شده توسط مسئول طراحی سازه تغییر کند.

۱-۱۰-۲- آزمایش میراگرهای تولید شده

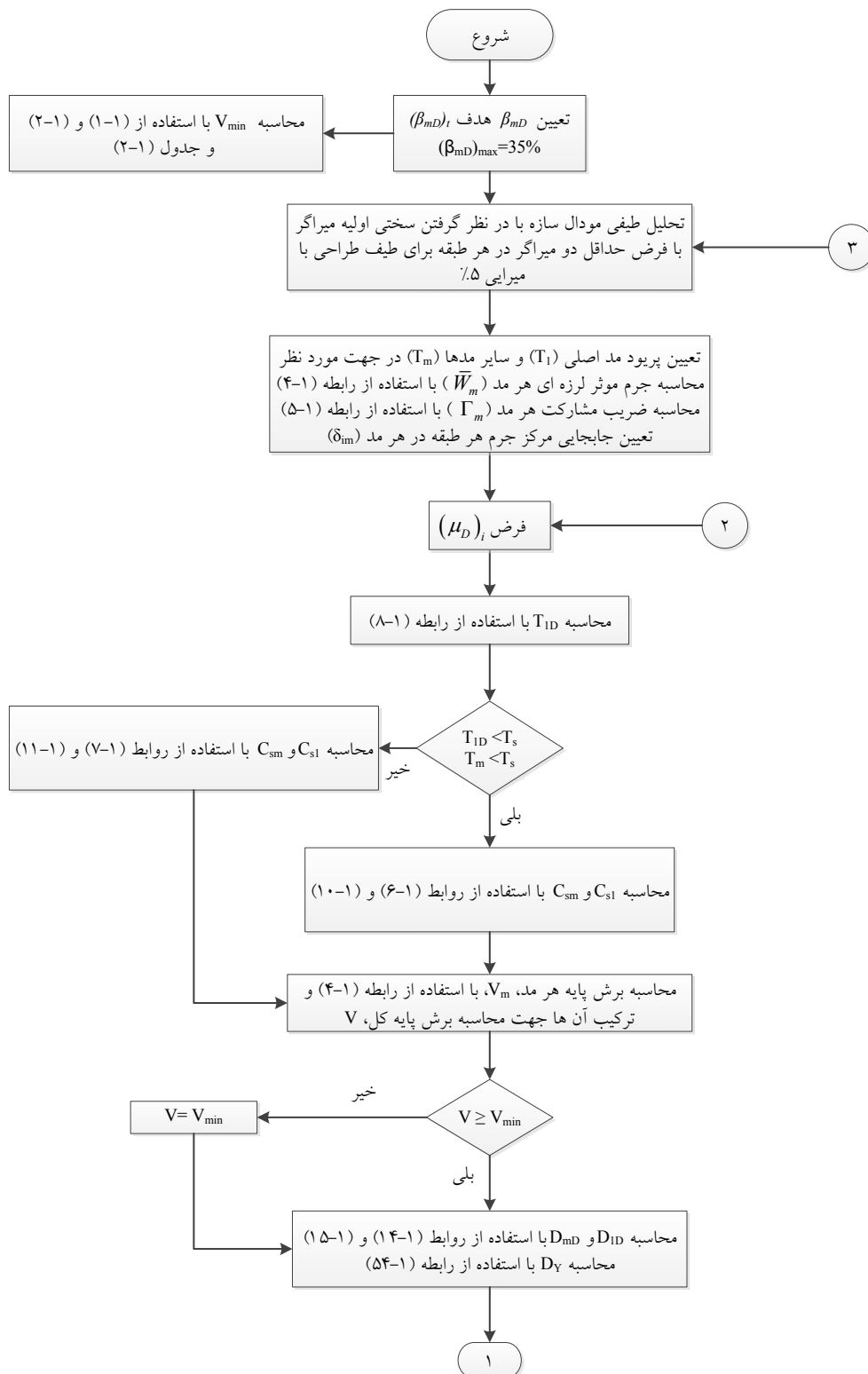
قبل از نصب در ساختمان، میراگر باید مطابق الزامات این بخش مورد آزمایش قرار گیرد. یک برنامه آزمایش برای میراگرهای تولیدی باید توسط مسئول طراحی سازه تعیین شود. این برنامه آزمایش باید مشخصات اسمی را با انجام آزمایش بر روی ۱۰۰٪ دستگاه‌ها برای سه چرخه معادل ۶۷٪ زلزله MCE در فرکانس برابر

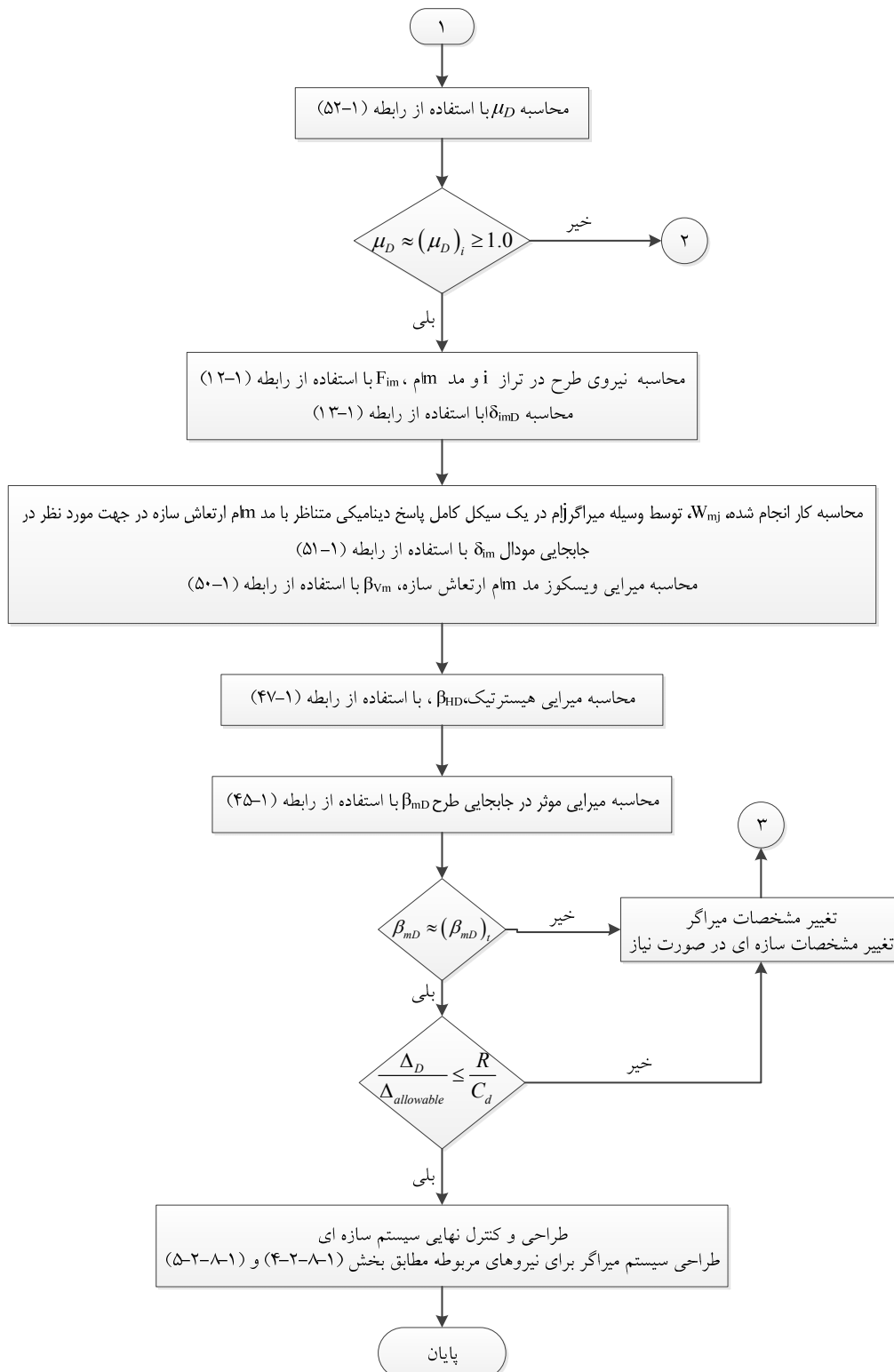
با $1/1.5T_1$ ، یا فرکانس جایگزین تعیین شده توسط مسئول طراحی سازه در صورت عدم وابستگی میراگر به سرعت، اعتبارسنجی نماید. مقادیر مشخصات اسمی بدست آمده باید در محدوده مجاز پیش گفته قرار گیرد.

تبصره: در صورتی که به گونه دیگری نشان داده شود که مشخصات میراگرهای تولیدی الزامات فنی پروژه را تامین می‌نماید، می‌توان از انجام این برنامه آزمایش صرفنظر کرد. در این موارد مسئول طراحی سازه باید یک برنامه جایگزین تعیین نماید تا از کیفیت میراگرهای نصب شده اطمینان حاصل شود. این برنامه جایگزین باید شامل آزمایش نمونه تولید شده، حداقل یک دستگاه از هر نوع و اندازه باشد، مگر آنکه آزمایش‌های نمونه شاهد مختص پروژه روی دستگاه‌های با نوع و اندازه مشابه انجام شده باشد. دستگاه‌هایی که مصالح سازنده آن متحمل تغییر شکلهای غیر ارتجاعی می‌شوند و یا طی آزمایش آسیب می‌بینند نباید در ساخت سازه استفاده شوند.

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

۲-۱ کلیات

۲-۱-۱ 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 ۳-۲ 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 ۱٪ 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 ۵٪ 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 ۴/۰ 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.

۲-۳- سطوح عملکرد

سطح عملکرد ساختمان بر مبنای عملکرد اجزای سازه‌ای و غیرسازه‌ای مطابق بندهای (۲-۳-۱) تا (۲-۳-۳) 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.

۲-۳-۳- سطوح عملکرد کل ساختمان

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

۲-۳-۱- سطح عملکرد خدمت‌رسانی بی‌وقفه (A-1) (OP¹):

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

۲-۳-۲- سطح عملکرد قابلیت استفاده بی‌وقفه (B-1) (IO²):

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

۲-۳-۳- سطح عملکرد ایمنی جانی (C-3) (LS³):

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- ایمنی جانی) باشند.

۲-۳-۴- سطح عملکرد آستانه فروریزش (E-5) (CP⁴):

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).

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 شود. 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.

¹ OP: Operational Performance

² IO: Immediate Occupancy Performance

³ LS: Life Safety Performance

⁴ CP: Collapse Prevention Performance

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 بهره برداری، سرعت، بارهای وارد و دوجته 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 قرار داشته باشد، کلیه میراگرها (وابسته به جابجائی و وابسته به سرعت) باید قادر به تحمل تغییر مکان‌هایی برابر با 130% 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 130% حداکثر سرعت محاسبه شده برای این وسیله تحت زلزله سطح خطر-۲ باشد.

۲- اگر کمتر از چهار عدد میراگر در طبقه‌ای مورد نظراز یک ساختمان، در یکی از جهات اصلی آن موجود باشد، یا کم‌تر 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 مکان‌هایی برابر با 200% 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 200% 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 ردیف‌های ۱ و ۲ بالا، رفتار آنها ارتجاعی خطی باقی بماند.

۲-۵- مدل‌سازی 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-تغییرمکان و وابستگی بین آنها، میراگرهای وابسته به تغییرمکان 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 معادله ی (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 می آید:

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

که در آن:

D^- : حداکثر تغییرمکان منفی میراگر

D^+ : حداکثر تغییرمکان مثبت میراگر

F^- : نیروی منفی میراگر در یک چرخه بارگذاری در دامنه تغییرمکان Δ^-

F^+ : نیروی مثبت میراگر در یک چرخه بارگذاری در دامنه تغییرمکان Δ^+

۲-۵-۲- میراگرهای وابسته به سرعت

۲-۵-۲-۱- میراگرهای ویسکوالاستیک جامد^۱

میراگرهای ویسکو-الاستیک جامد باید با استفاده از یک فنر و میراگر موازی (مدل کلوین) مدل سازی شوند. وابستگی ثابت های فنر و میراگر به فرکانس و دما باید با در نظر گرفتن فرکانس اصلی ساختمان بهسازی شده (f_i) و حدود دمای بهره برداری وسیله محاسبه شود. اگر پاسخ چرخه ای برای یک میراگر ویسکو-الاستیک جامد را نتوان با تخمین دقیقی از ثابت های فنر و میراگر به دست آورد، واکنش ساختمان بهسازی شده را باید با تحلیل های متوالی ساختمان با استفاده از مقادیر کرانه بالا و پایین ثابت های فنر و میراگر تخمین زد.

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

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

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_{eff} سختی مؤثر وسیله است که از معادله (۴-۲) به دست می آید:

¹ Solid viscoelastic devices

$$K_{eff} = \frac{|F^+| + |F^-|}{|D^+| + |D^-|} = k' \quad (۴-۲)$$

که در آن K' سختی ذخیره شده نامیده می‌شود.

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

$$C = \frac{W_D}{\pi \omega_1 D_{ave}^2} = \frac{K''}{\omega_1} \quad (۵-۲)$$

که در آن K'' سختی اتلاف شده، ω_1 فرکانس زاویه ای برابر با $2\pi f_1$ و D_{ave} میانگین مقادیر مطلق تغییر مکان‌های D^+ و 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).

۲-۵-۲-۲- میراگرهای ویسکو-الاستیک مایع^۱

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 ساختمان بهسازی شده را باید با تحلیل های 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).

۲-۵-۲-۳- میراگرهای ویسکوز مایع^۲

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

$$F = C_0 |\dot{D}|^\alpha \operatorname{sgn}[\dot{D}] \quad (۶-۲)$$

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

^۱ Fluid viscoelastic devices

^۲ Fluid viscos devices

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.
- 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 می‌شود، 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 هریک از طبقات، که از تحلیل مودال با مشارکت جرمی ۹۰ درصد حاصل شده‌است، 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 50% مقاومت بقیه قاب (بدون این وسایل) در آن طبقه بیش‌تر 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	β
۰/۸	۰/۸	≤ 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	≥ 50

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

$$V = C_1 C_2 C_m S_a W$$

(۷-۲)

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:

$$\begin{cases} T \leq 0.2 \rightarrow C_1 = 1 + \frac{R-1}{0.04 \alpha} \\ 0.2 \leq T \leq 1 \rightarrow C_1 = 1 + \frac{R-1}{\alpha T^2} \\ 1 \leq T \rightarrow C_1 = 1 \end{cases} \quad (۸-۲)$$

در این رابطه:

α : 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 میرایی 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 β عبارت است از میرایی سیستم قاب بندی ساختمان که باید مساوی ۰/۵٪ 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 δ_i کف های 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 طبقه ی i ام بوده و عمل جمع روی کلیه کفها انجام می گیرد.

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 (۶-۲) ضوابط زیر نیز برآورد شوند:

حداکثر مقاومت کلیه میراگرها در یک طبقه و در راستای مورد بررسی نباید از 50% 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 (۷-۲) باید توسط ضرایب اصلاح برای میرایی حاصل از جدول (۳-۱) کاهش داده شود تا اتلاف انرژی به حساب آید. اثر میرایی باید از معادله (۱۳-۲) محاسبه شود:

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

که در آن β عبارت است از میرایی قاب سازه‌ای که باید مساوی 50% گرفته شود مگر آنکه میرایی دیگری مورد نظر باشد و W_j کار انجام شده توسط وسیله j -ام در یک چرخه کامل به ازای تغییر مکان‌های δ_i کف‌های ساختمان است. عمل جمع روی کلیه میراگرهای موجود انجام می‌گیرد و W_k حداکثر انرژی کرنشی قاب می‌باشد که از رابطه (۱۲-۲) به دست می‌آید.

کار انجام شده توسط وسیله j ام در یک چرخه کامل بارگذاری را باید توسط معادله (۱۴-۲) 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 j ام و δ_{rj} تغییر مکان نسبی بین دو انتهای وسیله j ام 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:

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

که در آن θ_j زاویه شیب وسیله j ام با افق، ϕ_{rj} تغییر مکان نسبی بین دو انتهای وسیله j ام 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 تغییرمکان نسبی (دریافت) حداکثر: نیروهای جانبی در هر تراز از ساختمان باید با استفاده از معادله (۱۶-۲) محاسبه شوند.

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

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

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 تناوب های بزرگتر از $2/5$ ثانیه برابر با ۲، و برای دوره تناوب های کمتر از $0/5$ ثانیه برابر با ۱ تعیین می شود. در این بازه نیز با استفاده از درونیایی خطی مقدار K محاسبه می شود.

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 می باشد که در مرحله حداکثر تغییر مکان نسبی محاسبه شده است. 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 کف ها 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.

$$CF_1 = \cos [\tan^{-1}(2\beta_{eff})] \quad (2-17)$$

$$CF_2 = \sin [\tan^{-1}(2\beta_{eff})] \quad (2-18)$$

که در آن β_{eff} توسط معادله (۲-۱۳) یا (۲-۱۵) تعریف می شود.

۲-۶-۲- روش دینامیکی خطی

اگر روش دینامیکی خطی براساس ضوابط بند (۲-۶) 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 روش های دینامیکی خطی هنگامی که میرایی مؤثر در مود اصلی ساختمان بهسازی شده در هر جهت اصلی از ۳۰٪ مقدار بحرانی تجاوز نمی کند، مجاز می باشد.

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) 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) 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.

۲-۶-۲-۲- 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.

$$\beta_{eff-m} = \beta_m + \frac{\sum_j W_{mj}}{4\pi W_{mk}} \quad (2-19)$$

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

$$W_{mk} = \frac{1}{2} \sum_i F_{mi} \delta_{mi} \quad (2-20)$$

که در آن F_{mi} و δ_{mi} به ترتیب نیروی اینرسی افقی و تغییر مکان افقی مود m -ام در تراز کف i ام می‌باشد. کار انجام شده توسط وسیله میراگرویسکوز خطی زام، در یک چرخه کامل بارگذاری در مود 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 δ_{mrj} تغییر مکان نسبی مود m ام بین دوانتهای وسیله λ_m می باشد. علاوه بر اعمال مستقیم روش طیف پاسخ مطابق با این بخش برای دستیابی به نیروهای اعضا در حداکثر تغییر مکان نسبی (دریافت)، 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 β_{eff-m} برای مود m محاسبه شود.

اگر حداکثر نیروی برش پایه محاسبه شده توسط تحلیل دینامیکی، کم تر از 0.8% برش پایه اصلاح شده معادل طبق بند (۲-۱-۶-۲) باشد، نیروها و تغییر شکل های اعضا باید همگی به یک نسبت افزایش داده شوند به طوری که برش پایه حاصل، به 0.8% برش پایه اصلاح شده معادل برسد.

۲-۷- روش های غیر خطی

۲-۷-۱- روش استاتیکی غیر خطی

اگر روش استاتیکی غیر خطی طبق ضوابط بند (۲-۶) انتخاب شود، روش استاتیکی غیر خطی باید براساس ضوابط مطرح شده در این بند دنبال شود. مدل ریاضی غیر خطی ساختمان بهسازی شده باید به طور دقیق در برگیرنده مشخصات منحنی های غیر خطی نیرو- سرعت- تغییر مکان میراگرها و مشخصات مکانیکی اجزای نگه دارنده این وسایل باشد. مشخصات سختی مربوطه، باید سازگار با تغییر شکل های موجود در تغییر مکان هدف و فرکانسی برابر با معکوس زمان تناوب T_e (که از رابطه ۲-۲۴ بدست می آید) 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 شکل های 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 می شود. این روش استاتیکی غیر خطی، شیوه دیگری برای محاسبه تغییر مکان هدف است و به صورت مستقیم، میرایی اضافه شده توسط میراگرها را اعمال می کند. مزیت مدلسازی میراگرهای وابسته به سرعت این است که باعث افزایش سختی و میرایی ویسکوز معادل در قاب ساختمانی می شود. 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 کارگرفته 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 تغییرمکان 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 تغییرمکان نقطه ی کنترل باید برای هر گام افزایش نیروهای جانبی تا رسیدن به تغییرمکانی حداقل ۱/۵ برابر تغییرمکان 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 می تواند به دو روش کامل و ساده شده انجام شود:

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

۲- در روش ساده شده، فقط اعضای اصلی مدل می شوند. رفتار غیرخطی اعضای اصلی توسط مدل دو خطی شبیه سازی می شود و از اثرات کاهندگی صرف نظر می شود. هنگام استفاده از این روش، لازم است معیارهای پذیرش در نظر گرفته شود. چنانچه تعداد کمی از اعضای اصلی توسط این معیار پذیرفته نشوند، می توان آن ها را در دسته ی اعضای غیراصلی فرض کرده و از مدل خارج نمود.

۲-۱-۷-۱-۱- نقطه‌ی کنترل

در تحلیل استاتیکی غیرخطی، مرکز جرم بام به عنوان نقطه‌ی کنترل تغییرمکان سازه انتخاب می شود (مرکز جرم سقف خرپشته به عنوان نقطه ی کنترل انتخاب نمی شود).

۲-۱-۷-۲- توزیع بار جانبی

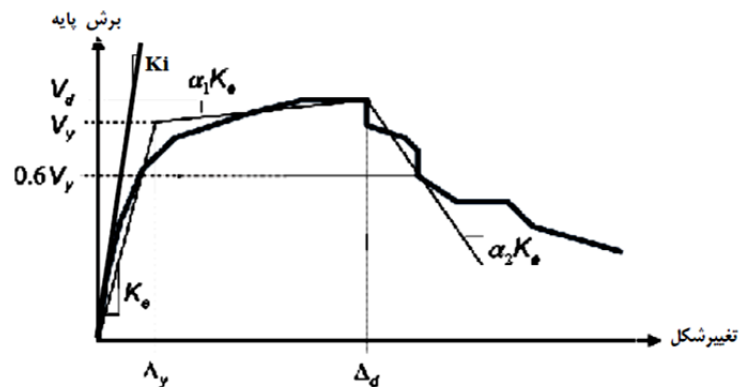
توزیع بار جانبی بر مدل سازه باید تا حد امکان شبیه به آنچه که هنگام زلزله رخ خواهد داد، باشد و حالت های بحرانی تغییرشکل و نیروهای داخلی را در اعضا ایجاد نماید. به همین جهت توزیع بار در ارتفاع سازه باید متناسب با شکل مد اول ارتعاشی در جهت مورد نظر لحاظ گردد.

۲-۷-۱-۳- مدل رفتار سه خطی نیرو-تغییر مکان سازه

رفتار غیرخطی سازه که ارتباط بین برش پایه و تغییر مکان نقطه ی کنترل را مطابق شکل (۲-۱) مشخص می نماید، به منظور محاسبه ی سختی جانبی موثر (K_e) و برش تسلیم موثر (V_y) باید با یک مدل رفتار سه خطی ساده جایگزین شود. برای ساده سازی 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, Δ_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, Δ_d)، به نقطه ای متناظر با برش پایه برابر با ۶۰ درصد برش پایه تسلیم سازه ترسیم میگردد.

۲-۷-۱-۴- تغییر مکان هدف

تغییر مکان هدف برحسب نوع دیافراگم تعیین می شود. در سازه هایی 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 (۲-۷-۱-۴الف و ب) طراحی شود. اثر زلزله در امتداد عمود بر امتداد موردنظر در صورت لزوم باید در نظر گرفته شود.



شکل ۲-۱- منحنی ساده شده نیرو-تغییر مکان

۲-۷-۱-۴الف- 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 (۲-۲۲) محاسبه نمود.

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

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

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

که در آن T_i دوره تناوب اصلی ساختمان با فرض رفتار خطی است و K_i سختی جانبی ارتجاعی مطابق شکل (۲-۱) 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	ساختمان های برشی ^۲	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 غیر خطی مجاز نمی‌باشد.

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

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.

C₂: 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.

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

که در آن :

Δ_d : کمترین مقدار مابین تغییر مکان هدف، δ_t و تغییر مکان در بیشینه برش پایه مطابق شکل (۲-۱) ;

Δ_y : تغییر مکان جاری شدن مطابق شکل (۲-۱);

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

α_e : شیب پس جاری شدگی موثر مطابق رابطه (۲-۲۷):

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

که در آن:

α_2 : ضریب شیب نرم شدگی مطابق شکل (۲-۱);

$\alpha_{P-\Delta}$: ضریب شیب منفی بواسطه اعمال اثر P- Δ بوده که برای بدست آوردن آن لازم است یک بار سازه با در نظر گرفتن اثرات P- Δ تحلیل گردد و سپس مدل رفتار سه خطی ایده آل سازه ترسیم گردد. شیب α_2 در نمودار رفتاری ایده آل شده برابر $\alpha_{P-\Delta}$ میباشد.

λ : ضریب اثر حوزه نزدیک بوده که برای مناطق با لرزه خیزی بسیار زیاد و زیاد برابر ۰/۸ و برای مناطق با لرزه خیزی متوسط و کم برابر ۰/۲ میباشد.

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

برای سازه هایی که دارای دیافراگم نیمه صلب هستند، تغییر مکان هدف باید با در نظر گرفتن سختی دیافراگم محاسبه شود. برای این منظور باید تغییر مکان نقاط مختلف بام با استفاده از تحلیل دینامیکی مدل سه بعدی سازه که در آن سختی دیافراگم نیز منظور شده تعیین شود. سپس تغییر مکان هدف مطابق بند (۲-۷-۱-۴ الف) برای سازه با دیافراگم صلب محاسبه شده و در نسبت حداکثر تغییر مکان هر نقطه ای از بام به تغییر مکان مرکز جرم بام ضرب شود. تغییر مکان 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 تغییر مکان 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. تغییر مکان هدف برای هر یک از قابها را باید مشابه تغییر مکان 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

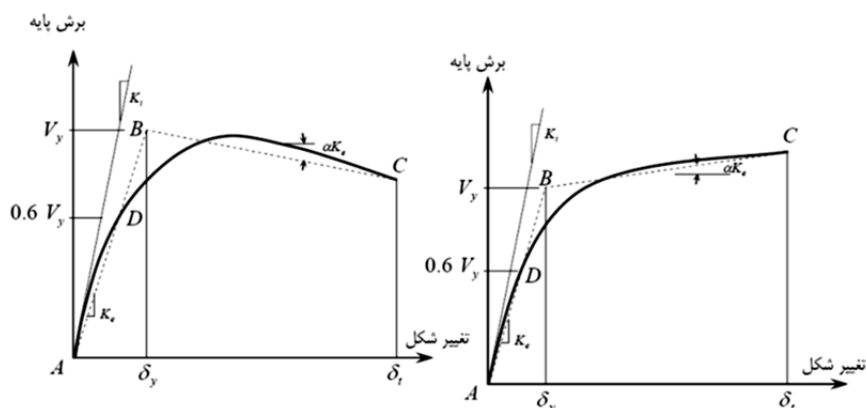
شتاب طیفی باید به منظور احتساب میرایی اضافه شده توسط میراگرهای وابسته به سرعت کاهش داده شود. میرایی مؤثر باید طبق معادله (۲۸-۲) محاسبه شود.

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

که در آن β میرایی قاب ساختمان است که باید مساوی ۵٪ گرفته شود مگر آنکه میرایی دیگری مورد نظر باشد، W_j کار انجام شده توسط وسیله‌ز-ام در یک چرخه کامل به ازای تغییر مکان های δ_j طبقات ساختمان است، و عمل جمع روی کل وسایل صورت می گیرد. همچنین، W_k حداکثر انرژی کرنشی قاب است که طبق معادله (۲۹-۲) محاسبه می‌شود. کار انجام شده توسط وسیله‌ز-ام در یک چرخه کامل بارگذاری باید براساس معادله (۲۹-۲) محاسبه شود.

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

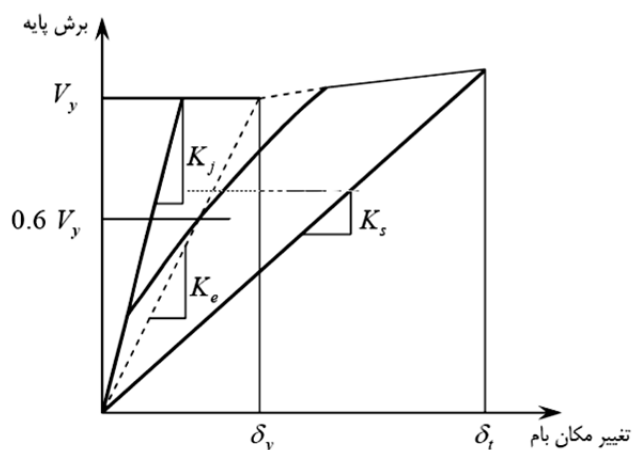
که در آن T_{ss} زمان تناوب اصلی سکانتی ساختمان بهسازی شده است که در محاسبه آن سختی میراگرهای وابسته به سرعت در صورت وجود باید منظور شود. این زمان تناوب با استفاده از معادله (۲۳-۲) محاسبه می‌شود که در آن سختی مؤثر، K_e ، با سختی سکانتی، K_s ، در تغییر مکان هدف، همان گونه که در شکل (۲-۲) نشان داده شده،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



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 مودهای بالاتر باید به طور دقیق ارزیابی شود.



شکل ۲-۳- 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 تاریخیچه 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 نظر گرفتن 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 قرار گرفتن در معرض رطوبت و مواد مضر را نیز باید به حساب آورد.

۲-۸-۴- نیروی باد

عمر خستگی میراگرها و اجزای آن ها شامل آببندها در یک وسیله ویسکوز مایع، باید بررسی شده و نشان داده شود که حداقل به میزان عمر مفید طراحی وسایل می باشد. 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 اتلاف انرژی بیان می‌شود. این رواداری‌ها در صورتیکه بر روی متوسط مشخصات مجموعه‌ای از ابزارهای اتلاف انرژی تعریف شود، به طور معمول بین $10\% \pm$ تا $15\% \pm$ در نظر گرفته می‌شود، ولی اگر یک ابزار خاص مورد توجه قرار گیرد، این رواداری‌ها تا $20\% \pm$ 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- بازبینی طرح

۲-۹-۱- کلیات

بازبینی 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 (۷-۱) انجام شود. بازبینی 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 بازبینی طرح کنترل شود.

- ۱- طرح اولیه شامل تعیین ابعاد وسایل
- ۲- آزمایش نمونه‌ها طبق بند (۲-۱۰-۲)
- ۳- طرح نهایی ساختمان 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 ثقلی 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 قرارداد 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 کاهش‌یافته برای تعیین کمیت خواص وابسته به نرخ بارگذاری میراگرها استفاده شود، این نمونه‌ها باید از 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 به تغییر مکان خارج از صفحه

اگر میراگرها (وابسته به سرعت و وابسته به جابجائی) 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 کاهش‌یافته 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.

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

که در آن نیروهای F^+ و F^- باید به ترتیب در تغییر مکان‌های Δ^+ و Δ^- 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 (β_{eff}) دارای سختی، باید برای هر چرخه از تغییر شکل طبق معادله (۲-۳۱) محاسبه شود:

$$\beta_{eff} = \frac{1}{2\pi} \frac{W_D}{K_{eff} \Delta_{ave}^2} \quad (2-31)$$

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 Δ_{ave} (میانگین مقادیر مطلق تغییر مکان‌های Δ^+ و Δ^-) 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 (۲-۱۰-۳) 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 کلیه‌ی سیکل‌های آن آزمایش محاسبه شده تغییر ننماید.

تبصره: حد ۱۵٪ 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 (۲-۱۰-۳)، 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.

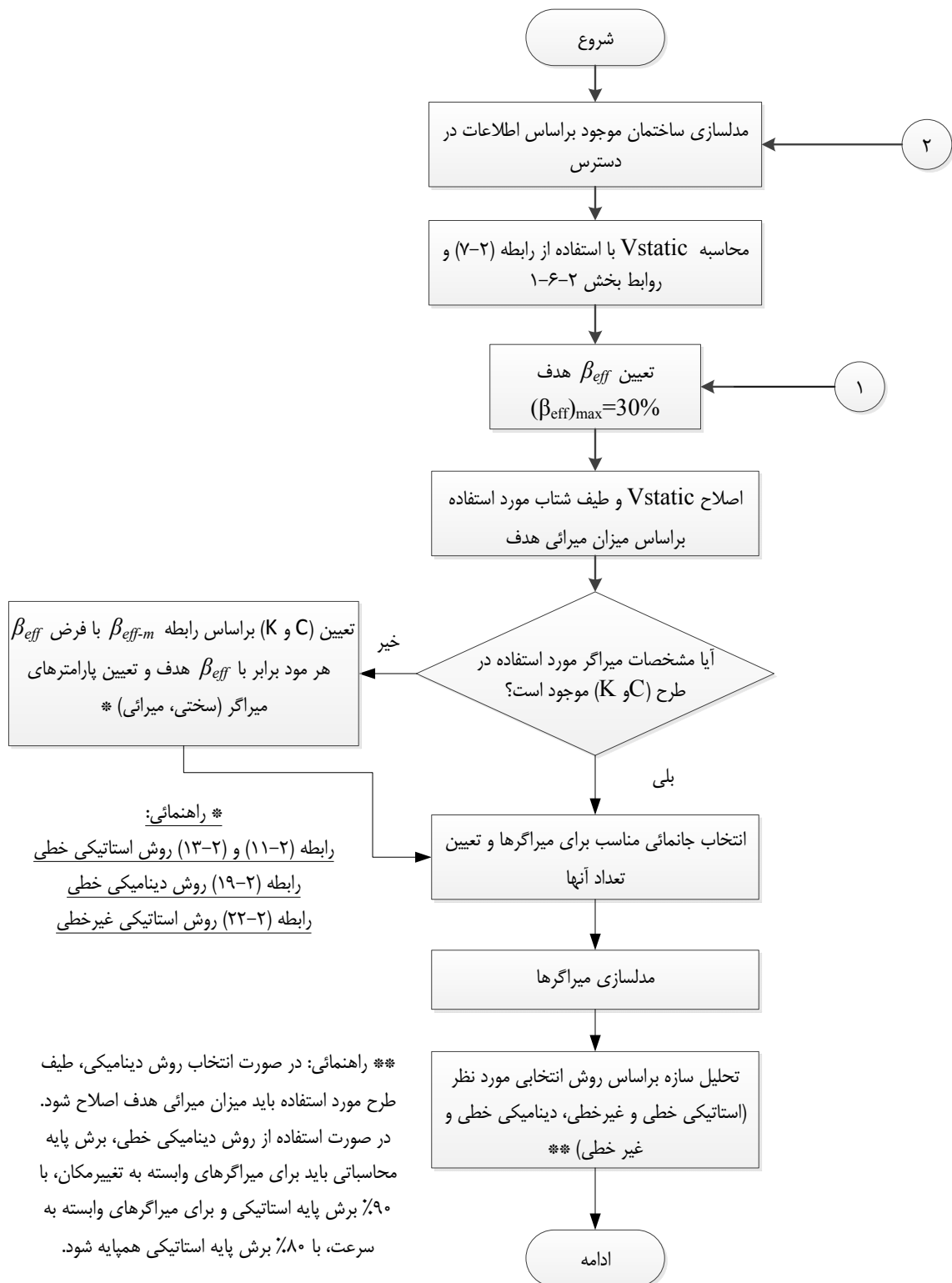
تبصره: حد ۱۵٪ توسط مهندس مسئول در مشخصات فنی طرح قابل افزایش است. به این شرط که توسط تحلیل نشان داده شود که این حد افزایش یافته، اثر حذف کننده‌ای روی پاسخ ساختمان بهسازی شده ندارد.

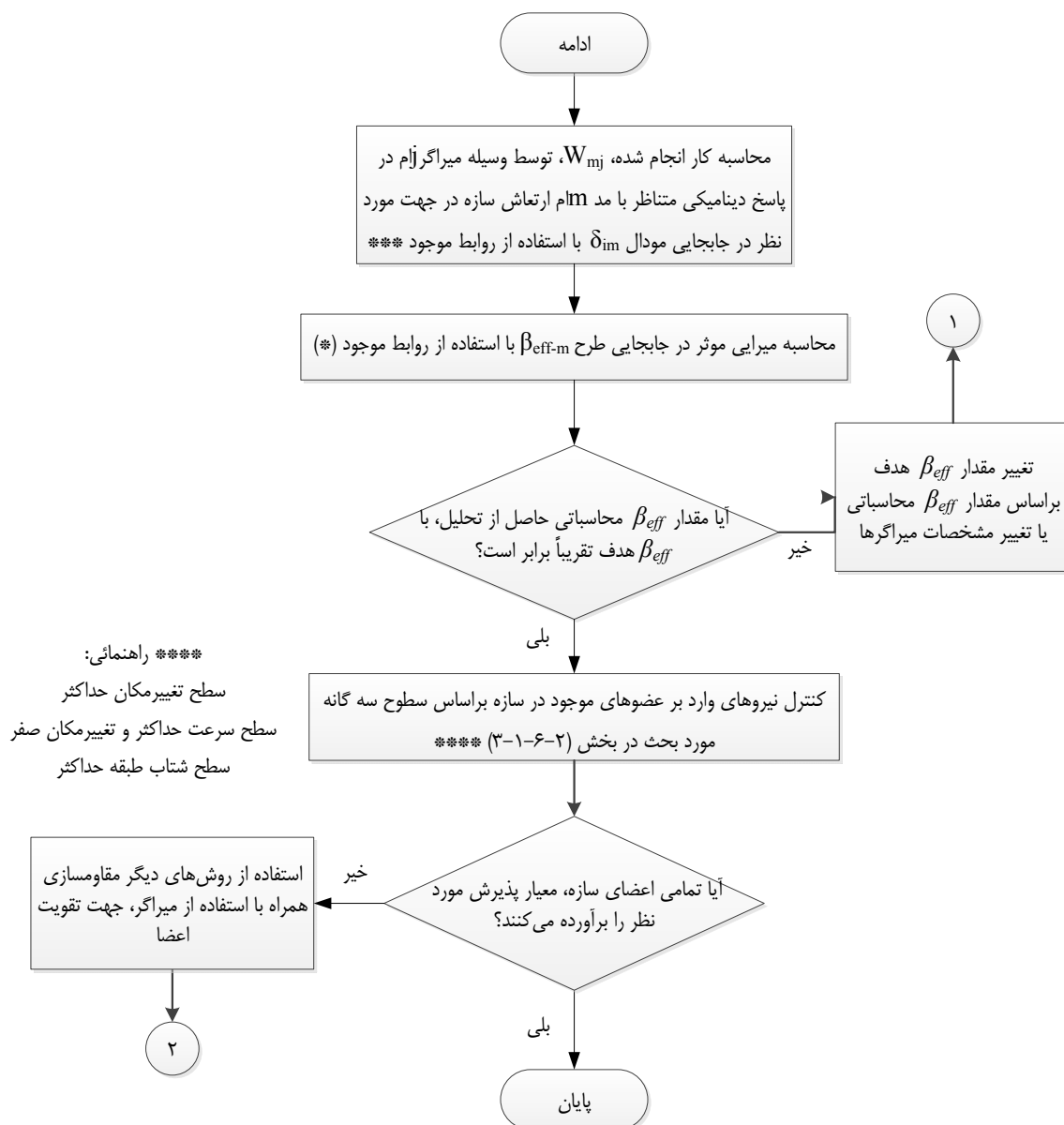
۵- در مورد وسایل وابسته به تغییر مکان، سختی موثر میانگین، میانگین حداکثر و حداقل نیرو در تغییر مکان صفر و میانگین سطح چرخه (W_D) که برای هر یک از سلسله آزمایش‌های توصیف شده در بند (۲-۱۰-۳) محاسبه شده، باید بین حدود تعیین شده توسط مهندس مسئول در مشخصات فنی طرح قرار گیرد. سطح چرخه در انتهای آزمایش چرخه‌ای، نباید به میزانی بیش از به علاوه و منهای ۱۵٪ نسبت به سطح میانگین ۲۰ چرخه‌ای 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 (۲-۱۰-۳) محاسبه شده، باید بین حدود تعیین شده توسط مهندس مسئول در مشخصات فنی طرح قرار گیرد.

۲-۱۱- فلوچارت مقاوم‌سازی ساختمان‌ها با استفاده از میراگر

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





فصل سوم

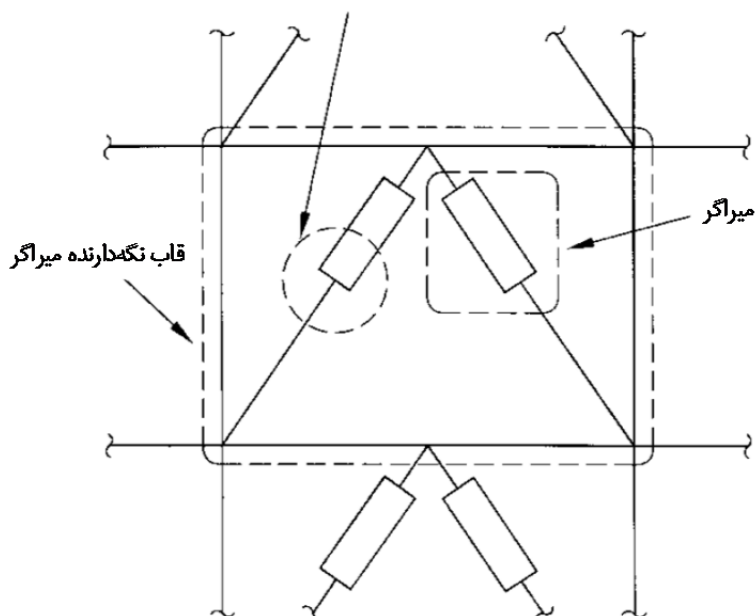
راهنما و تفسیر

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^۱ و نقاط اتصال^۲ 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 می‌آید 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.

محل نصب میراگر به اجزاء نگه‌دارنده آن

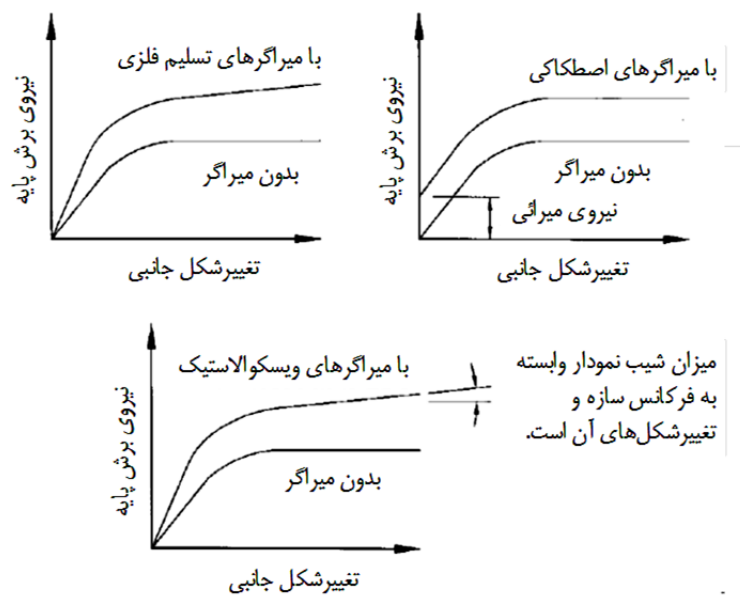


شکل ۳-۱- اجزای در ترکیب با ابزارهای اتلاف انرژی

^۱ Support framing for energy dissipation devices

^۲ Points of attachments

رابطه نیرو-تغییر مکان برای انواع مختلف میراگرها ممکن است به شرایط محیطی (شامل باد، خستگی و دمای بهره‌برداری) و همچنین به شدت بار زلزله، تغییر شکل‌های ماندگار و تغییر شکل‌های 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، تغییر مکان هدف به صورت دست بالا محاسبه شود. در مقابل، اگر میراگر روی یک تکیه‌گاه نگهدارنده انعطاف پذیر 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.

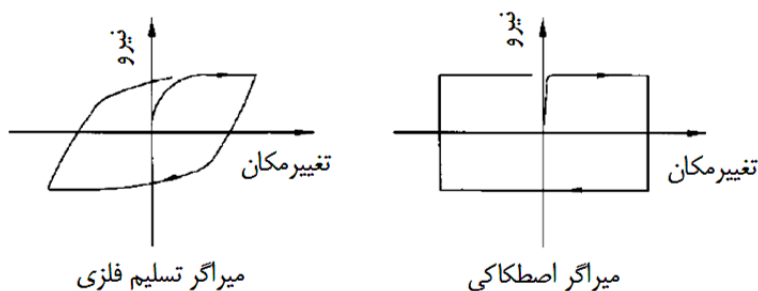


شکل ۳-۲- تاثیر انواع میراگرها بر پاسخ نیرو-تغییر مکان سازه

به کارگیری ابزارهای اتلاف انرژی در ساختمانها، ضمن اینکه باید توجیه علمی و فنی داشته باشد، می 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 غیر خطی (تحلیل طیف پاسخ و یا تاریخچه زمانی) انجام شود.

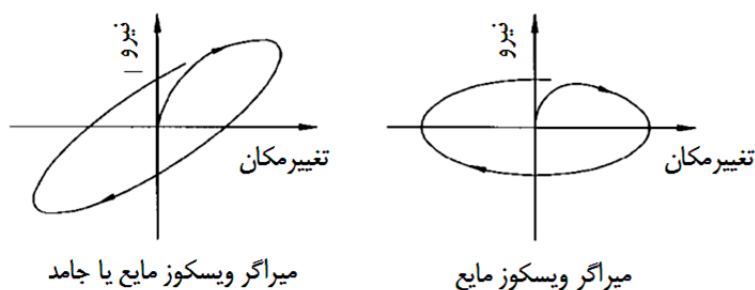
۲-۳ مدل سازی میراگرها

میراگرها را می توان به سه دسته ی 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) نمائی از رابطه نیرو-تغییر مکان برای این میراگرها ارائه شده است.



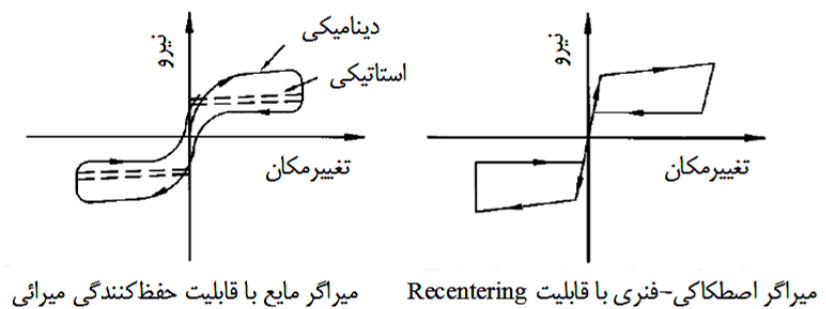
شکل ۳-۳- نمودار چرخه ای ایده آل بار-تغییر مکان برای میراگرهای وابسته به تغییر مکان

میراگرهای ویسکوالاستیک جامد و میراگرهای ویسکوز که با فشار سیال در یک پیستون کار میکنند را می توان در رده میراگرهای وابسته به سرعت دسته بندی کرد. در شکل (۵-۳) نمودار ایده آلی از پاسخ چرخه ای بار-تغییر مکان این میراگرها ارائه شده است.



شکل ۳-۴- نمودار چرخه ای ایده آل بار-تغییر مکان برای میراگرهای وابسته به سرعت

سایر میراگرها دارای مشخصه هایی هستند که نمی توان آنها را در رده میراگرهای ذکر شده در شکل های (۳-۳) و (۴-۳) دانست. از این نمونه می توان به میراگرهای shape-memory alloy، friction-spring assemblies with recentering، و fluid resorting force-damping devices اشاره نمود. در شکل (۵-۳) نمائی از رفتار بار-تغییر مکان این میراگرها ارائه شده است.



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.

۳-۲-۱- میراگرهای وابسته به تغییر مکان

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

۳-۲-۲- میراگرهای وابسته به سرعت

الف) میراگرهای جامد ویسکوالاستیک

این میراگرها عموماً از لایه‌های ویسکوالاستیک پلیمری ساخته شده‌اند. این میراگرها رفتاری 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 ω در شکل (۳-۶) نشان داده شده است. در این سیستم، نیرو از رابطه زیر حاصل خواهد شد:

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

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

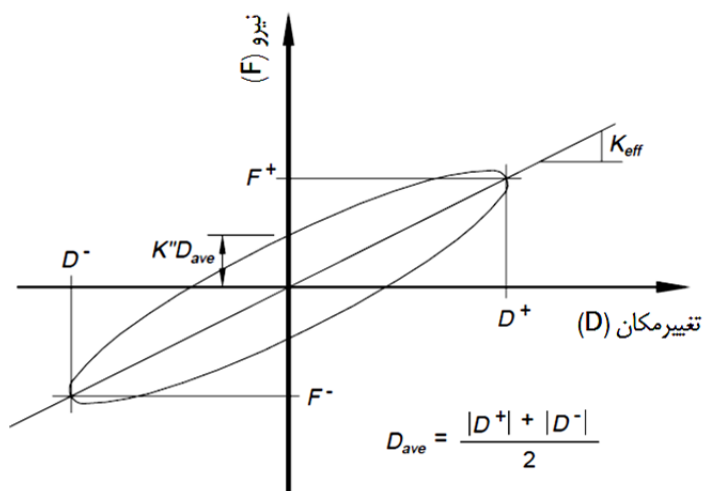
$$k_{eff} = \frac{|F^+| + |F^-|}{|D^+| + |D^-|} \quad (۳-۲)$$

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

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

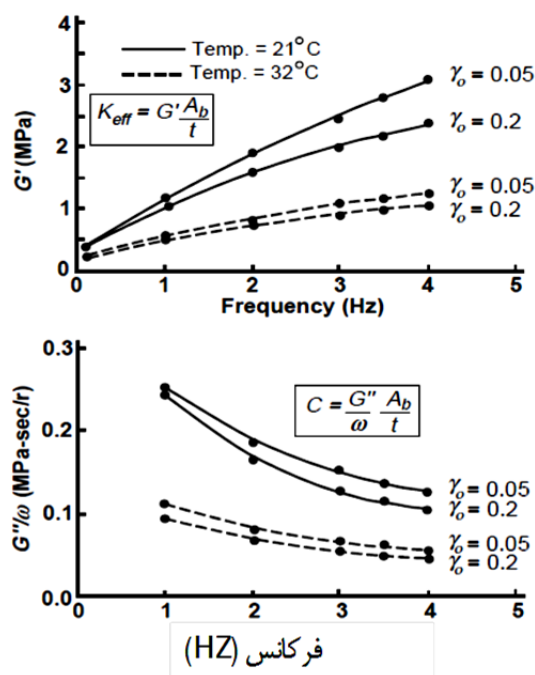
که در آن، D_{ave} مقدار متوسط قدر مطلق مقادیر D^+ و D^- است، W_D سطح زیر منحنی یک چرخه بارگذاری (از D^- تا D^+) است. سختی موثر همچنین به عنوان سختی برشی ذخیره شده نیز شناخته می‌شود. ضریب میرایی نیز می‌تواند براساس میزان افت سختی یا K'' به صورت زیر معرفی شود:

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



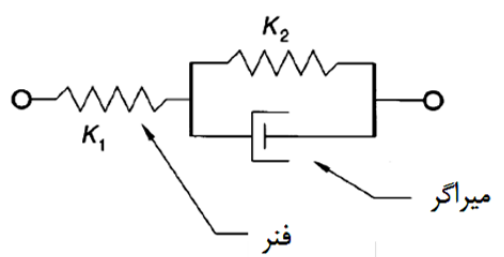
شکل ۳-۶- رابطه ایده‌آل بار-تغییر مکان برای میراگر Viscoelastic solid

سختی و میرایی موثر معمولاً به فرکانس، دما و شدت حرکت وابسته‌اند. در شکل (۷-۳) مقادیر نرمال شده از این پارامتر را براساس پارامترهای دیگر، براساس مطالعات آزمایشگاهی روی یک پلیمر ویسکوالاستیک نشان داده شده‌است.

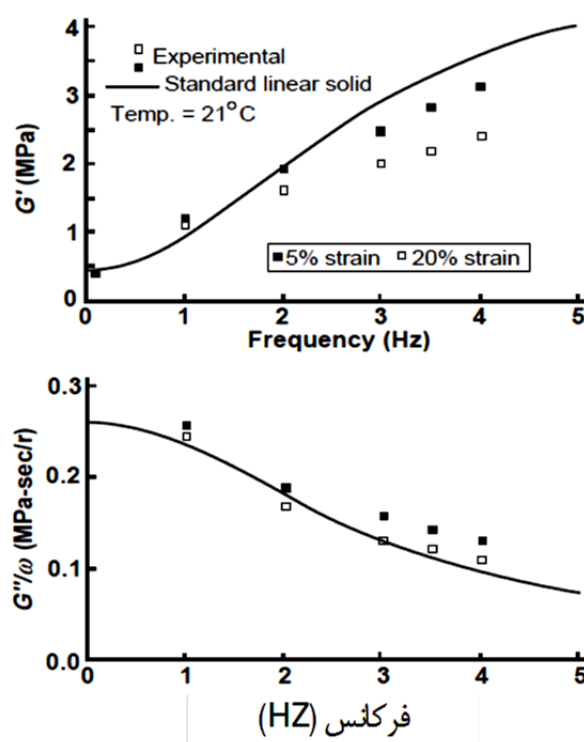


شکل ۷-۳- سختی موثر نرمال شده (G') و ضریب میرایی (G''/ω) برای میراگر ویسکوالاستیک جامد

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 (۷-۳) 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 (۸-۳) 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 (۹-۳) ارائه شده‌است.



شکل ۸-۳- مدل ویسکوالاستیک برای میراگر



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

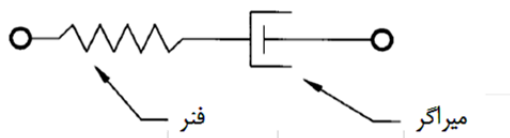
در این نتایج:

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

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.

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 شده‌است 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 ساده سازی شده از میراگر با سیال ویسکوز، میراگر با سیال خطی است که در آن، مقدار توان α (توان میرایی) برابر با ۱/۰ خواهد بود. مقدار متداول برای این توان بین ۰/۵ تا ۲/۰ تعریف می شود و جزئیات محاسباتی آن در بخش ۳-۳-۴ مورد توجه قرار می گیرد.

۳-۲-۳- سایر میراگرها

سایر میراگرها، همانند میراگرهایی که رفتار آنها در شکل (۳-۵) نمایش داده شده اند، نیازمند مدلسازی هایی متفاوت از روشهای اشاره شده هستند. این مدلسازی ها را می توان در مراجع مرتبط یافت.

۳-۳ طراحی ساختمان های جدید با استفاده از میراگرها

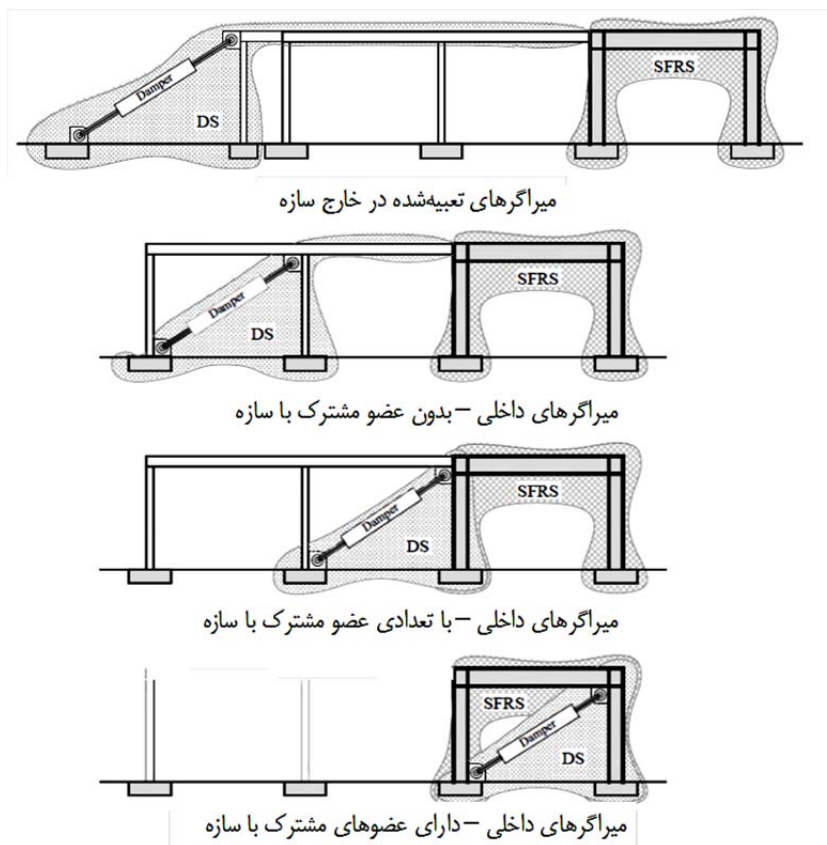
به طور کلی، در سازه هایی که استفاده از ابزارهای اتلاف انرژی مورد توجه قرار می گیرد، تامین یک سیستم مقاوم در برابر زلزله که توان فراهم آوردن یک مسیر انتقال بار کامل را داشته باشد، ضروری است. این سیستم باربر جانبی باید بر اساس ویژگیهای ساختمان و منطقه و با در نظر گرفتن تمامی محدودیت های ارتفاع، گروه بندی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

۱) سیستم مقاوم در برابر بار لرزه ای بدون احتساب سیستم میراگر، باید به گونه ای طراحی شود که مقاومتی کمتر از ۷۵ درصد مقاومت مورد نیاز برای حالت بدون حضور میراگر را دارا باشد (برای سازه های 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 می شود.

۲) سیستم میراگر (شامل تمامی اجزاء میراگر و قطعات نگهدارنده آن)، باید محدودیت های تغییر مکان های نسبی را در تمامی ساختمان ها (منظم و غیر منظم) 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 می شوند)، 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 سازه های متداول که توسط استاندارد تعیین می شود تجاوز ننماید.

۳) علیرغم تشابه احتمالی در برخی اجزاء، سیستم میراگر به طور مجزای از سیستم مقاوم در برابر بارهای لرزه ای تعریف می شود. همانگونه که در شکل (۳-۱۱) نشان داده شده است، سیستم میراگر می تواند عضو مشترکی با سازه اصلی

نداشته باشد، یا برخی اعضاء آن با اعضاء 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.



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_s و S_1 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 ۱-۳ و ۲-۳ 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					
$S_s \geq 1.25$	$S_s = 1.0$	$S_s = 0.75$	$S_s = 0.5$	$S_s \leq 0.25$	نوع خاک
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 ۳-۲- ضرایب F_v براساس مشخصات ساختمانی

شتاب طیفی پاسخ (MCE_R) نگاشت شده در دوره تناوب برابر با ۱ ثانیه					
$S_s \geq 0.5$	$S_s = 0.4$	$S_s = 0.3$	$S_s = 0.2$	$S_s \leq 0.1$	نوع خاک
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 تناوب‌های مختلف با پارامترهای زیر معرفی می‌شود:

SD1: متناظر با شتاب پاسخ طیفی زلزله طرح در دوره تناوب برابر با ۱ ثانیه است.

SDS: متناظر با شتاب پاسخ طیفی زلزله طرح در دوره تناوب‌های کوتاه است.

این پارامترها از رابطه‌های زیر بدست می‌آیند:

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

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

۳-۳-۲- روشهای تحلیل

۳-۳-۲-۱ کلیات

روش‌های تحلیل استاتیکی خطی و تحلیل طیف پاسخ را می‌توان برای طراحی سازه‌های 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 سایتی که مقدار S_1 در آن مساوی یا بیش از ۰٫۶ باشد، ضمن تحلیل خطی، نیازمند انجام یک تحلیل اضافی تاریخیچه 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 ۱ ثانیه است که جزئیات محاسباتی آن در ادامه ذکر می‌شود.

مشابه سازه‌های متداول، سازه‌های دارای میراگر نیز حین لرزش‌های شدید زمین دچار تسلیم می‌شوند و عملکرد آنها می‌تواند به شدت از پاسخ موده‌های 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 سازه‌ها، مورد توجه قرار می‌گیرد. الزامات مورد بحث در دستورالعمل حاضر که برای مدلسازی غیرخطی سازه‌های دارای میراگر ارائه شده‌اند، 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 ساختمان‌های 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 هیستریزیس دو خطی، دارای سختی ثانویه صفر (رفتار الاستو-پلاستیک) مدلسازی کرد.
۴. مقاومت تسلیم سازه می‌تواند با تحلیل پلاستیک سازه یا با استفاده از حداقل برش پایه لرزه‌ای و مقادیر R ، Ω_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.

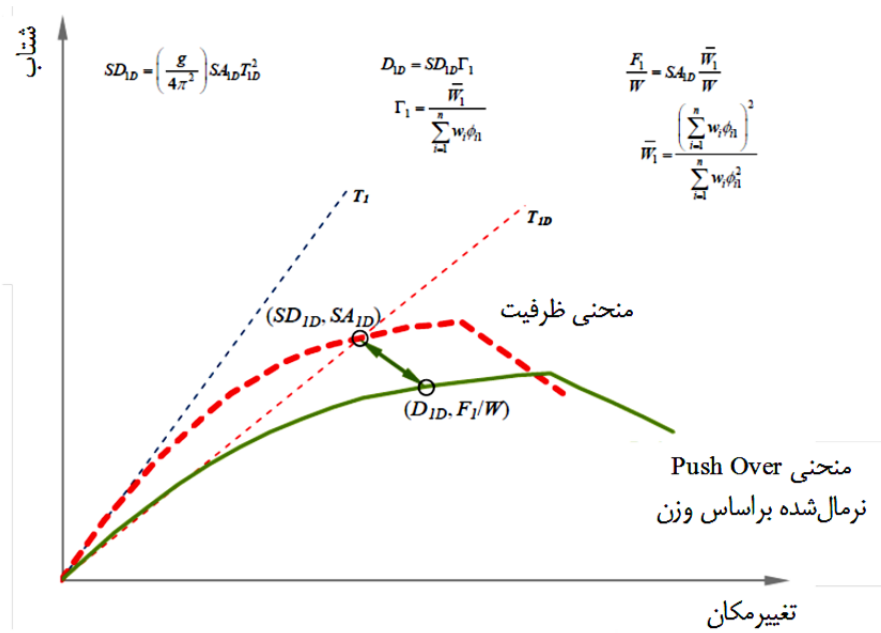
روش های طیف پاسخ و بار جانبی معادل که در دستورالعمل حاضر ارائه شده‌اند، هر دو تخمین های محافظه کارانه ای از نیروی میراگر و عکس العمل های اعضاء بدست می‌دهد و در قیاس با نتایج تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی دینامیکی از دقت قابل قبولی برخوردارند.

۳-۲-۳-۲ تحلیل خطی

تحلیل خطی به دو روش عمده روش استاتیکی خطی یا بار معادل، و روش دینامیکی خطی یا طیف پاسخ انجام می‌شود. این روش‌ها به طور کامل در فصل اول دستورالعمل حاضر ارائه شده‌است. در اینجا و به منظور بیان جزئیات این روش‌ها و مبانی محاسباتی آنها به اختصار به برخی ویژگی‌های آنها اشاره می‌شود.

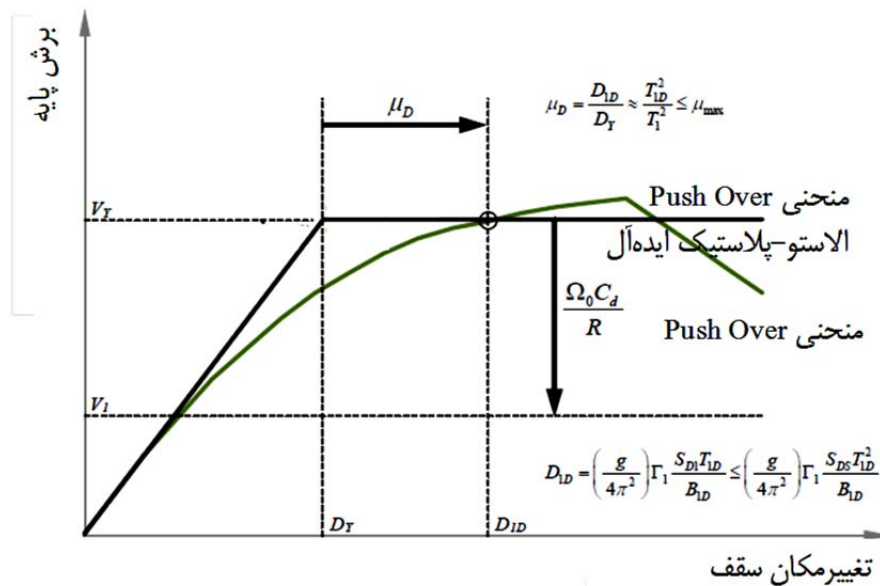
در تحلیل به روش بار معادل جانبی، پاسخ سازه با دو مود اصلی تعریف می‌شود: اول، مود اصلی سازه و دوم، مودهای باقیمانده. مودهای باقیمانده مفهومی است که برای تخمین اثرات ترکیبی مودهای بالاتر به کار می‌رود. از آنجاکه معمولاً سرعت مودال در درجه دوم اهمیت نسبت به تغییرمکان مودال قرار داشته و مودهای بالاتر نقش 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، μ_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، μ_{max} ، که با استفاده از پاسخ conventional سازه محاسبه می‌شود، تجاوز نماید.



شکل ۳-۱۳- منحنی ایده آل 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_Y طراحی می شوند، مگر آنکه سیستم میراگر به تنهایی طراحی شده باشد و آزمون های نمونه برای پاسخ در زلزله حداکثر انجام شده باشد. اجزاء سیستم مقاوم در برابر زلزله برای برش پایه متناظر با مودهای باقیمانده، V_I ، طراحی می شوند که در این شرایط، کاهش نیروها براساس ضریب تشدید مقاومت (Ω_0) انجام می شود و با ضرب در C_d/R اثر تحلیل الاستیک در آن وارد می شود. 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 مکان های نسبی واقعی در طبقات و تغییر مکان های سیستم میراگر (فارغ از تغییر مکان هایی 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 مکان های نسبی واقعی در طبقات قابل محاسبه هستند، لذا حداکثر میزان تغییر مکان های جانبی طبقات که براساس روابط مندرج در استاندارد ۲۸۰۰ ویرایش ۴ تعیین شده است، 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 نشده است، فرآیند پیچیده ای خواهد داشت. با توجه به عدم هم زمانی 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 سازه های دارای میراگرهای وابسته به سرعت کنترل شوند. برای سیستم های میراگر وابسته به تغییر مکان، سطوح اول و دوم تعیین کننده اند 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 می شوند به نحوی که تغییر مکان های جانبی برابر با صفر می شود. نیروهای ویسکوز باعث بوجود آمدن نیروهای محوری در ستونهای نگه دارنده میراگرهای ویسکوز می شوند. شدت این نیروهای محوری به (الف) مقدار میرائی افزوده شده به واسطه میراگرها و (ب) تعداد میراگرهایی که برای رسیدن به سطح میرائی هدف مورد استفاده قرار گرفته اند وابسته است.

وضعیت متناظر با بیشترین شتاب، به این صورت تعیین می شود که فرض بر آن است که ساختمان تحت حرکت هارمونیک با فرکانس f_1 و دامنه ای 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 می دهد. لازم به ذکر است که استفاده از فرض $C_{mFV} = C_{mFD} = 1$ به نتایج محافظه کارانه ای در خصوص نیروی اعضا منجر خواهد شد. ضرایب نیروی 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 می شوند. این ضرایب، به صورت عددی و در قالب جداولی براساس محاسبات عددی پیشنهادی توسط Ramirez et al. (2001) ارائه شده اند و برای رفتار غیرخطی ویسکوز و رفتار غیرالاستیک سازه ای معتبرند. نحوه محاسبه این ضرایب نیز به شرح اشاره شده در بند ۳-۳-۲-۴ می باشد.

۳-۳-۲-۳ روش های غیرخطی

به عنوان یک اصل ابتدائی در ورود به تحلیل سازه ها 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 مدل های تحلیلی مورد نیاز خواهد بود. در حالیکه در شرایطی که سیستم مقاوم در برابر زلزله به حد تسلیم رسیده باشد، تمامی مشخصه های رفتاری پس از تسلیم اجزاء سازه ای باید در مدلسازی ساختمان وارد شوند.

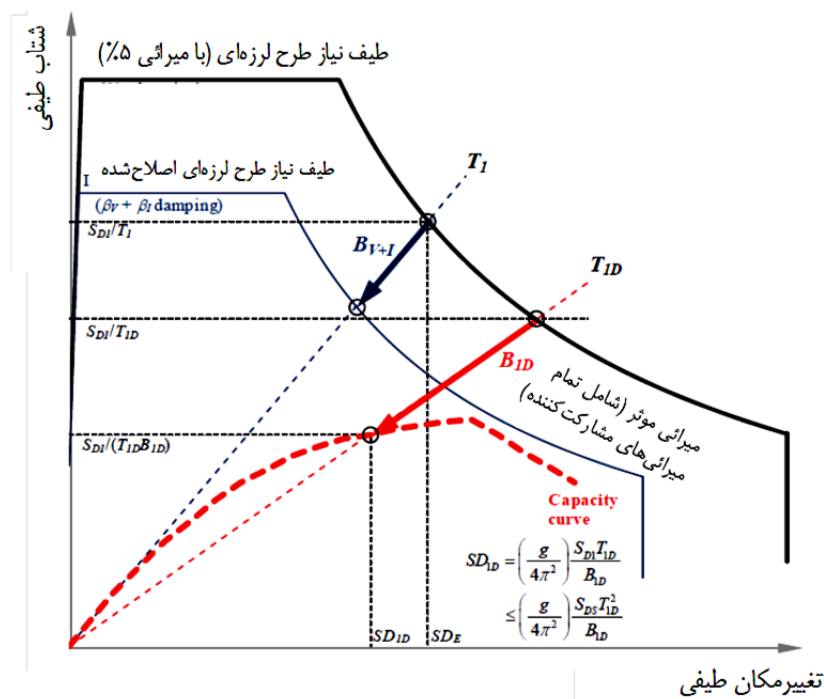
پاسخ کاهش یافته ساختمان های دارای سیستم میراگر با ضریب میرائی B شناخته می شود که براساس میزان میرائی موثر β در مود مورد انتظار تعیین شده است. در این شرایط، میزان میرائی موثر متناظر با مود اصلی سازه دارای میراگر، براساس مشخصات غیرخطی پاسخ نیرو-تغییر مکان سازه تعریف می شود. برای بهره گیری از این روش در تحلیل های غیرخطی، مشخصات غیرخطی سازه شامل ضریب تشدید مقاومت (Ω_0) و سایر پارامترها در محاسبات وارد می شود.

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 می شود) را نشان می دهد. منحنی ظرفیت ارائه شده، بیانگر رفتار غیرخطی ساختمان در مود اصلی است که براساس رابطه بین شتاب و تغییر مکان طیفی تعریف می شود. کاهش ناشی از تاثیر میرائی در دوره تناوب موثر مود اصلی ارتعاش اعمال می شود. به طور کلی، میرائی موثر ترکیبی از سه مولفه زیر است:

۱- میرایی ذاتی (β_I): میرایی ذاتی یک ساختمان در لحظه تسلیم یا پیش از آن، بدون درنظر 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- میرایی هیستریزیس (β_H): میرایی پس از تسلیم سیستم مقاوم در برابر زلزله و اجزاء نگه‌دارنده میراگر است که براساس دامنه تغییرمکانی (amplitude) مورد نظر تعیین می‌شود (در شرایط بحرانی مثل شرایط تسلیم و قبل از آن، برابر با صفر در نظر گرفته می‌شود).

۳- میرایی سیستم اتلاف انرژی (β_V): میرایی ویسکوز سیستم اتلاف انرژی (برای میراگرهای وابسته به تغییرمکان، باید براساس دامنه پاسخ در تغییرمکان تسلیم سازه تعیین شود).



شکل ۳-۱۴- کاهش پاسخ سازه به دلیل کاهش میرایی موثر

هر دو بخش میرایی هیستریزیس و میرایی متناظر با سیستم اتلاف انرژی، وابسته به دامنه تغییرمکانی هستند و مشارکت نسبی آنها در مقایسه با میزان میرایی کل موثر، با میزان پاسخ بعد از تسلیم سازه تغییر می‌کند. به عنوان مثال، با افزودن میراگرها به یک ساختمان، میزان تغییرمکان پس از تسلیم سازه کاهش می‌یابد و در نتیجه، میزان میرایی هیستریزیس که توسط سیستم مقاوم در برابر زلزله ایجاد شده‌است نیز کاهش خواهد یافت. در شرایطی که تغییرمکان به میزان تغییرمکان تسلیم کاهش می‌یابد، مولفه هیستریزیس از میرایی موثر برابر صفر است و میزان میرایی موثر برابر با میرایی

ذاتی سازه به علاوه میرایی متناظر با ابزارهای اتلاف انرژی است. در شرایطی که هیچ سیستم اتلاف انرژی‌ای در سازه استفاده نشده باشد، میرایی موثر به سادگی برابر با میرایی ذاتی سازه (در حدود ۵ درصد) تعیین می‌شود. مقدار میرایی موثر در یک ساختمان باید به نحوی محاسبه شود که با منحنی نیاز طراحی در انطباق باشد. به طور کلی، میرایی موثر باید مستقل از سطح تغییرمکانی متناظر با تغییرشکل‌های سیستم قاب ساختمانی باشد. میزان میرایی موثر با فرض رفتار ایده‌آل دو خطی برای سازه در بارگذاری چرخه‌ای بدست می‌آید که با نیاز شکل‌پذیری موثر، μ ، 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:

$$\beta_{eff} = \frac{W_D}{4\pi W_k} + \beta \quad (۱۱-۳)$$

که در آن، W_D میزان انرژی مستهلک‌شده در ساختمان (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 تأیید 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 جابه‌جایی 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:

$$V = \left(\frac{2\pi}{T_{eff}} \right) D \quad (۱۲-۳)$$

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 ω_n و دامنه D در نظر گرفته می‌شود. بدین ترتیب شرایط جابه‌جایی عبارت خواهد بود از:

$$u = D \cos \omega_n t \quad (۱۳-۳)$$

و برای سرعت می‌توان رابطه زیر را تعریف نمود:

$$\dot{u} = -D \omega_n \sin \omega_n t \quad (۱۴-۳)$$

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

$$F = ku + C_N |\dot{u}|^\alpha \operatorname{sgn}(\dot{u}) \quad (۱۵-۳)$$

که در آن C_N ضریب میرایی و α توان میرایی است. رابطه (۱۵-۳) را می‌توان به صورت زیر بازنویسی نمود:

$$\frac{F}{m \omega_n^2 D} = -\frac{2\pi}{\lambda} \beta_V \sin^\alpha \omega_n t + \cos \omega_n t \quad (۱۶-۳)$$

در رابطه فوق مقادیر λ ، β_V و ω_n به شرح زیر تعیین می‌شوند:

$$\beta_V = \frac{C_N \lambda}{2\pi m} D^{\alpha-1} \left(\frac{2\pi}{T_e} \right)^{\alpha-2} \quad (۱۷-۳)$$

$$\lambda = 4.2^\alpha \frac{\Gamma^2(1+\alpha/2)}{\Gamma(2+\alpha)} \quad (۱۸-۳)$$

$$\omega_n = \left(\frac{k}{m} \right)^{1/2} = \frac{2\pi}{T_e} \quad (۱۹-۳)$$

$$T_e = 2\pi \left(\frac{D_y}{A_y} \right)^{1/2} \quad (۲۰-۳)$$

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 Γ تابع گاما (gamma function) است. برای مقادیر مختلف α مقدار λ در جدول (۳-۳) قابل استخراج است.

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

ضریب میرایی 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 (۳-۱۴) 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 δ یک تاخیر فاز کوتاه مطابق شکل (۳-۱۵) می‌باشد. این فرض در شرایطی که مقدار α کوچک است ($a = 0$ و $\delta = 0$)، فرض مناسبی است و تاخیر فاز مورد اشاره از رابطه زیر قابل تعیین است:

$$\delta = \left(\frac{2\pi a \beta_V}{\lambda} \right)^{\frac{1}{2-\alpha}} \quad (۳-۲۳)$$

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

$$\delta = \tan^{-1}(2\beta_V) \quad (۳-۲۴)$$

لازم به تاکید است که رابطه (۳-۲۳) حتی برای میراگر ویسکوز خطی هم تقریب های خوبی ارائه می‌کند. در حالت $\alpha = 1$ و $\lambda = \pi$ مطابق رابطه (۳-۲۳) داریم $\delta = 2\beta_V$. در مقایسه با رابطه (۳-۲۴)، استفاده از رابطه (۳-۲۳) 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 (۳-۲۲) و (۳-۲۳) در رابطه (۳-۱۶) محاسبه می‌شود.

$$A_{\max} = A \left(C_{mFD} + \frac{2\pi\beta_V}{\lambda} C_{mFV} \right) \quad (۳-۲۵)$$

که در این رابطه:

$$C_{mFD} = \cos \delta \quad (۳-۲۶)$$

و

$$C_{mFV} = (\sin \delta)^\alpha \quad (۳-۲۷)$$

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.

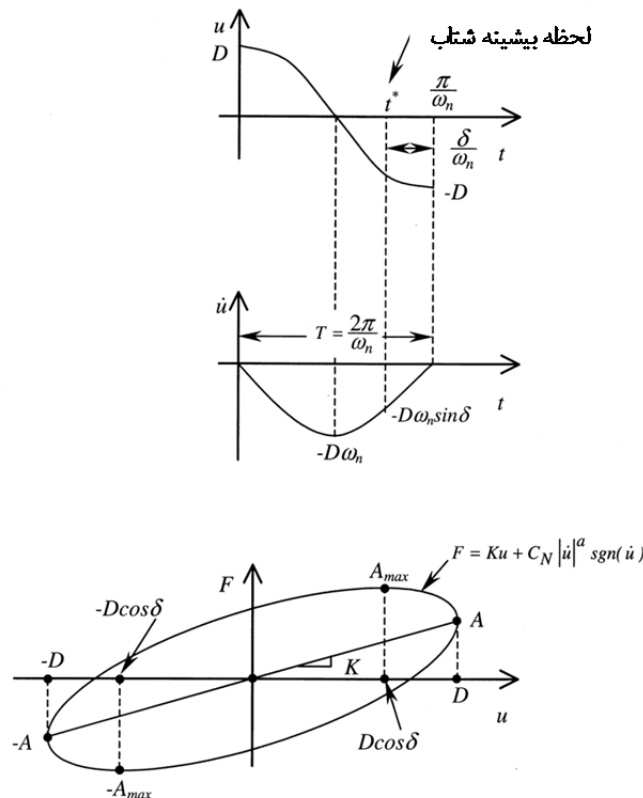
پارامتر δ مورد بحث در دو رابطه (۲۶-۳) و (۲۷-۳) از رابطه (۲۳-۳) تعیین می‌شود که در آن β_V با β_{veff} جایگزین می‌شود. در میراگرهای ویسکوز خطی و هیستریزیس الاستوپلاستیک، مقدار α برابر با ۰/۰۵ تعیین می‌شود. لازم به تاکید است که در این فرمول‌بندی، میرایی ذاتی سیستم مرکب به دلیل افزایش سختی در شرایط ارتجاعی، 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 (۱۵-۳) 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:



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

$$A_{\max} = A \left(C_{mFD} + \frac{2\pi\beta_{\text{veff}}}{\lambda} C_{mFV} \right) \quad (3-31)$$

که در آن:

$$\text{if } D < D_y, \quad C_{mFD} = \cos \delta$$

$$\text{if } D > D_y \text{ and } \mu \cdot \cos \delta < 1 \quad C_{mFD} = \mu \cdot \cos \delta \quad (3-32)$$

$$\text{if } D > D_y \text{ and } \mu \cdot \cos \delta \geq 1, \quad C_{mFD} = 1.0$$

$$\mu = \frac{D}{D_y} \quad (3-33)$$

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- روش های تحلیل خطی

سختی میراگر و تکیه گاه نگه دارنده 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 خطی سازی رفتار میراگر به کار رود. این فرض یک فرض محافظه کارانه است زیرا تغییر مکان ها دست بالا تقریب زده خواهند شد و مزایای بهره گیری 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، تغییر شکل یا کرنش، سرعت، میزان سربار و بارهای دوجهته وابسته باشد. این وابستگی باید در مرحله تحلیل با انجام تحلیل های متعدد روی ساختمان و با تغییر در پارامترهای تعیین کننده مورد توجه قرار گیرد.

۳-۴-۱- روش خطی استاتیکی

الف) میراگرهای وابسته به تغییر مکان

دو محدودیت اصلی در استفاده از روش خطی استاتیکی در بهسازی لرزه ای سازه موجود در بهره گیری از میراگرهای وابسته به تغییر مکان 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 شده است، 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 رخ دادن 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 تغییر مکانهای 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 تغییرمکان، به این منظور به کار گرفته می‌شود که بارهای pseudo lateral و 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 می‌شود:

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 می‌شود) تخمین زده می‌شود.

۲- نیروهای افقی براساس روابط (۸-۲) برای توزیع V اصلاح شده، تعیین می‌شوند.

۳- تغییرمکان جانبی δ_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 δ_i ، میزان میرائی موثر، β_{eff} ، با استفاده از رابطه زیر تخمین زده می‌شود.

$$\beta_{eff} = \beta + \frac{\sum W_j}{4\pi W_k} \quad (3-34)$$

که در آن، β 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 j ام در یک چرخه کامل و در تغییرمکان متناظر با طبقه i ام، δ_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:

$$W_k = \frac{1}{2} \sum_i F_i \delta_i \quad (3-35)$$

۵- گامهای ۱ تا ۴ به نحوی تکرار می‌شوند 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 δ_i در تراز کف i با تحلیل خطی مدل ریاضی، که بارهای افقی F_x در آن وارد شده‌است، محاسبه می‌شود.

۴- با مشخص بودن مقادیر δ_i ، میزان میرایی موثر، β_{eff} ، با استفاده از رابطه زیر تخمین زده می‌شود.

$$\beta_{eff} = \beta + \frac{\sum W_j}{4\pi W_k} \quad (36-3)$$

که در آن، β میرایی 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 j ام در یک چرخه کامل و در تغییرمکان متناظر با طبقه i ام، δ_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:

$$W_k = \frac{1}{2} \sum_i F_i \delta_i \quad (37-3)$$

$$W_j = \frac{2\pi^2}{T} C_j \delta_{rj}^2 \quad (38-3)$$

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_z مقدار ثابت میرائی برای میراگر z است و δ_{ij} تغییر مکان 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 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 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 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 افزوده شده به واسطه میراگرها و (ب) تعداد میراگرهایی که برای رسیدن به سطح میرایی 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 محافظه کارانه‌ای 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 غیر خطی 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 تغییر مکان ناشی از (۱) کاهش در دوره تناوب اصلی ساختمان و (۲) نیازهای نیروئی کمتر ناشی از میرائی بیشتر خواهد بود.

الف) میراگرهای وابسته به تغییر مکان

به منظور محاسبه ضرایب میرایی مودال می توان معادله (۳-۲) را با استفاده از ارائه تخمین هایی از کار انجام شده با میراگرها و انرژی کرنشی مودال مرتبط اصلاح نمود. با توجه به اینکه تغییرمکان ساختمان با تغییرمکان مود اول شناخته می شود، در این روش میرایی مود اول به نحوی اصلاح می شود که بیانگر میزان انرژی تلف شده توسط میراگر باشد و از تاثیر استفاده از میراگر در مودهای دیگر صرف نظر می شود.

(ب) میراگرهای وابسته به سرعت

معادلات (۳-۳۶) تا (۳-۳۸) برای محاسبه ضرایب میرایی مودالی که بیانگر میرایی افزوده شده به سازه دارای میراگر هستند، به کار می روند. نیروهای طراحی لرزه ای باید با استفاده از ضرایب میرایی 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 بهره گیری از میراگرها، در مودهای دیگر صرف نظر شود.

۳-۴-۲- روش های غیرخطی

۳-۴-۲-۱ روش استاتیکی غیرخطی

روش متداول برای انجام تحلیل غیرخطی استاتیکی روش تغییرمکان هدف است. به علاوه، در سازه های دارای میراگر می توان از روش منحنی های ظرفیت نیز (در موارد خاص) استفاده کرد. اصلی ترین تفاوت این دو روش در تعیین مقدار تغییرمکان هدف است. در روش تغییرمکان هدف، این تغییرمکان با استفاده از مجموعه ای از ضرایب و با یک تخمین خطی روی تغییرمکان مود اول ساختمان محاسبه می شود. 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 می نماید. منحنی نیاز طراحی از طیف پاسخ الاستیک با فرض میرایی متناظر با انرژی تلف شده در یک چرخه بارگذاری تا تغییرمکان هدف تعریف می شود.

۳-۴-۲-۱-۱ روش تغییرمکان هدف

(الف) میراگرهای وابسته به تغییرمکان

مزایای بهره گیری 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 می شود. بدیهی است که اتلاف انرژی چرخه ای در سیستم غیرالاستیک باعث کاهش در تغییرمکان متناظر با سیستم الاستیک مشابه آن می شود. همانطور که اشاره شد، میزان انرژی

مستهلك شده در يك ميراگر وابسته به تغييرمكان مشابه با مقدار انرژی مستهلك شده در يك shear link در يك مهاربند هم محور است. در shear link مهاربند هم محور، استهلاك انرژی در لينك برشی به طور مستقيم در محاسبه تغييرمكان هدف لحاظ نشده است. علاوه بر اين، افزايش سختی و کاهش دوره تناوب ناشی از افزودن قاب مهاربندی شده به نیازهای تغييرمكاني كمتری منجر می شود. چنین منطقی در ميراگرهای وابسته به تغييرمكان نیز به كار گرفته می شود.

ب) ميراگرهای وابسته به سرعت

تغييرمكان هدف به دليل ميراای افزوده شده در سیستم ناشی از حضور ميراگرهای وابسته به سرعت کاهش می یابد. محاسبه تاثیرات ميراای می تواند به شرح زیر باشد:

(۱) ميراای موثر در ساختمان، شامل ميراای افزوده شده توسط ميراگرها، به صورت اولیه حدس زده می شود.

(۲) تغييرمكان هدف اصلاح شده با استفاده از رابطه (۲-۲۲) و ضريب اصلاح ميراای متناظر با میزان ميراای محاسبه شده در گام ۱، از جدول (۱-۲) استخراج شده و محاسبه می شود.

(۳) نیروهای جانبی وارده در مدل ریاضی ساختمان، تا زمانی که به تغييرمكان هدف برسد، وارد می شود. نیروها و تغييرمكانهای تجمعی در تراز هر طبقه (F_i و δ_i برای طبقه i ام) در تغييرمكان هدف محاسبه می شوند. تغييرمكانهای محوری بین هر دو ميراگر (δ_{ij} برای ميراگر j) به صورت تجمعی محاسبه می شود.

(۴) با در دست بودن مقدار تغييرمكان δ_i ، میزان ميراای موثر، β_{eff} ، محاسبه می شود:

$$\beta_{eff} = \beta + \frac{\sum_j W_j \cos^2 \theta_j}{4\pi W_k} \quad (3-39)$$

که در آن، β ميراای قاب ساختمانی است و در شرایطی که براساس مطالب بخش های پیشین تعیین نشده باشد، برابر با ۰/۰۵ تعیین می شود، W_j کار انجام شده توسط ميراگر j در یک چرخه کامل متناظر با تغييرمكان δ_i است، θ_i زاویه انحراف ميراگر j نسبت به افق است و W_k حداکثر انرژی کرنشی در قاب است که از رابطه زیر بدست می آید:

$$W_k = \frac{1}{2} \sum_i F_i \delta_i \quad (3-40)$$

کار انجام شده توسط ميراگر j در یک چرخه کامل بارگذاری را می توان 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 ميراگرهای وابسته به سرعت است که براساس رابطه (۲-۲۳) محاسبه شده ولی در تغييرمكان هدف سختی موثر آن، K_e ، با سختی سکانتی، K_s ، جایگزین شده است، C_j ثابت ميراای برای ميراگر j ام است و δ_{ij} تغييرمكان نسبی بین دو انتهای ميراگر j ام در راستای مورد بررسی، در شرایطی که تغييرمكان سقف به تغييرمكان هدف برسد، می باشد.

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 مولفه های نیرویی و تغییرمکانی در شرایط حداکثر تغییرمکان متدوال 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 می شود. این الگوریتم برای هر دو روش قابل اجراست.

۱- در ابتدا سختی سکانتی تمامی اجزاء و المانهای قاب ساختمانی در تغییرمکان هدف مشخص می شود. پس از آن، سختی الاستیک تمامی اجزاء و المانها با سختی سکانتی محاسبه شده جایگزین می شود. براساس تحلیل مقادیر ویژه قاب ساختمانی، فرکانسها و شکل های مودی تعیین می شود. دوره تناوب مود اول باید مشابه با دوره تناوب سکانتی باشد. با استفاده از طیف طرح، تحلیل طیفی براساس فرکانسها و شکل های مودی انجام می شود و حداکثر تغییرمکان بام با استفاده از قوانین ترکیب مودها (مانند SRSS) محاسبه می شود. با استفاده از مقیاس کردن تغییرمکان های مودال به نسبت تغییرمکان هدف به تغییرمکان بام، تغییرمکان های مودی در تراز کفهای ساختمان اصلاح می شود

۲- نیروهای مودی در هر المان و جزئی از قاب ساختمانی در شرایط حداکثر تغییرمکان نسبی محاسبه می شود. مولفه های مختلف نیرویی حاصل از مودهای مختلف سپس براساس قواعد ترکیب مودها با هم ترکیب می شوند.

۳- نیروی میرایی ویسکوز در هر میراگر وابسته به سرعت، با استفاده از تغییرمکان های نسبی و فرکانس های مودال محاسبه می شود.

۴- برای هر مود پاسخ، نیروی میرایی ویسکوز محاسبه شده در مدل ریاضی ساختمان و در محل اتصال میراگر و در جهت های سازگار با آن شکل مودی، وارد می شود.

۵- برای هر مود پاسخ، نیروهای اینرسی افقی در تمام ترازهای طبقه از مدل ریاضی قاب ساختمانی و همراه با نیروهای ویسکوز مودی وارد می شود، به همین دلیل تغییرمکان افقی در تراز هر طبقه صفر است.

۶- مولفه های نیرویی مودال حاصل از اعمال نیروهای اینرسی و ویسکوز محاسبه می شود. این نیروها براساس قواعد ترکیب مودها با یکدیگر ترکیب می شوند.

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 می شود. برای هر مود پاسخ، ضرایب C_{mFD} و C_{mFV} باید براساس الف) میزان میرایی موثر مودی و ب) معادلات (۳-۳۴) و (۳-۳۵) تعیین شود. مولفه نیروی مودی برآیند باید با استفاده از یک قاعده مناسب ترکیب و تعیین شود تا بتوان مولفه های 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.

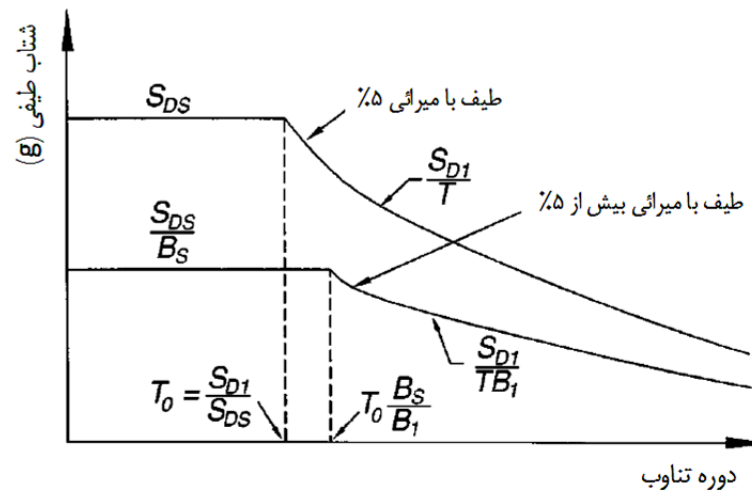
۳-۴-۲-۱-۲- روش طیف ظرفیت

در روش طیف ظرفیت تغییرمکان هدف در ساختمان، با استفاده از منحنی ظرفیت طیفی^۱ (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، Δ ، استفاده می‌شود و تغییرمکان‌های محلی، δ ، در محاسبات آن به کار نمی‌رود.

الف) منحنی نیاز طراحی: پاسخ طیفی میرا شده با میرایی ۵ درصد تهیه می‌شود. برای استفاده از روش طیف ظرفیت برای ارزیابی ساختمان‌ها، طیف میرا شده با میرایی ۵ درصد برای در نظر گرفتن میرایی در ساختمان دارای میراگر، اصلاح می‌شود. این طیف با تقسیم بر 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 (۲-۱) ارائه شده‌است. در شکل (۳-۱۶) نحوه تولید چنین طیف پاسخی از طیف ۵ درصد متناظر آن نشان داده شده‌است. منحنی نیاز طراحی اصلاح شده نیز با تعیین رابطه بین شتاب طیفی و تغییرمکان نسبی برای ساختمان در تراز میرایی متناظر با میرایی موثر ساختمان بدست می‌آید.

^۱ Spectral Capacity Curve



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 می شود.

برای کنترل طرح ساختمان منحنی ظرفیت طیفی براساس طیف نیاز تعریف می شود. منحنی ظرفیت طیفی را می توان براساس شتاب طیفی (S_a) و تغییرمکان طیفی (S_d) تعریف نمود. منحنی ظرفیت طیفی همچنین می تواند از تحلیل push-over ساختمان، به روش زیر حاصل شود:

۱- در گام های تغییرمکانی انتخاب شده برای تحلیل push-over، شکل مودی اصلی ساختمان تعیین می شود. این شکل مودی می تواند 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 تغییرمکان هایی متناظر با تغییرمکان درجه آزادی i ام در سطح تغییرمکان مورد نظر، به نحوی که مقدار تغییرمکان مودی در تراز قائم ϕ_i برابر با δ_i باشد، تعیین شود.

۲- شتاب طیفی به صورت زیر محاسبه می شود:

$$S_a = \frac{V}{W_{sm}} g \quad (42-3)$$

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.

$$W_{sm} = \frac{\left(\sum_{i=1} W_i \phi_{im} \right)}{\sum_{i=1} W_i \phi_{im}^2} \quad (۴۳-۳)$$

۳- تغییرمکان طیفی به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$S_d = \frac{\delta_t}{\phi_{rm} \Gamma_{rm}} \quad (۴۴-۳)$$

که در آن δ_r تغییرمکان تراز بام است که از تحلیل push-over محاسبه شده‌است، ϕ_{rm} میزان شکل مودی در سقف است و Γ_m هم، ضریب مشارکت مودی برای شکل مودی فرضی است که از رابطه (۴۵-۳) بدست آمده است.

$$V_m = \frac{W_{sm} S_{am}}{g} \quad (۴۵-۳)$$

(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 تغییرشکل‌های سیستم قاب ساختمانی باشد.

$$\beta_{eff} = \frac{W_D}{4\pi W_k} + \beta \quad (۴۶-۳)$$

که در آن، W_D میزان انرژی مستهلک‌شده در ساختمان ب (با درنظر 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. در تحلیل push-over، نیروهای جانبی F_i (که به طور معمول تابعی از مقادیر تغییرمکانی هستند) بر وزن‌های موثر فعال (W_i) موجود در درجات آزادی i وارد می‌شوند که تغییرمکان‌های متناظر با آنها برابر با δ_i است. میزان انرژی کرنشی بوجودآمده در ساختمان را می‌توان از رابطه (۴۷-۳) 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 شده‌است، محاسبه شود که آنرا می‌توان 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 می‌تواند 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 δ_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:

$$T_s = 2\pi \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N W_i \delta_i^2}{g \sum_{i=1}^N F_i \delta_i}} \quad (49-3)$$

برای یک سیستم یک درجه آزاد، معادله (۴۹-۳) به صورت زیر ساده می شود:

$$T_s = 2\pi \sqrt{\frac{D_m}{V}} \quad (50-3)$$

که در آن، D تغییرمکان جرم m است و V برابر با میزان برش پایه متناظر با تغییرمکان D است.

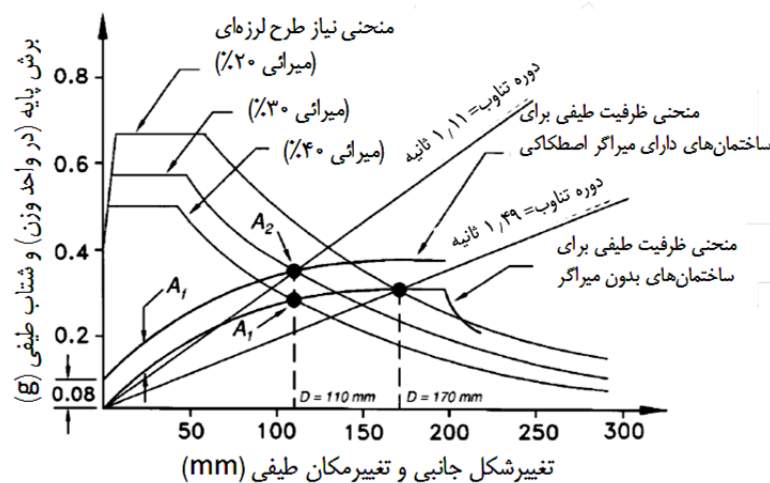
(د) تحلیل ساختمان های دارای میراگرهای وابسته به تغییرمکان: میراگرهای وابسته به تغییرمکان باید به صورت دقیق در مدل های ریاضی مرتبط با ساختمان ها، با المان های دارای رفتار دوخطی، الاستو-پلاستیک یا پلاستیک-صلب (اصطکاکی) مدل شوند.

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، منحنی های push-over و ظرفیت طیفی یکسان اند، یعنی:

$$N=1, \phi_{lm} = 1, \delta_l = \delta_r = D, F_l = I, W_{sm}=W_1, S_a=V_g/W_1, S_d=D$$

منحنی ظرفیت طیفی محاسبه شده برای ساختمان نمونه، برای میرائی های 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:

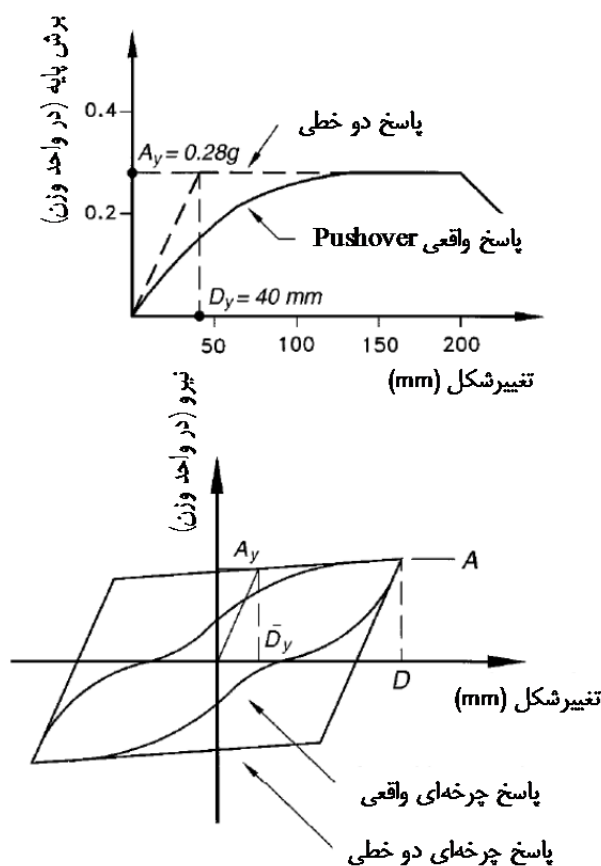
(۱) رابطه نیرو-تغییر مکان ساختمان در شرایط قبل از حضور میراگرها، با استفاده از تحلیل push-over، (۲) میزان میرایی موثر در ساختمان (با استفاده از رابطه (۳-۴۶) و رابطه نیرو-تغییر مکان). میزان میرایی موثر را می‌توان در حلقه‌های لرزه‌ای دو خطی به صورت زیر در نظر گرفت:

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 تغییر مکان D با A نشان داده شده و شتاب طیفی در تغییر مکان تسلیم، D_y ، با A_y معرفی می‌گردد، میرایی موثر می‌تواند به شرح زیر محاسبه شود:

$$\beta_b = \frac{2(A_y D - D_y A)}{\pi A D} \quad (۳-۵۱)$$

$$\beta_{eff} = q\beta_b + \beta \quad (۳-۵۲)$$

که در آن، q ضریبی است کمتر از یک و برابر است با نسبت مقدار واقعی مساحت محصور در حلقه به مقدار مساحت محصور شده 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 تغییر شکل 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 می‌شود مگر اینکه مقادیر بیشتری از محاسبات استخراج شود.



شکل ۳-۱۸- مقایسه منحنی Pushover و چرخه‌های هیستریزس

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، β_{eff} ، در تغییرمکان انتخاب شده و (۳) مقایسه میزان میرائی موثر محاسبه شده با مقدار میرائی روی طیف نیاز طراحی، در هر تراز تغییرمکانی، 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 جداکردن 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:

$$\beta_{eff} = \frac{2A_f D + 2q(A_y D - D_y A)}{\pi A_2 D} + \beta \quad (۳-۵۳)$$

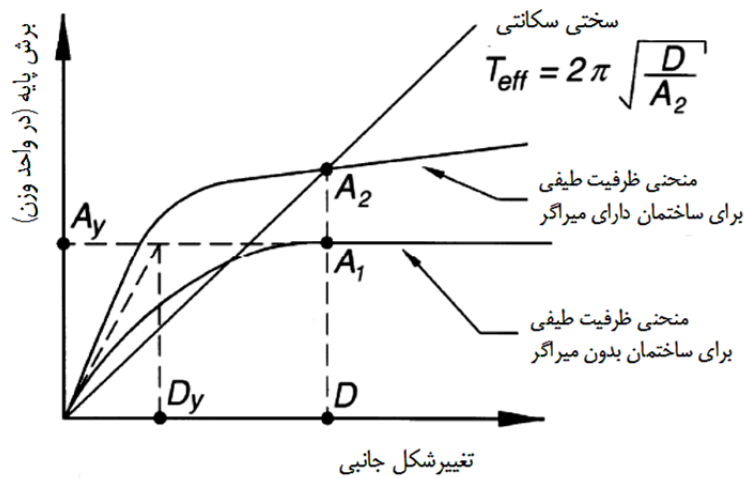
ه) تحلیل ساختمان‌های دارای میراگرهای وابسته به سرعت

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 می تواند در روش استاتیکی غیرخطی با انجام مجموعه ای 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 تغییرمکانی می تواند با محاسبه میزان میرائی موثر از رابطه زیر تعیین شود:

$$\beta_{eff} = \frac{\frac{W_{DE}}{m} + 4q(A_y D - D_y A)}{2\pi A_2 D} + \beta \quad (۵۴-۳)$$

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.

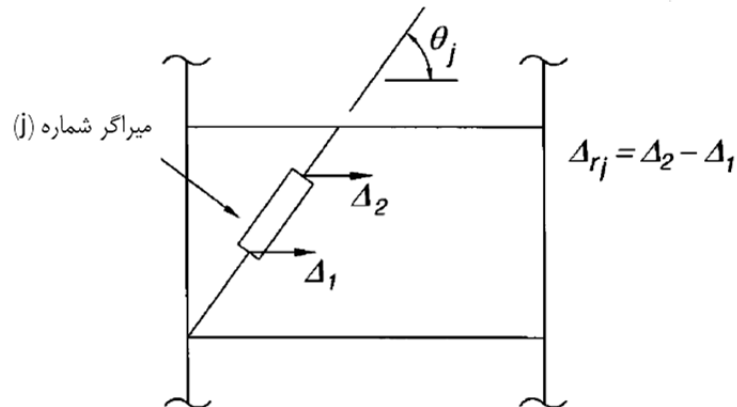


شکل ۱۹-۳- پارامترهای موثر در تحلیل غیرخطی ساده سازی شده ساختمان یک طبقه دارای میراگر ویسکوالاستیک

انرژی تلف شده توسط میراگرهای ویسکوالاستیک از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$W_{DE} = \frac{2\pi^2}{T_s} \sum_i C_j \cos^2 \theta_j \Delta r_j^2 \quad (۵۵-۳)$$

که در آن j شماره میراگرهاست و جمع انرژی روی تمام این میراگرها انجام می شود، C_j ضریب میرائی مربوط به میراگر j -ام (معادله ۳-۳ و ۴-۳) θ_j زاویه انحراف میراگر j -ام نسبت به افق، و Δr_j تغییرمکان نسبی نقاط اتصال میراگر براساس شکل (۳-۲۰) است.



شکل ۳-۲۰- تعریف زاویه و تغییرمکان نسبی در میراگرها

محاسبه نقطه تقاطع نمودارهای ظرفیت-نیاز طراحی، روشی همانند آنچه برای میراگرهای وابسته به تغییرمکان بحث شد خواهند داشت. برای میراگرهای وابسته به تغییرمکان، نیروی اعضاء را می توان براساس نیروها و تغییرمکانهای 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 تغییرمکان گرهی است و سرعتهای گرهی (یا نیروهای ویسکوز) در محاسبه آنها وارد نشده است. تحلیلهای جداگانه ای 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 می شود:

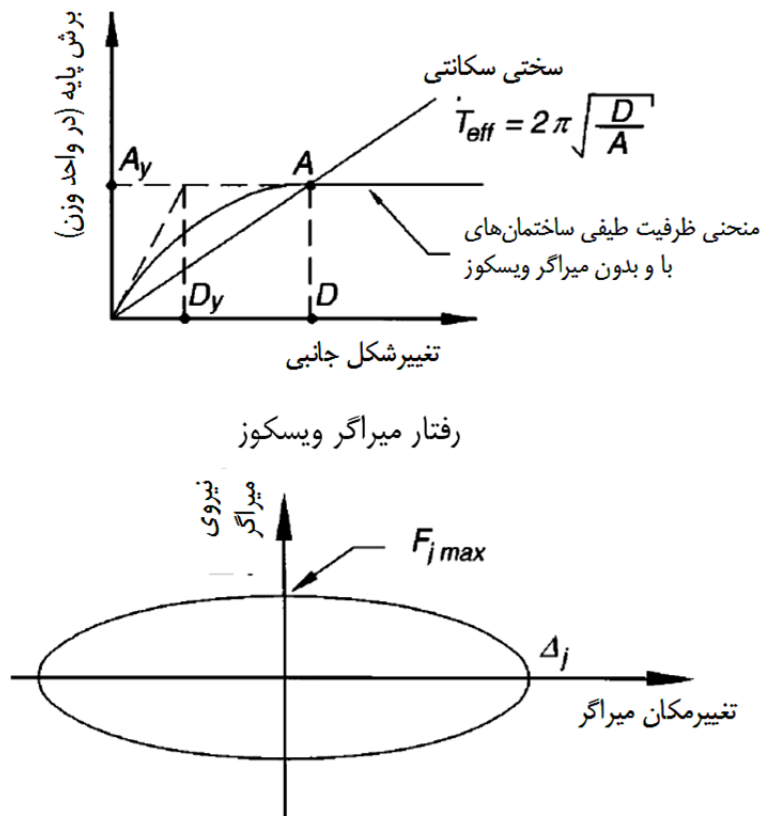
$$F_j = \frac{2\pi}{T_s} C_j A_{rj} \cos \theta_j \quad (۵۶-۳)$$

که در آن، C_j ضریب میرایی میراگر j-ام در دامنه تغییرمکانی $\Delta_{rj} \cos \theta$ است و فرکانس آن نیز متناظر با معکوس زمان تناوب سکانتی تعریف شده است.

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)، میرایی موثر با رابطه زیر بدست می آید:

$$\beta_{eff} = \frac{\frac{W_{DE}}{m} + 4q(A_y D - D_y A)}{2\pi A D} + \beta \quad (۵۷-۳)$$



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:

$$W_{DE} = \sum_i \lambda F_{j \max} \Delta_j \quad (3-58)$$

که در آن، λ تابعی از مولفه سرعت است که از جدول (۳-۴) بدست می‌آید:

جدول ۳-۴- مقادیر پارمتر λ

۲/۰۰	۱/۷۵	۱/۵۰	۱/۲۵	۱/۰۰	۰/۷۵	۰/۵	۰/۲۵	توان α
۲/۷	۲/۸	۲/۹	۳/۰	۳/۱	۳/۳	۳/۵	۳/۷	پارامتر λ

بر همین اساس، کار انجام شده می‌تواند براساس تغییر مکان نسبی Δ_{rj} همانطور که در شکل (۳-۲۰) نشان داده شده‌است، محاسبه شود:

$$W_{DE} = \left(\frac{2\pi}{T_s} \right) \sum_i \lambda C_{0j} |\Delta_{rj} \cos \theta_j|^{1+\alpha} \quad (3-59)$$

که در آن، C_{0j} ثابت میرائی میراگر ج-ام (رابطه ۳-۶) است. برای میراگر ویسکوز غیرخطی، که در آن توان α برابر با ۱/۰ است، رابطه (۳-۶۰) به شکل زیر تغییر خواهد یافت:

$$W_{DE} = \frac{2\pi}{T_s} \sum_i C_{0j} \cos^2 \theta_j \Delta_{rj}^2 \quad (۶۱-۳)$$

که مشابه با رابطه (۵۵-۳) است به جز پارامتر C_{0j} که در رابطه (۵۹-۳) مقداری ثابت است ولی C_j در رابطه (۵۵-۳) 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 (۵۷-۳) تا (۶۰-۳) برای بدست آوردن میرائی موثر ساختمان دارای میراگر به کار می‌روند. لازم به ذکر است که منحنی push-over برای ساختمان دارای 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 تغییرمکان نیروی اعضا می‌تواند براساس نیرو و تغییرمکان 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 (۲۱-۳) تعیین شده است.

$$F_j = \left(\frac{2\pi}{T_s} \right)^\alpha C_{0j} |\Delta_{rj} \cos \theta_j|^\alpha \quad (۶۲-۳)$$

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-تغییرمکان میراگر از آن استفاده کرد انجام تحلیل‌های متعدد بر روی ساختمان دارای میراگر است که در آنها، مقادیر مرزی مشخصات میراگر وارد شده باشد. طراحی یک ساختمان با استفاده از میراگرها، باید براساس حداکثر پاسخ محاسبه شده از تحلیل‌های متعدد باشد.

نیروهای ویسکوز ایجاد شده در اعضای قاب لرزه‌ای (در صورت وجود) باید برای تحلیل و طراحی قاب مورد نظر قرار گیرند. ارزیابی تاریخچه نیروهای اعضا باید براساس تغییرمکان‌های 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 تغییرمکانهای بوجود آمده در میراگر که در طول زلزله طرح رخ می‌دهد، باید در آزمون‌هایی که بر روی میراگر انجام شده است، 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 λ 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 شبیه‌سازی‌شده 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.

۳-۴-۳-۲ رواداری‌های متناظر با مشخصات اسمی

ضرایب λ از جمله $\lambda_{spec,upper}$ و $\lambda_{spec,lower}$ برای اعمال میزان رواداری‌های موجود در متوسط اطلاعات گزارش‌شده 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 سازه‌های دارای چنین ابزارهایی، به کار روند. شناخت تأثیراتی که فرآیند ساخت بر مشخصات طراحی میراگرها می‌گذارد از اهمیت بالایی برخوردار است و ضرایب λ 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 λ به صورت $\lambda_{spec,upper}=1.10$ و $\lambda_{spec,lower}=0.9$ 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 λ 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 λ 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 $\lambda_{effect,upper}$ و $\lambda_{effect,lower}$ شناسایی می‌شوند که به تفکیک و برای هر یک از پدیده‌های موثر بر رفتار، تعیین می‌شوند.

ضریب اصلاح حد بالای مشخصات اسمی طراحی، $\lambda_{PM,upper}$ ، برای هریک از ابزارهای اتلاف انرژی، با ضرب تمامی ضرایب $\lambda_{effect,upper}$ در هم تعیین می‌شود. این مسئله، برای ضریب اصلاح حد پائین مشخصات اسمی طراحی، $\lambda_{PM,lower}$ ، 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 λ تعیین شود. این مسئله توسط ضریب تعدیل مشخصات ابزار اتلاف انرژی (SPAF) که برای اصلاح مقدار λ_{PM} به کار می‌رود، تعیین می‌شود. این ضریب برای تمامی سطوح عملکرد برابر با ۰/۶۷ است.

۳-۴-۳-۴ حدود بالا و پائین مشخصات تحلیل و طراحی

همانطور که قبلاً نیز اشاره شد، با اعمال ضرایب λ 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:

$$\text{الف) حد بالای مشخصات طراحی} = \text{مشخصات اسمی طراحی} \times [1 + \text{SPAF}(\lambda_{PM,upper} - 1)] \times \lambda_{spec,upper}$$

و

حد بالای مشخصات طراحی باید بزرگتر از ۱/۱۵ برابر مشخصات اسمی طراحی باشد.

$$\text{ب) حد پائین مشخصات طراحی} = \text{مشخصات اسمی طراحی} \times [1 - \text{SPAF}(1 - \lambda_{PM,lower})] \times \lambda_{spec,lower}$$

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 غیرخطی 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^{۱۱}

سیستم‌های کنترل فعال^{۱۲}

سیستم‌های کنترل نیمه‌فعال^{۱۳}

سیستم‌های کنترل مختلط^{۱۴}

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^{۱۵} و میراگر با جرم متوازن^{۱۶} نمونه‌هایی از سیستم‌های غیرفعال هستند.

^{۱۱}-Passive Control Devices

^{۱۲}-Active Control Devices

^{۱۳}-Semi – Active Control Devices

^{۱۴}-Hybrid Control Devices

^{۱۵}-Base Isolation

^{۱۶}-Tuned Mass Damper (TMD)

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 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^{۱۷} و تاندون‌های فعال^{۱۸} 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. علاوه، 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. در ادامه، بنحو مبسوط‌تری به بررسی هر یک از روش‌های ذکر شده اقدام می‌شود.

الف- ۲-۲ کنترل غیر فعال سازه‌ها

غیرفعال بودن این سیستم‌های 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 می‌نماید و پس از خاتمه تحریک

^{۱۷}-Active Mass Damper (AMD)

^{۱۸}-Active Tendons

دوباره به حالت غیرفعال باز می‌گردد. این سیستم‌ها مجهز به وسایلی هستند که مشخصات سازه‌ای مثل شکل پذیری، مقاومت و غیره را اصلاح کرده و یا انرژی را مستهلک می‌نمایند. بنابراین طی این عمل، ارتعاشات سازه کاهش می‌یابد.

سیستم‌های کنترل غیر فعال جهت کارکرد به منبع انرژی خارجی نیازی ندارند. این سیستم‌ها با تولید حرکت نسبی درون دستگاه‌های کنترل، با استفاده از حرکت سازه یا تبدیل انرژی جنبشی به گرما، انرژی ورودی به سازه را مستهلک می‌کنند. از آنجا که سیستم‌های مذکور هیچ گونه انرژی خارجی‌ای به سیستم وارد نمی‌کنند، باعث ناپایداری سازه نمی‌شوند. مزیت دیگر آن‌ها، هزینه کم نگهداریشان است. این سیستم‌های کنترل به جهت داشتن مشخصات دینامیکی (جرم، سختی، زمان تناوب و میرایی) ثابت، تا حدودی به ویژگی‌های تحریک مانند دامنه شتاب (PGA) و فرکانس غالب رکورد زلزله حساس هستند. این حساسیت بر میزان کارایی عامل کنترل کننده برای تحریک‌هایی 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 می‌شود.

در حالت کلی، سیستم‌های کنترل غیرفعال براساس روش جذب انرژی‌شان طبقه‌بندی می‌شوند. سیستم‌های مذکور به طور عمده با روشهایی مانند لغزش اصطکاکی، عبور سیالات از روزنه، تغییرشکل ویسکوالاستیک جامدات یا سیالات، تبدیل حالت و تسلیم‌شدگی در فلزات، انرژی را جذب و پاسخ سیستم‌های سازه‌ای را میرا می‌کنند. از انواع سیستم‌های کنترل غیرفعال متداول در سازه‌ها می‌توان به سیستم جداسازی پایه، میراگر با جرم متوازن^{۱۹}، میراگر مایع متوازن^{۲۰}، میراگر جاری‌شونده فلزی^{۲۱}، میراگر اصطکاکی^{۲۲}، میراگر ویسکوالاستیک^{۲۳} و میراگر با سیال ویسکوز^{۲۴} و انتقال انرژی به صورت هدمند^{۲۵} 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 انعطاف‌پذیری 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

¹⁹- Tuned Mass Damper (TMD)

²⁰- Tuned Liquid Damper (TLD)

²¹- Metallic yield Damper

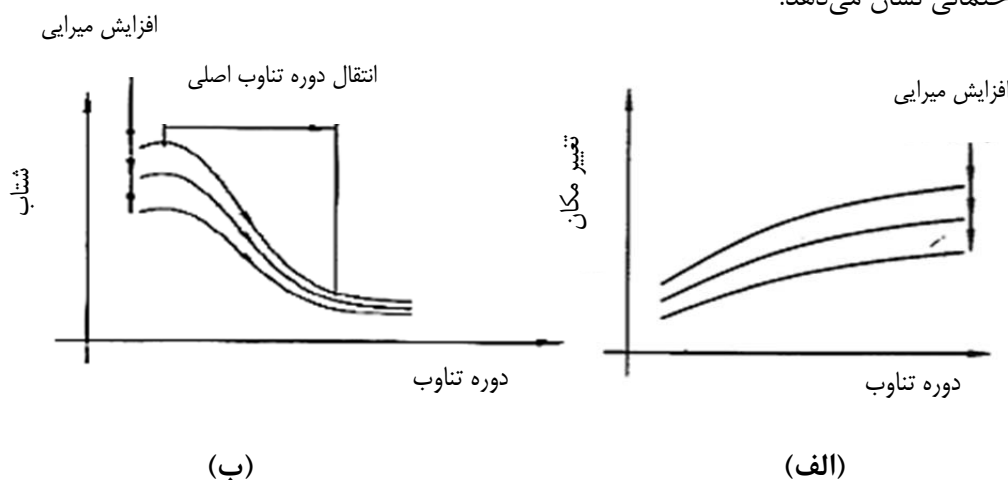
²²- Friction Damper

²³- Viscoelastic Damper (VED)

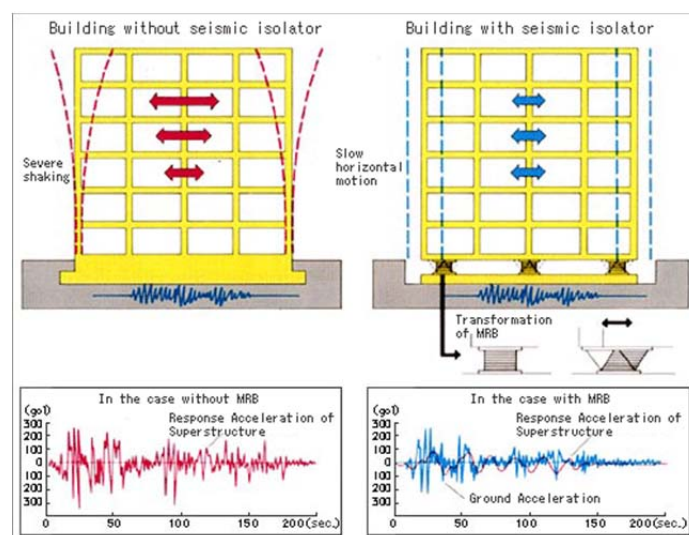
²⁴- Viscous Fluid Damper

²⁵- Targeted Energy Transfer

سیستم جداسازی شده در پایه را با سیستم معمولی مقایسه کرده و شکل الف-۳ کاربرد این جداسازها را در سازه های ساختمانی نشان می دهد.



شکل الف-۱- نحوه عملکرد جداساز لرزه ای: (الف) انتقال دوره تناوب اصلی جهت کاهش انرژی وارد، (ب) افزایش میرایی جهت محدود نمودن تغییر مکان (رابینسون ۱۹۹۸)



شکل الف-۲- مقایسه عملکرد سیستم جداسازی پایه با سیستم قاب معمولی (قاب خمشی)



(ب)



(الف)

شکل الف-۳ (الف) استفاده از جداساز لرزه‌ای در سازه‌های ساختمانی - بیمارستان دالوز^{۲۶}، لیسبن، پرتغال، (ب) آزمایش انجام شده روی جداسازهای استفاده شده در این پروژه

انواع مختلف سیستم‌های جداسازی کف عبارتند از: الاستومرها، جداسازهای سرب-لاستیک^{۲۷}، جداسازهای لاستیکی با میرایی بالا^{۲۸}، ورق‌های اتصال لاستیک مسلح^{۲۹} و جداسازهای آونگی اصطکاکی^{۳۰}. در ادامه به انواع متداول سیستم‌های جداساز لرزه‌ای اشاره می‌شود.

الف-۲-۱-۱-۲-۱- 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 سانتی متر 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 نیوپرن 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 تکیه‌گاه‌ها 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.

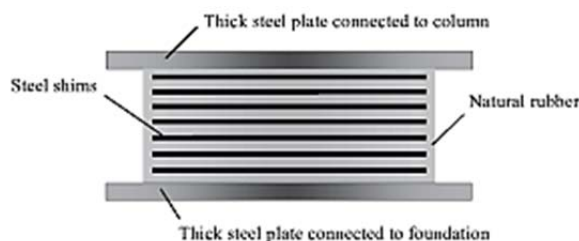
²⁶- Da Luz Hospital

²⁷-Lead-Rubber Bearings

²⁸-High Damping Rubber Bearings

²⁹-Elastomeric Bearing Pads

³⁰-Friction Pendulum System

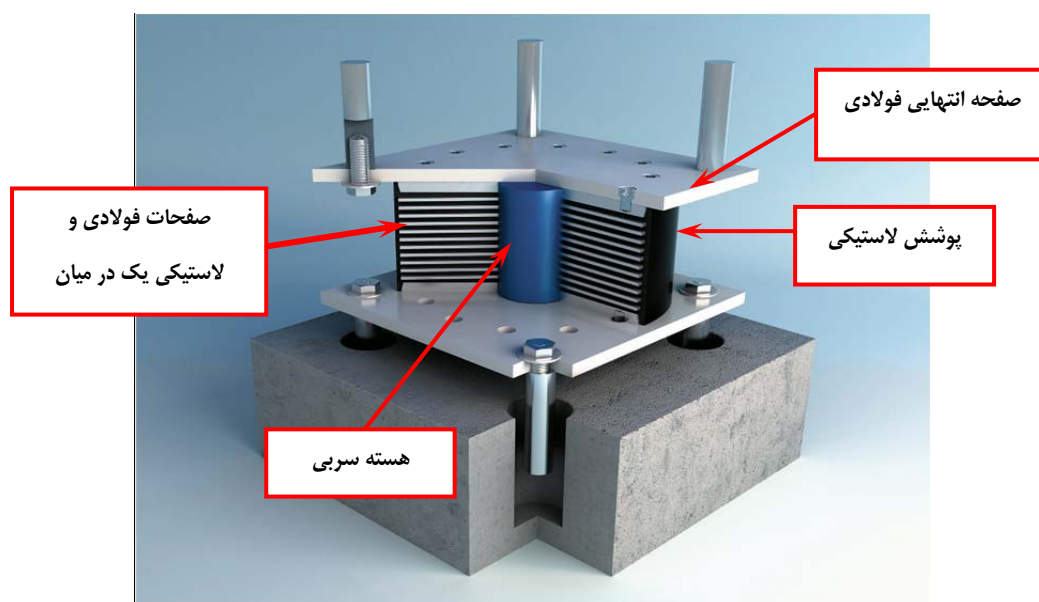


شکل الف-۴- مقطع الاستومر با صفحات فولادی

الف-۲-۱-۲ 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^{۳۱} (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.



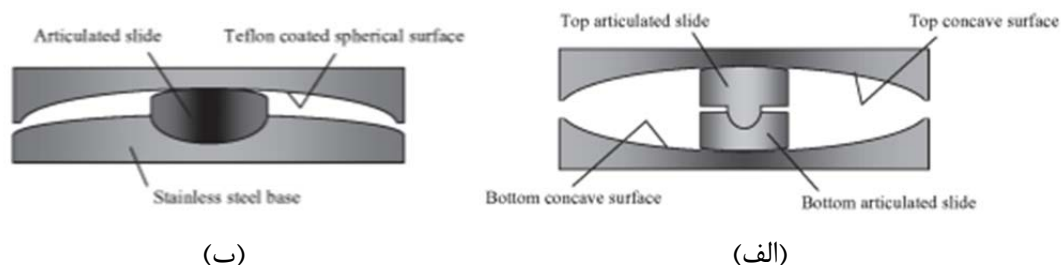
شکل الف-۶- جداساز لرزه‌ای لاستیکی با میرایی بالا

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

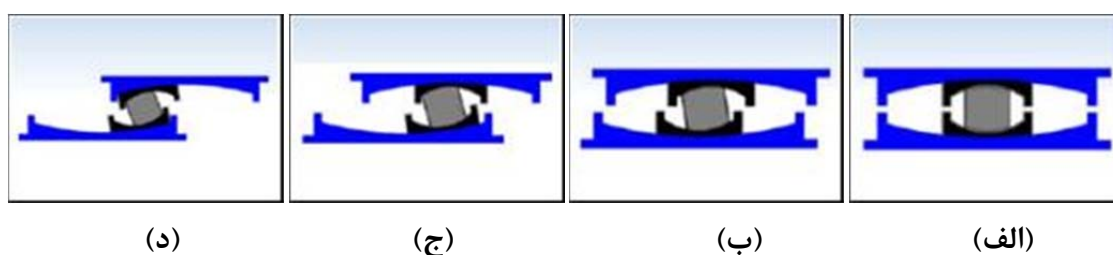
³¹-High Damping Rubber Bearing

تغییرات دما و گذشت زمان تاثیر چندانی در خصوصیات مکانیکی تکیه گاه ندارد. در شکل الف-۷-ب، میراگر با دو سطح مقعر مشاهده می شود. در این حالت به دلیل استفاده از دو سطح مقعر می توان با تکیه گاه های کوچکتر، میزان جابجایی مورد نظر را تامین نمود.



شکل الف-۷-الف) جداساز آونگی اصطکاکی، ب) جداساز آونگی اصطکاکی دوگانه

اخیراً نوع جدیدی از این جداسازها ارائه شده که به سیستم جداساز آونگی اصطکاکی سه گانه^{۳۲} 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 بهره برداری،

(ج) حرکت آونگ پایینی در سطح زلزله طراحی، (د) حرکت آونگ بالایی در سطح حداکثر زلزله معتبر (MCE)

سیستم های جداسازی پایه در ساختمان های زیادی واقع در آمریکا، ژاپن، نیوزلند، ایتالیا و چین بکار گرفته شده است. نمونه هایی از ساختمان های مقاوم سازی شده و یا ساخته شده با استفاده از جداسازهای لرزه ای سرب-لاستیک عبارتند از:

- ساختمان شهرداری اوکلند^{۳۳} در آمریکا (شکل الف-۹-الف)
- ساختمان مرکز پست غرب ژاپن^{۳۴} (شکل الف-۹-ب)
- مرکز کامپیوتر وزارت پست و ارتباطات ژاپن که بعد از زلزله سال ۱۹۹۵ در کوبه ساختن عملکرد بی وقفه داشته و شتاب طبقه ششم آن برابر $0.13g$ بوده در حالیکه شتاب پایه برابر $0.4g$ اندازه گیری شده است.
- بیمارستان آموزشی دانشگاه کالیفرنیا جنوبی (شکل الف-۱۰-الف) که در زلزله سال ۱۹۹۴ لس آنجلس شتاب بام آن برابر $0.21g$ اندازه گیری شده در حالیکه شتاب پایه برابر $0.49g$ بوده است.

^{۳۲}-triple friction pendulum

^{۳۳}-Oakland City Hall

^{۳۴}-West Japan Postal Center

- بیمارستان Olive View که در زمان وقوع زلزله شتاب بام آن $0.23g$ اندازه‌گیری شده در حالیکه شتاب پایه برابر $0.82g$ بوده است.
- بکارگیری جداسازهای لرزه‌ای لاستیکی با هسته سربی در یک ساختمان اداری در ایتالیا (شکل الف-۱۰-ب)



(ب)

(الف)

شکل الف-۹- (الف) ساختمان شهرداری اوکلند، (ب) ساختمان مرکز پست غرب ژاپن (عکس از P.W. Clark)



(ب)

(الف)

شکل الف-۱۰- (الف) جداگر لرزه‌ای بیمارستان کالیفرنیا جنوبی، (ب) ساختمان اداری جداسازی شده در ایتالیا

نمونه‌ای از سازه‌های جداسازی لرزه‌ای شده با استفاده از جداسازهای لرزه‌ای لاستیکی با میرایی بالا در شکل الف-۱۱- نشان داده شده است. این سازه در مرکز مدیریت بحران شهری شهر فولیگنو^{۳۵} ایتالیا با استفاده از ۱۰ عدد جداساز لاستیکی با میرایی بالا و با قطر یک متر ساخته شده است. در شکل الف-۱۱-ج نیز نوع خاصی از بکارگیری جداسازهای لاستیکی در کنار میراگرهای اصطکاکی - دورانی بکار رفته در یک ساختمان ۵ طبقه در ژاپن قابل مشاهده است. در این کاربرد خاص، میراگرها وظیفه استهلاک انرژی را بجای هسته سربی بر عهده دارند.

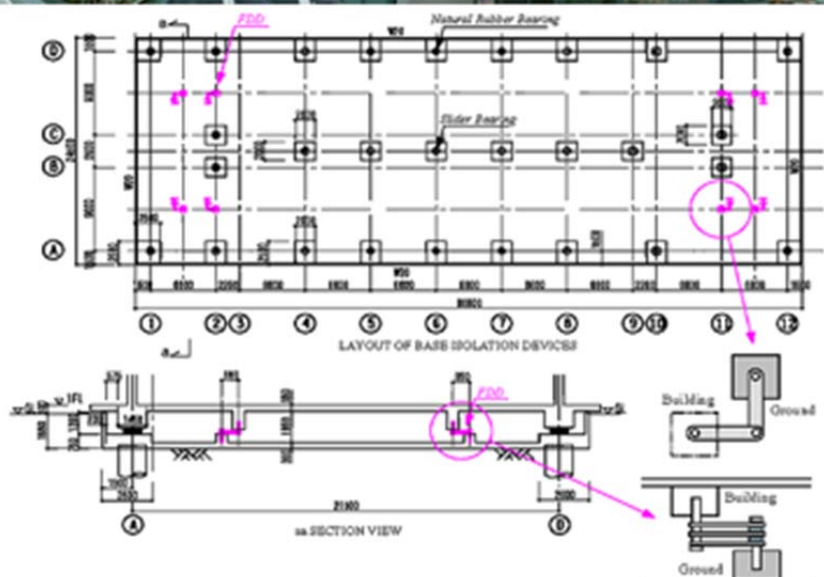
³⁵ Foligno



(ب)



(الف)



(ج)

شکل الف-۱۱- الف) سازه جداسازی لرزه‌ای شده در مرکز مدیریت بحران شهری شهر فولینیو در ایتالیا، ب) سازه جداسازی لرزه‌ای شده. ج) سیستم جداساز لرزه‌ای در یک ساختمان ۵ طبقه در ژاپن همراه با بکارگیری سیستم میرایی

نمونه‌هایی از ساختمان‌های مقاوم‌سازی شده با استفاده از جداسازهای لرزه‌ای آونگی اصطکاکی عبارتند از ساختمان دادگاه استیناف ایالات متحده^{۳۶} در شهر سان فرانسیسکو (شکل الف-۱۲) و ساختمان پایانه 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) (ونگ ۲۰۰۲) و پل Hernando DeSoto در ممفیس (شکل الف-۱۳-ب) آمریکا اشاره نمود.



(ب)



(الف)

شکل الف-۱۲- ساختمان دادگاه استیناف ایالات متحده در شهر سان فرانسیسکو، (ب) پایانه بین المللی فرودگاه سان فرانسیسکو



(ب)



(الف)

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

یکی دیگر از پروژه‌هایی که جهت مقابله با زلزله از جداسازهای آونگی اصطکاکی سه گانه در آن‌ها استفاده شده، پایانه بین المللی فرودگاه سبیحا-گوکن در استانبول است که یکی از بزرگترین ساختمان‌هایی است که بدینوسیله مقاوم‌سازی شده است. در شکل الف-۱۴ سازه این پایانه به همراه جزئیات این جداساز مشاهده می‌شود.

³⁶-U.S. Court of Appeals



(الف)

(ب)

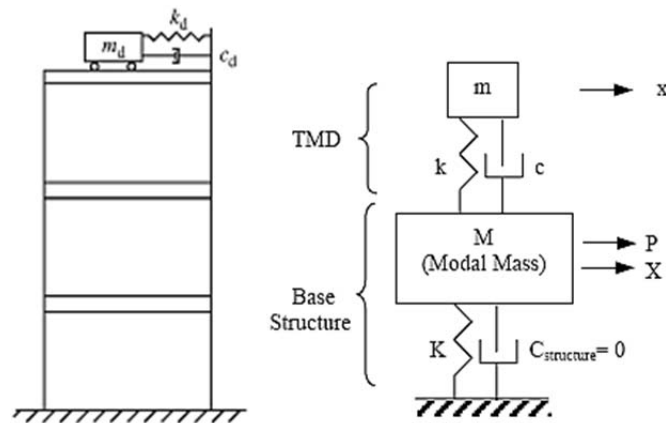
شکل الف-۱۴) پایانه بین المللی فرودگاه سیب‌خا-گوکن شهر استانبول، (ب) جزئیات جداساز مورد استفاده و نحوه اجرای آن

مشاهدات نشان می‌دهد که این سیستم‌ها مؤثر بوده و نیرویی که از زمین به سازه منتقل می‌شود را به میزان قابل توجهی کاهش می‌دهند. می‌توان 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 می‌تواند هزینه‌های 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 تکیه‌گاه سازه است، که موجب ناپایداری آن می‌شود.

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).

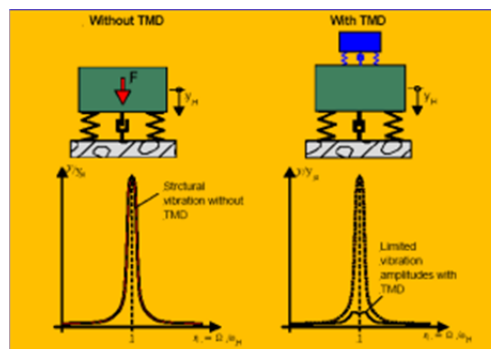
برای این کار یک جرم اضافی (در حدود ۱ تا ۲ درصد جرم مؤثر مدی اولین مد ارتعاشی سازه) در ارتفاع مناسبی از سازه نصب شده و فرکانس زاویه‌ای ارتعاش آن با فرکانس زاویه‌ای مد اول سازه هماهنگ می‌شود تا ارتعاشات سازه را کنترل نماید.



شکل الف-۱۵- سیستم سازه‌ای دارای میراگر با جرم متوازن

در واقع TMD توسط ارتعاشات سازه‌ای تحریک شده و بخشی از انرژی وارده 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^{۳۷} (۱۹۹۳)، واربرتون^{۳۸} (۱۹۸۲) و فوجینو و ایب^{۳۹} (۱۹۷۹) ارائه شده است.

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

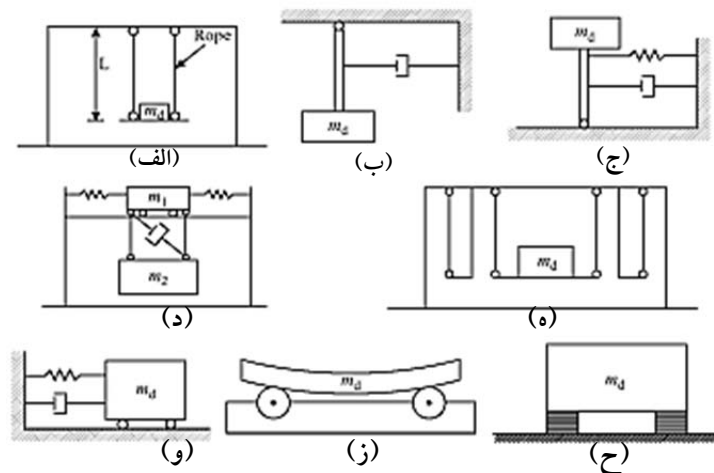
طرح‌های مختلفی که می‌توانند به عنوان TMD به کار روند، در شکل الف-۱۷ مشاهده می‌شود.

^{۳۷}-Luft

^{۳۸}-Warburton

^{۳۹}-Fujino and Abe

نیروی مقاوم (بازگرداننده) می تواند 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 می تواند 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 بگونه ای که علاوه بر طول بازوی آونگ، فرکانس TMD تابع خصوصیات دیگری نیز باشد. به عنوان مثال، می توان بازوی آونگ را به یک فنر متصل نمود (شکل الف-۱۷-ج)، همچنین می توان از میراگر دو جرمی (شکل الف-۱۷-د) استفاده کرد به گونه ای که یکی از جرم ها روی کف ساختمان بلغزد و دیگری به عنوان آونگ عمل نماید؛ یا می توان از آونگ چند مرحله ای (شکل الف-۱۷-ه) استفاده کرد و بدین صورت فضای قائم مورد نیاز کاهش را کاهش داد.



شکل الف-۱۷- طرح های مختلف برای میراگر جرمی تنظیم شده

(الف) آونگ ساده، (ب) آونگ به همراه میراگر، (ج) آونگ معکوس به همراه فنر و میراگر، (د) میراگر دو جرمی، (ه) میراگر چند مرحله ای، (و) جرم لغزنده به همراه فنر و میراگر، (ز) جرم قرار گرفته روی تکیه گاه های دوار، (ح) جرم روی تکیه گاه های لاستیکی

استفاده از TMD ها به صورت عنوان شده دارای محدودیت هایی می باشد:

TMD ها تنها برای کاهش پاسخ یک مد موثرند و همین امر باعث کاهش استفاده از آن ها جهت کنترل پاسخ های سازه در برابر بارهای لرزه ای می شود.

TMD ها فوق العاده نسبت به فرکانس تنظیمی حساس می باشند.

TMD ها فضای زیادی را اشغال می نمایند.

جهت رفع این محدودیت ها خصوصاً موارد ۱ و ۲، در صنعت معمولاً یا از میراگرهای جرمی تنظیم شده فعال یا مختلط استفاده می شود که در بخش های مربوطه به آن ها 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^{۴۰}

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 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.

⁴⁰-John Hancock Tower

جدول الف ۱- استفاده از TMD ها 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	$0/49 \text{ Hz}$ 10 T.
برج خنک کننده (۲۷۸ متر) Deutsche Bundespost	نورنبرگ، آلمان	۱	۱۹۸۲	$0/67 \text{ Hz}$ $1/5 \text{ T.}$
کارخانه سیمان یانبو (Yanbu) دودکش (۸۱ متر)	عربستان سعودی	۱	۱۹۸۴	$0/49 \text{ Hz}$ 10 T.
ژنراتور بادی هیدرو-کبیک (Hydro-Quebec)	کانادا	۱	۱۹۸۵	$0/7-1/20 \text{ Hz}$ 18 T.
برج بندر چیبا (۱۲۵ متر)	چیبا، ژاپن	۲	۱۹۸۶	$0/43-0/44 \text{ Hz}$ $10, 15 \text{ T.}$
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	$0/99 \text{ Hz}$ $4/5 \text{ T.}$
کارخانه روتیل Tiwest دودکش (۴۳ متر)	استرالیا	۱	۱۹۸۹	$0/92 \text{ Hz}$ 5 T.
برج فوکوآکا (Fukuoka) (۱۵۱ متر)	فوکوآکا، ژاپن	۲	۱۹۸۹	$0/31-0/33 \text{ Hz}$ $25, 30 \text{ T.}$
برج City Corp (برج ساختمانی به ارتفاع ۲۷۸ متر)	نیویورک، ایالات متحده آمریکا	۱	۱۹۷۸	$0/16 \text{ Hz}$ 350 T. میرایی بدون ~۱TMD میرایی با TMD ~۴٪
آسمان خراش هیگاشیاما (Higashiyama) (۱۳۴ متر)	ناگویا، ژاپن	۱	۱۹۸۹	$0/49-0/55 \text{ Hz}$ 20 T.
Huis Ten Bosch Domtoren	کانادا	۱	۱۹۸۵	$0/7-1/20 \text{ Hz}$ 18 T.
آسمان خراش هیبیکیریوکوجی (Hibikiriyokuchi) (۱۳۵ متر)	چیبا، ژاپن	۲	۱۹۸۶	$0/43-0/44 \text{ Hz}$ $10, 15 \text{ T.}$

نام و نوع سازه	شهر/کشور	نوع و تعداد TMD غیرفعال	سال	توضیحات (فرکانس طبیعی، جرم موثر و ...)
دودکش HKW (۱۲۰ متر)	ژاپن	۱	۱۹۸۷	-
دودکش BASF (۱۰۰ متر)	یوکوهاما، ژاپن	۱	۱۹۸۸	-
نیروگاه زیمنس (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)	فوکوئاکا، ژاپن	۲	۱۹۸۹	۰/۳۱-۰/۳۳ Hz ۲۵، ۳۰ T.
برج آکیتا (۱۱۲ متر)	ناگويا، 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.
الخبار (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. پریود 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 می‌باشد (شکل الف-۱۹-ب). این میراگر به گونه‌ای طراحی شده که در دو جهت سازه ساختمان، دارای پریود کاری متغیر $6/25 \pm 0.2$ ثانیه و میرایی خطی قابلیت تنظیم بین ۰.۸٪ و ۱.۴٪ بوده و حداکثر جابجائی آن به $1/4 \pm$ متر محدود گردیده است. با استفاده از این میراگر انتظار می‌رود 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×عرض×ارتفاع) که بر روی ۱۲ بلبرینگ تحت فشار هیدرولیکی به قطر ۶۰ سانتی‌متر قرار دارد.



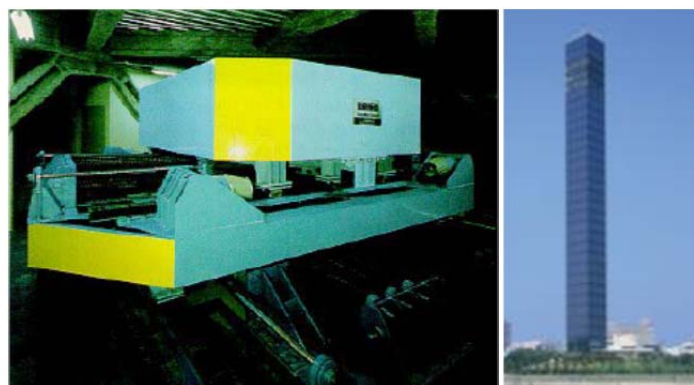
(ب)

(الف)

شکل الف-۱۹- (الف) برج City Corp. (ب) TMD نصب شده در برج

ج) برج بندر چیبای^{۴۱}

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). پیوند مد اول و دوم در جهت X به ترتیب برابر ۲/۲۵ ثانیه و ۰/۵۱ ثانیه بوده و در جهت Y این پیوندها به ترتیب برابر ۲/۷ ثانیه و ۰/۵۷ ثانیه است. میرایی مد اصلی برابر ۰/۵٪ تخمین زده شده است. میرایی متناسب با فرکانسهای 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، پیوند 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 ± 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.



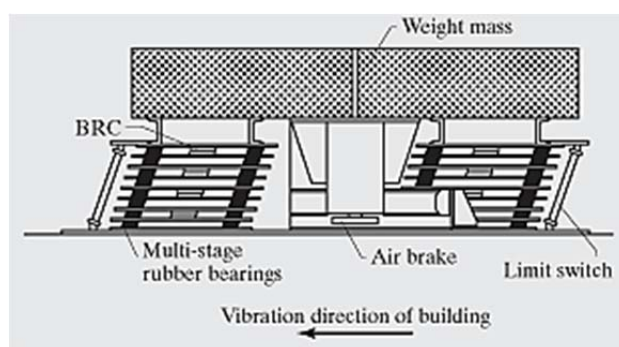
(ب)

(الف)

شکل الف-۲۰- (الف) برج بندر چیبای، (ب) TMD نصب شده در برج (حق چاپ برای J. Connor)

⁴¹-Chiba Port Tower

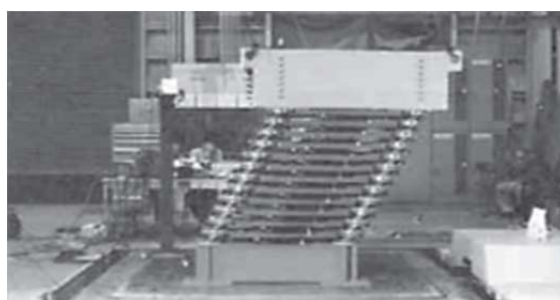
میراگرهای اولیه دارای مکانیزم‌های پیچیده‌ای برای سیستم‌های تکیه گاهی و میرایی بودند، جرم‌های نسبتاً زیادی داشتند، فضای زیادی را اشغال می‌کردند و بسیار پرهزینه بودند. در نسخه‌های کنونی، همانند شکل الف-۲۱ طراحی بگونه‌ای صورت می‌گیرد که محدودیت‌های فوق کمینه شوند. در این شکل از مجموعه‌ای از الاستومرها به عنوان فنر برشی و ترکیب لاستیک و قیر^{۴۲} به عنوان میرایی ویسکوالاستیک استفاده شده است. ابعاد و اندازه دستگاه مناسب است، ضمن اینکه نیازی به سیستم‌های کنترلی پیچیده نمی‌باشد، به صورت چند جهت 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



(ب)



(الف)

شکل الف-۲۲- نمونه‌ای از TMD آزمایش شده بر روی میز لرزه، (ب) TMD برج Ten Bosch ناگاساکی (حق چاپ برای J. Connor)

(د) برج تایپه ۱۰۱ تایوان^{۴۳}

برج تایپه ۱۰۱ که به مرکز تجارت جهانی تایپه نیز معروف است یکی از آسمان خراش‌های شاخص در دنیا می‌باشد. این ساختمان از سال ۲۰۰۴ تا سال ۲۰۰۹ به عنوان بلندترین برج ساختمانی دنیا شناخته می‌شد. در سیستم مقاوم در برابر باد این سازه، از سیستم میرایی جرم متوازن پاندولی که متشکل از یک گوی به عنوان جرم و کابل‌های نگهدارنده و همچنین میراگرهای ویسکوز است استفاده شده است. عملکرد سیستم میرایی جرم متوازن این برج بارها

^{۴۲}-Bitumen Rubber Compound (BRC)

^{۴۳} Taipei 101

تحت بارهای طوفان تایوان و همچنین زلزله، در حالی تجربه شده که ناظران در ایوان اطراف سیستم میرایی شاهد جابه‌جایی‌های کنترل شده سازه بوده‌اند. در شکل الف-۲۳ برج تایپه ۱۰۱ و سیستم میرایی جرم متوازن آن قابل مشاهده است.



(ب)



(الف)

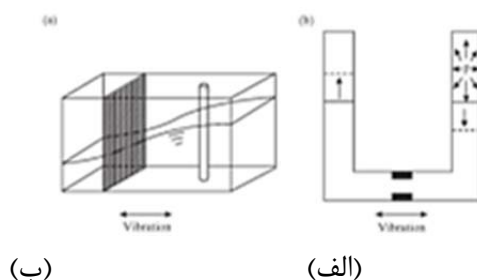
شکل الف-۲۳- (الف) برج تایپه ۱۰۱، (ب) میراگر جرمی متوازن پاندول کابلی و میراگرهای ویسکوز

الف-۲-۲-۳- میراگر مایع متوازن^{۴۴} (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 می‌شود به سیستم سازه‌ای اولیه اضافه می‌شود. گرانش به صورت نیروی بازگرداننده عمل کرده و ائتلاف انرژی عمدتاً از طریق اغتشاش محیط مایع و اصطکاک مایع با جداره بدست می‌آید. در شکل الف-۲۴ دو نمونه متداول از TMDها مشاهده می‌شوند. در نمونه نوسانی حرکت افقی محفظه موجب حرکت رفت و برگشتی سطح آزاد مایع می‌شود. نمونه ستونی مایع متوازن^{۴۵} (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 می‌شود. 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.

⁴⁴- Tuned Liquid Damper

⁴⁵- Tuned Liquid Column Damper



شکل الف-۲۴- میراگر TLD، الف) ستونی روزنه^{۴۶} دار، ب) نوسانی^{۴۷} 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 ساده‌ی منطقی 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 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.

الف) برج بین‌المللی فرودگاهی توکیو^{۴۸}

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 سانتی‌متر و ارتفاع ۱۲/۵ سانتی‌متر

^{۴۶}-Orifice

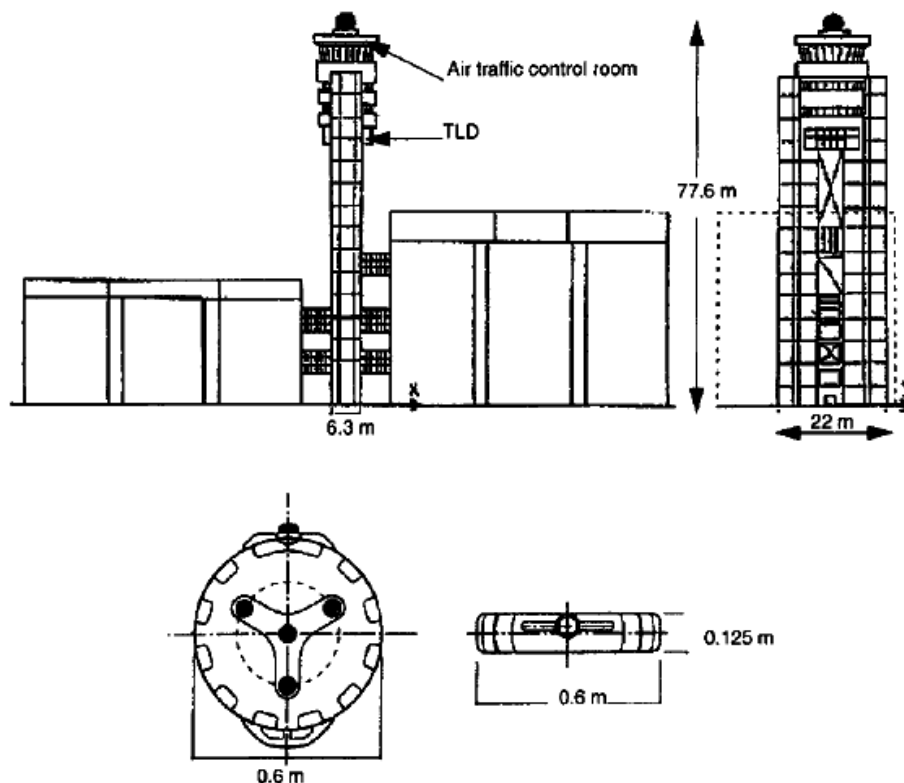
^{۴۷}-Sloshing

^{۴۸}-Tokyo airport tower

هستند (شکل الف-۲۵). بر اساس داده‌های بدست آمده پس از یک طوفان، استفاده از میراگر مایع متوازن باعث افزایش میرایی تا ۱٪ شد.

جدول الف-۲- استفاده از TLDها در سطح بین المللی

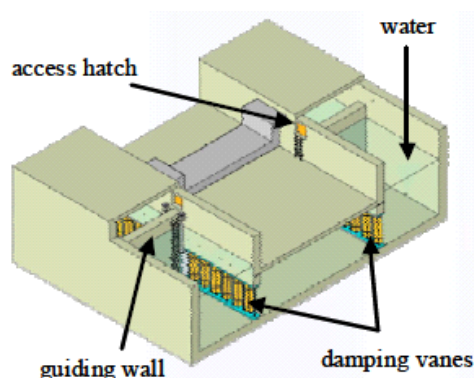
نام و نوع سازه	شهر/کشور	نوع و تعداد TLD غیرفعال	سال	توضیحات (فرکانس طبیعی، جرم موثر،...)
برج فرودگاه ناگازاکی (۴۲ متر)	ناگازاکی	۲۵ - نوسانی در مخزن استوانه‌ای	۱۹۸۷	۱/۰۷ Hz ۱ T. (تقریبی)، (نصب موقت)
برج دریایی یوکوهاما (۱۰۵ متر)	یوکوهاما، ژاپن	۳۹ - نوسانی در مخزن استوانه‌ای	۱۹۸۷	۰/۵۵ Hz ۱/۶ T.
برج طلایی (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.



شکل الف-۲۵- برج فرودگاه بین المللی در توکیو و نمایی از واحدهای میراگر مایع که روی برج نصب شده است

(ب) مرکز کامکست^{۴۹}

در این برج ۵۸ طبقه به ارتفاع ۲۹۷ متر واقع در شهر فیلادلفیای ایالت پنسیلوانیا، جهت کنترل ارتعاشات ناشی از باد از میراگر مایع متوازن استفاده شده است (شکل الف-۲۶-الف). میراگر متشکل از محفظه بتنی دوجداره با ظرفیت ۱۱۰۰ مترمکعب، بزرگ ترین میراگر از این نوع در آمریکای شمالی می باشد (شکل الف-۲۶-ب). این سیستم دارای عرض زیادی می باشد و مخزن آن برای کارایی بهتر به دو قسمت تقسیم شده است.



(ب)



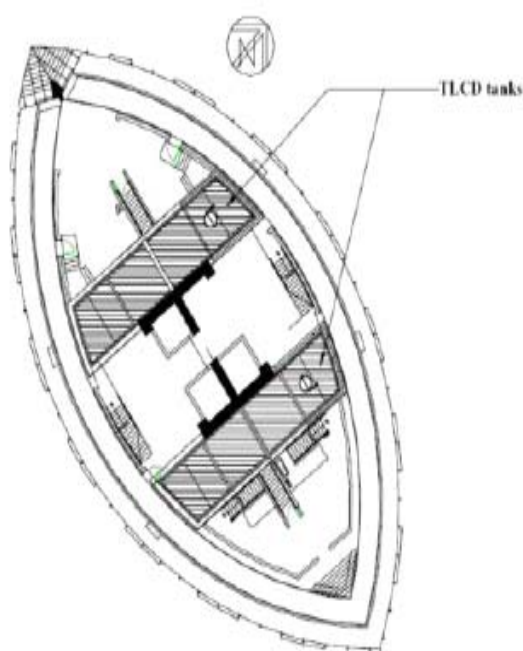
(الف)

شکل الف-۲۶- (الف) برج کامکست، (ب) مخزن بتنی متشکل از دو بخش

⁴⁹-Comcast Center

(ج) مرکز وان وال^{۵۰}

این برج ۴۸ طبقه به ارتفاع ۱۵۷/۸ متر که در ونکوور^{۵۱} کانادا واقع است که دارای پلانی بیضی شکل و شامل دو میراگر مایع متوازن در بالاترین تراز است (شکل الف-۲۷). 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 ناراضایتی 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.



(ب)



(الف)

شکل الف-۲۷- الف) ساختمان One Wall Center در کانادا، ب) پلان ساختمان نشان دهنده موقعیت میراگرها

(د) هتل سافیتل^{۵۲}

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 می‌کند، 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 می‌کند. این

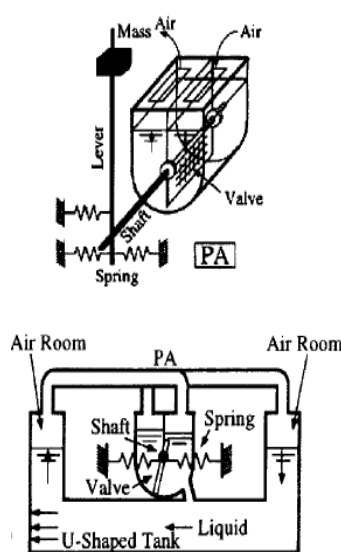
⁵⁰-One Wall Center

⁵¹-Vancouver

⁵²-Sofitel Hotel

نوسانات سینوسی فشار، حرکت مایع درون مخزن را تقویت می‌کند که البته در اثر آن شیر، شفت و فنرها نیز به حرکت در می‌آیند.

میراگر مورد استفاده در این هتل از نوع ستونی دوجته با مقطع مستطیلی با چهار دستگاه تنظیم پریود بوده و وزن کل و وزن موثر مایع آن به ترتیب برابر ۵۸ و ۳۶ تن می‌باشد. بخشی از مخزن خالی بوده تا مایع بصورت آزاد قادر به حرکت باشد. همچنین دارای چهار مخزن قائم^{۵۳} (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-۲۸- (الف) هتل سافیتل، (ب) جزئیات میراگر مایع متوازن با قابلیت تنظیم پریود

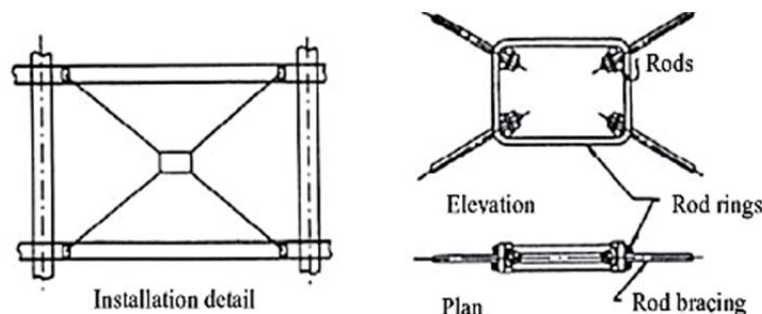
الف-۲-۲- میراگر جاری شونده فلزی^{۵۴}

یکی از مکانیزم‌های مؤثر جهت استهلاک انرژی ورودی ناشی از زلزله، استفاده از تغییرشکل غیرالاستیک فلزات (شکل‌پذیری) 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-۲۹- الف اتلاف انرژی توسط تغییرشکل‌های غیرالاستیک کششی قاب مستطیلی شکل فولادی در جهت قطری بادبند 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.

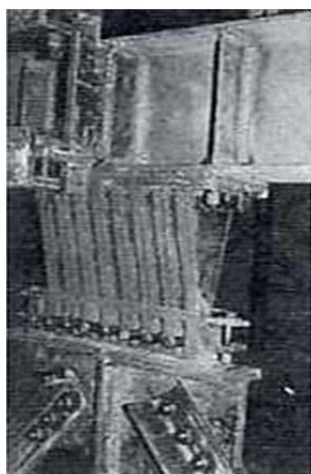
⁵³-Vertical Reservoir

⁵⁴-Metallic Yield Dampers

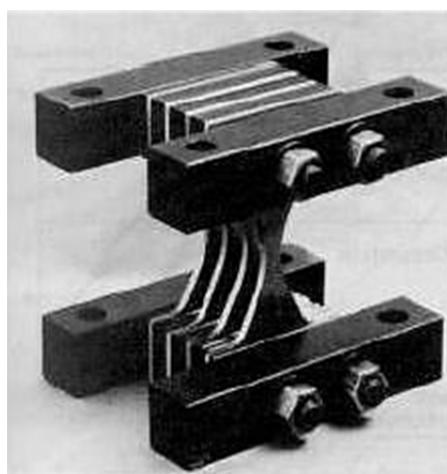
در بسیاری از میراگرهای جاری شونده فلزی، از ورقهای فلزی نرم با شکل‌های مستطیلی، ^{۵۵}(ADAS) X (شکل الف-۲۹ ب) یا مثلثی ^{۵۶}(TADAS) شکل (شکل الف-۲۸ ج)، که فلز آنها تقریباً به طور یکنواخت تسلیم می‌شود، استفاده می‌شود. ورق‌ها به صورت موازی و به تعداد مورد نیاز در کنار هم قرار گرفته و نهایتاً میراگر در انتهای 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-۳۰)؛ 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 ^{۵۷} و آلیاژهای حافظه دار ^{۵۸} 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.



(الف)



(ج)



(ب)

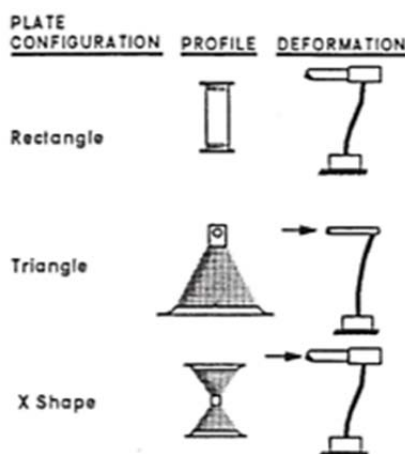
شکل الف-۲۹- الف) سیستم میراگر جاری شونده فلزی در بادبند (تایلر ۱۹۸۵)، ب) میراگر ADAS، ج) میراگر TADAS

^{۵۵} Added Damping And Stiffness

^{۵۶} -Triangular Added Damping And Stiffness

^{۵۷} -Lead

^{۵۸} -Shape – Memory Alloys



شکل الف-۳- تغییر شکل ها ورق ها با شکل های گوناگون

سایر شکل‌بندی میراگرهای جاری شونده فلزی عبارتند از نوع خمشی لانه زنبوری^{۵۹}، میراگرهای شکاف‌دار^{۶۰} و نوع پانل برشی^{۶۱}. ویژگی‌های مطلوب این میراگرها عبارتند از:

۱- رفتار هیسترتیک پایداری دارند.

۲- در دراز مدت قابل اعتماد هستند.

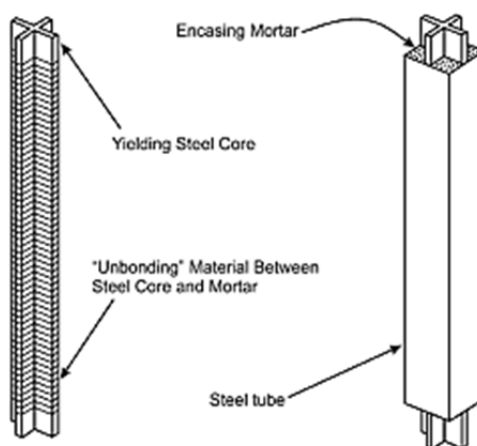
۳- حساسیت نسبی آن‌ها به دمای محیط ناچیز است.

نوع دیگری از نحوه بکارگیری اصل جاری شدن فلزات، استفاده از آن‌ها بعنوان بادبند می‌باشد. این بادبندها دارای یک هسته از جنس ورق فلزی هستند که در یک قوطی فلزی پر شده با بتن قرار می‌گیرند (شکل الف-۳۱). جهت کاهش اصطکاک، یک پوشش مخصوص بین هسته فلزی و بتن قرار گرفته است. ورق فلزی هسته، دارای خاصیت استهلاک انرژی پایدار توسط تسلیم شدن تحت بارگذاری محوری رفت و برگشتی است. به علت اینکه پروفیل فلزی با بتن احاطه شده، تحت بارگذاری فوق دچار کمانش فشاری نمی‌شود.

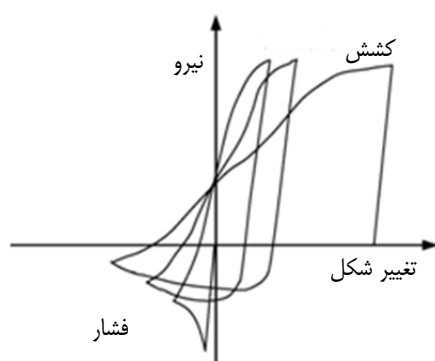
⁵⁹-Bending Type of Honeycomb

⁶⁰-Slit Dampers

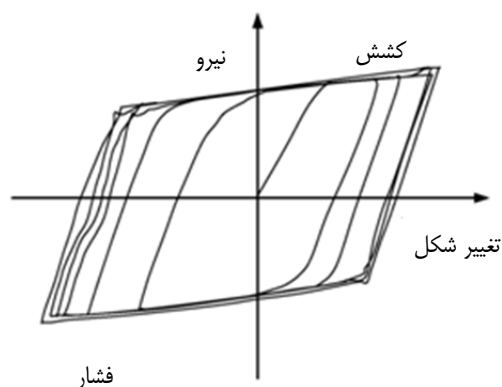
⁶¹-Shear Panel Type



(الف)



بادبند معمولی



بادبند کماتش ناپذیر

(ب)

شکل الف-۳۱- 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^{۶۲} 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 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 کماتش ناپذیر^{۶۳} BRB با نیروی جاری شدگی بین ۹۱۷ تا ۸۴۷۷ کیلونیوتن و طول های ۳/۴ و ۸/۸ متر استفاده شده است. در شکل الف-۳۲ نمای ساختمان مقاوم‌سازی شده

⁶²-Wasatch Fault

⁶³-Buckling Restrained Brace

در دو دهانه ممتد نشان داده شده است. این ساختمان اولین ساختمان فدرالی است که از بادبندهای کمانش‌ناپذیر جهت مقاوم‌سازی آن استفاده شده است.



(ب)

(الف)

شکل الف-۳۲- الف) ساختمان فدرال Wallace F. Bennett، ب) مقاوم سازی با بادبندهای BRB

ب) مرکز پزشکی Kaiser Santa Clara واقع در Santa Clara 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 کمانش‌ناپذیر (BRB) استفاده شده است. این ساختمان بین دو گسل بزرگ سان اندریاس^{۶۴} و هیوارد^{۶۵} قرار دارد و در معرض زلزله‌های حوزه نزدیک گسل است. طراحی لرزه‌ای برای دو سطح عملکرد صورت گرفت. حداکثر دریفت^{۶۶} ۱/۲۵٪ تحت زلزله سطح طراحی با دوره بازگشت ۴۷۵ سال و حداکثر دریفت ۲/۲۵٪ تحت زلزله کران بالا با دوره بازگشت ۹۷۵ سال. در طراحی نهایی، بادبندها در دو جهت اصلی در هر طبقه در ۱۰ دهانه به صورت ۸ (شورون) در نظر گرفته شدند (شکل الف-۳۳) 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.

⁶⁴-San Andreas

⁶⁵-Hayward

⁶⁶-Drift



(ب)

(الف)

شکل الف-۳۳- الف) بیمارستان Kaiser Santa Clara, ب) بکارگیری بادبندهای BRB

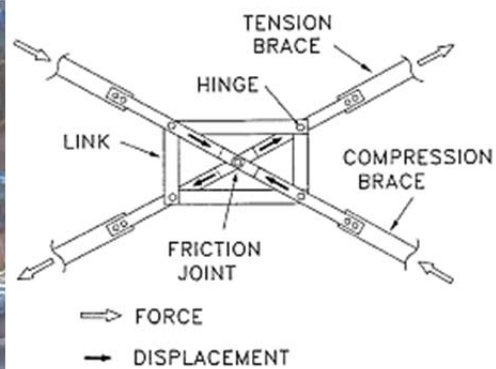
الف-۲-۲-۵- میراگر اصطکاکی

میراگرهای اصطکاکی از جمله اولین وسایل استهلاک انرژی هستند که توسط مهندسان در جهت کنترل پاسخهای لرزه‌ای سیستم‌های سازه‌ای بکار گرفته شده‌اند. با پیشرفت تکنولوژی و تجربیات بدست آمده از رخدادهای طبیعی و همچنین آزمایش‌های متعدد انجام شده، نسل‌های جدیدی از میراگرهایی که اساس عملکرد آنها بر پایه استفاده از اصطکاک می‌باشند، توسعه یافته‌اند. اطمینان از عملکرد قابل پیشبینی و پایدار در کوتاه مدت و دراز مدت، مطابق آنچه در طراحی سازه مجهز به سیستم میرایی فرض می‌شود، مهمترین مسئله در بکارگیری هر نوع سیستم میرایی است. در مورد میراگرهای اصطکاکی، مکانیک تماس دو سطح و اصطکاک قبل و در حین لغزش، مهمترین مسئله در این خصوص بوده و دانشمندان زیادی روی این موضوع مطالعه نموده‌اند.

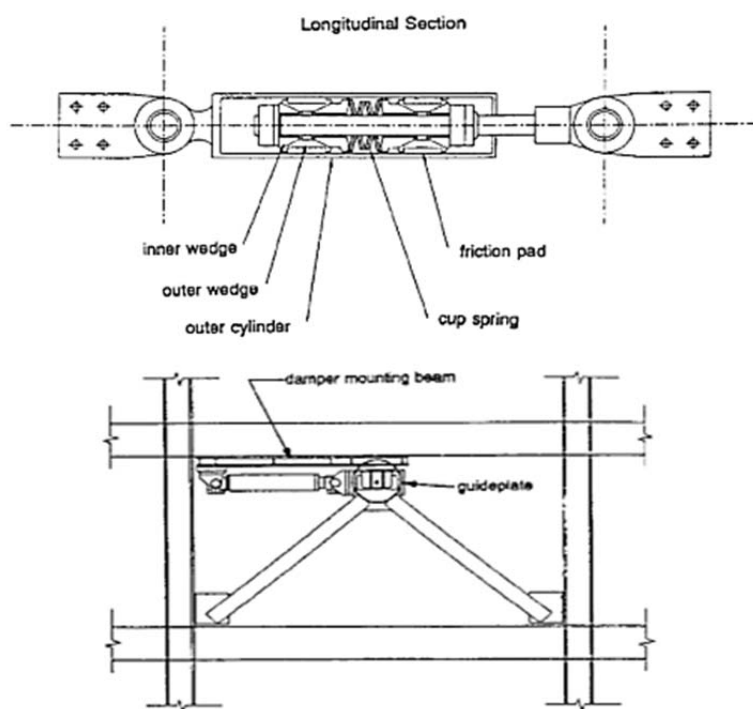
در میراگرهای اصطکاکی در اثر اصطکاک ناشی از لغزش دو جسم جامد نسبت به یکدیگر انرژی قابل توجهی مستهلک می‌شود. در طول یک زمین لرزه شدید، میراگرهای اصطکاکی تحت یک نیروی از پیش تعیین شده قبل از آنکه اعضای سازه‌ای جاری شوند شروع به لغزش کرده، بخش زیادی از انرژی وارد بر سازه را مستهلک می‌کنند.



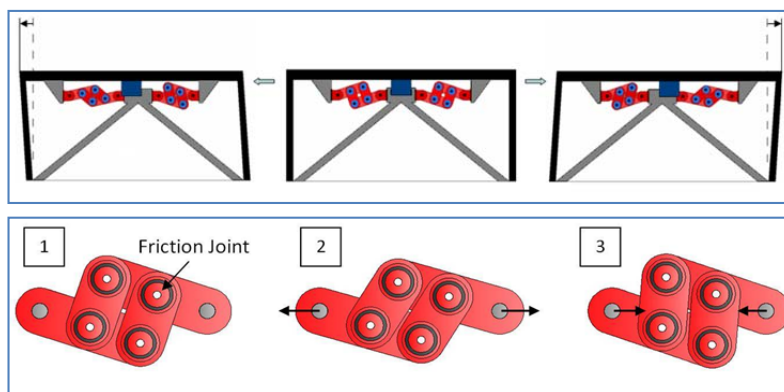
(ب)



(الف)



(ج)



(د)

شکل الف-۳۴- الف) میراگر اصطکاکی صرفا کششی ب) میراگر اصطکاکی انتقالی ج) میراگر سومیتومو د) میراگر اصطکاکی -

دورانی

در اوایل دهه ۹۰ میلادی، پال و مارش^{۶۷} (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-۳۴-الف میراگر اصطکاکی بادبندی ضربدری مشاهده می‌شود. در شکل الف-۳۴-ب میراگر اصطکاکی انتقالی قابل مشاهده است. در شکل الف-۳۴-ج مدل میراگر اصطکاکی سومیتومو^{۶۸} که بر روی بادبند شورون (۸) نصب شده، نشان داده شده است. در میراگرهای اصطکاکی عدم تغییر تاثیر گذار در مشخصات رفتار اصطکاکی از جمله ضریب اصطکاک و نیروی پیش تنیدگی در تعداد چرخه‌های بارگذاری زیاد تحت نیروهای نظیر بار باد و همچنین در درازمدت، از جمله عوامل مهم در عملکرد مطلوب میراگر می‌باشند. از این رو عدم بروز پدیده‌هایی از قبیل جوش سرد سطوح لغزش، وادادگی در ادوات پیش‌تنیدگی و یا در سطوح لغزشی تحت فشار و تغییر خواص فیزیکی سطوح لغزش در اثر عوامل محیطی از جمله مواردی است که در این میراگرها باید مورد توجه قرار گیرد. در شکل الف-۳۴-د میراگرهای اصطکاکی - دورانی^{۶۹}، ابداع شده توسط معلا^{۷۰} (۱۹۹۹) که عملکردی بر اساس اصطکاک ناشی از حرکت دورانی سطوح فلزی بر روی پدهای اصطکاکی دارند نشان داده شده است. وجود پد اصطکاکی غیر فلزی در میراگرها از وقوع عوارض ناشی از اصطکاک سطوح فلز روی فلز^{۷۱} جلوگیری خواهد کرد. دلایل اجتناب از سطح لغزش فلز روی فلز در ادامه آمده است.

میراگرهای اصطکاکی بر اساس اصل ایجاد پیش تنیدگی در سطح اصطکاک عمل می‌کنند. دو موضوع در خصوص این وسایل وجود دارد:

- ممکن است در نیروی پیش تنیدگی کاهش رخ دهد که دلایل آن می‌تواند خزش در مصالح سطح لغزش یا ادوات ایجاد پیش تنیدگی، سایش در سطح لغزش در صورت وجود بارهای قابل توجه سطح سرویس مرتبط با حرکت و یا سایش رخ داده پس از بارهای لرزه‌ای با سرعت زیاد باشد. ممکن است تشخیص دقیق سطح نیروی پیش تنیدگی در طول عمر سازه امکان پذیر نباشد، اما کاهش سطح نیروی پیش تنیدگی می‌تواند با بکارگیری پیچ‌های با مقاومت بالا و مصالح با مقاومت بالا با نرخ خزش پایین در سطح لغزش به کمترین مقدار برسد.

- ممکن است در گذر زمان تغییرات اساسی در ضریب اصطکاک در سطح لغزش رخ دهد. در این زمینه Constantinou و همکاران (2007) مطالعاتی در زمینه طبیعت اصطکاک برخی سطوح لغزش در کوتاه مدت و درازمدت انجام داده‌اند. به طور کلی، رفتار قابل اطمینان و قابل پیش بینی در درازمدت می‌تواند با

⁶⁷-Pall and Marsh

⁶⁸-Sumitomo friction damper

⁶⁹ Rotational-Friction Damper

⁷⁰ Mualla

⁷¹ Bi-metallic interfaces

استفاده از سطح فلزی‌ای ایجاد شود که دارای پرداخت عالی بوده (به طور معمول فولاد ضد زنگ) و در تماس با یک مصالح غیر فلزی نرم تری است که تحت فشار زیاد در شرایط محصور شدگی است که باعث اتمام پدیده خزش در کوتاه مدت بشود. با این حال، چنین سطوحی دارای اصطکاک کمتری خواهد بود. ایجاد اصطکاک بیشتر اگرچه ممکن است با استفاده از سطح لغزش فلز روی فلز بدست بیاید. با این حال، برخی از این سطوح به دلیل آنکه پتانسیل ایجاد خوردگی شدید مضاعف را ایجاد می‌نمایند، به طور کامل غیر قابل اعتماد می‌باشند، و به هیچ وجه نباید استفاده شوند (British Standard Institution, 1990).

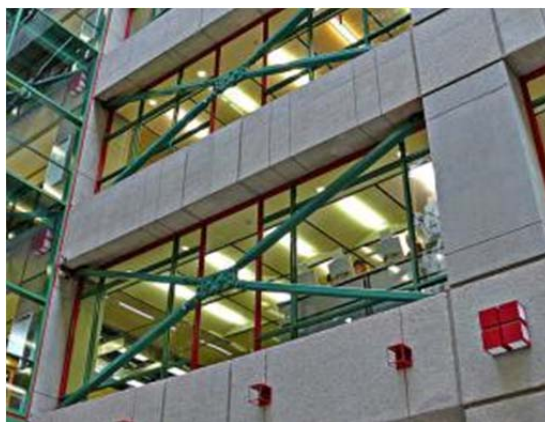
در سایر سطوح با لغزش فلز روی فلز (bi-metallic) نیز، در زمان سکون تمایل به ایجاد ترکیب صلب بین دو سطح تماس و یا آمیختگی دو سطح فلزی وجود دارد. این باعث ایجاد جوش‌های سرد (با چسبندگی خیلی زیاد و یا اصطکاک خیلی زیاد) خواهد شد. این قبیل مصالح با نمودارهای همسازی مشخص شده‌اند (Rabinowicz, 1995). نمودارهای همسازی اولیه پیشنهادی Rabinowicz فلزها را به گروه‌های دوتایی غیر همساز (incompatible) با چسبندگی کم، و همساز و مشابه (compatible) با چسبندگی بالا طبقه بندی می‌کنند. بر اساس این طبقه بندی، فلزهای همسان و اغلب سطوح تماس فلز روی فلز نباید در سطوح لغزشی استفاده شوند. بجز سطوح شامل سرب (که بسیار نرم است)، مولیبدنوم، نقره و طلا (که بسیار گران قیمت هستند)، تنها در سطوح قلع-کروم، کادمیوم - آلومینیوم، و مس - کروم تمایل به چسبندگی کمی وجود دارد. از این بین، در سطوح قلع - کروم مشکل خوردگی مضاعف مطرح است و نباید استفاده شوند (British Standard Institution, 1983). در نتیجه تنها سطوح دو فلزی شامل کادمیوم - آلومینیوم و مس - کروم ممکن است مفید باشند. مواد این سطوح نیز سختی مشابهی دارند و در نتیجه انتظار آن است که مخاطرات وابسته به خزش جدی بوده و باعث افزایش سطوح واقعی تماس و در نتیجه افزایش نیروی اصطکاک طی زمان خواهند شد (Constantinou et al. 2007).

مطالب فوق منجر به این نتیجه گیری می‌شود که تمامی سطوح اصطکاک فلز روی فلز باعث تغییرات جدی در نیروی اصطکاک طی گذر زمان می‌شوند که تاثیر آن غیر قابل پیش بینی می‌باشند و نتیجه آنکه سطوح اصطکاک فلز روی فلز نباید استفاده شوند.

الف) ساختمان کتابخانه مک کونل^{۷۲} دانشگاه گنگردیا^{۷۳} مونترآل^{۷۴} کانادا

در این ساختمان از ۱۴۳ میراگر اصطکاکی استفاده شده است (شکل الف-۳۵). جهت تعیین نیروی لغزش بهینه میراگرها، تعدادی تحلیل انجام گردید و نیرویی برابر ۶۰۰ الی ۷۰۰ کیلونیوتن (وابسته به موقعیت دستگاه) بدست آمد. برای تحلیل‌های سه بعدی تاریخچه زمانی، سیگنال‌های زلزله بر اساس محدوده وسیعی از محتواهای فرکانسی و

شتاب حداکثر زمین مقیاس شده به $g/18$ استفاده شد. تحت تحریکات یاد شده میرایی حدود 0.5% به دست آمد. همچنین استفاده از این میراگرها هزینه ساخت سازه را $1/5\%$ کاهش داد.



شکل الف-۳۵- میراگر اصطکاکی صرفاً کششی مورد استفاده در دانشگاه گنبدیا

(ب) آسمان خراش ساختمان ترمینال آبنوباشی^{۷۵}

برج ترمینال آبنوباشی در شهر اوزاکا کشور ژاپن با ارتفاع 300 متر، بلندترین برج ساختمانی این کشور می باشد و در سیستم سازه ای آن از میراگرهای اصطکاکی - دورانی در کنار سایر سیستم ها استفاده شده است. در شکل الف-۳۶ این برج و نمایی از سیستم میرایی اصطکاکی - دورانی آن قابل مشاهده است.

⁷⁵ Abenobashi Terminal Building



ب



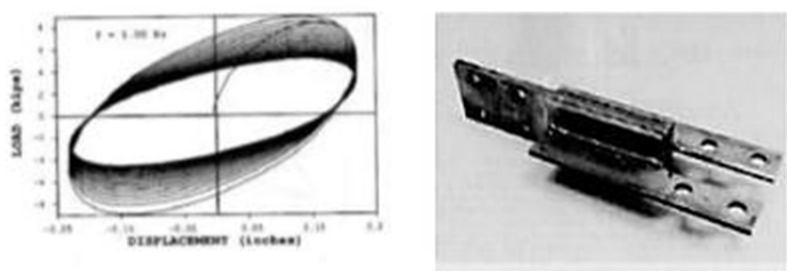
الف

شکل الف-۳۶- ساختمان برج ترمینال آبنوباشی، ب) سیستم میرایی اصطکاکی- دورانی

الف-۲-۲-۶- میراگر ویسکوالاستیک

مصلح 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.

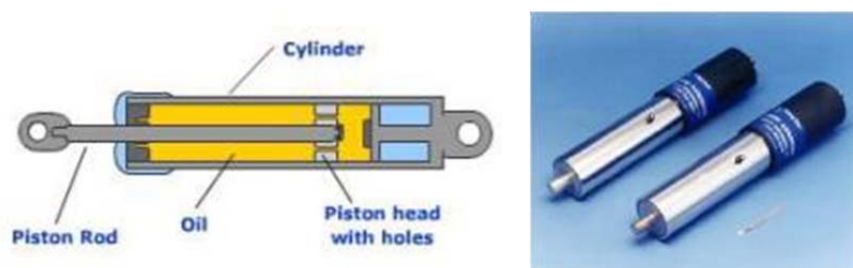
یک تیپ متداول میراگرهای ویسکوالاستیک (VE)، از لایه‌های ویسکوالاستیکی که توسط ورق‌های فلزی احاطه گردیده، تشکیل شده است (شکل الف-۳۷). در این حالت به هنگام ارتعاش ساختمان، بین بال‌های فلزی خارجی و ورقه مرکزی میراگر حرکت نسبی ایجاد می‌شود. این مکانیزم سبب تغییر شکل برشی و در نتیجه استهلاک انرژی خواهد شد.



شکل الف-۳۷- نمونه کاربردی میراگر ویسکو الاستیک و منحنی هیستریزیس آن

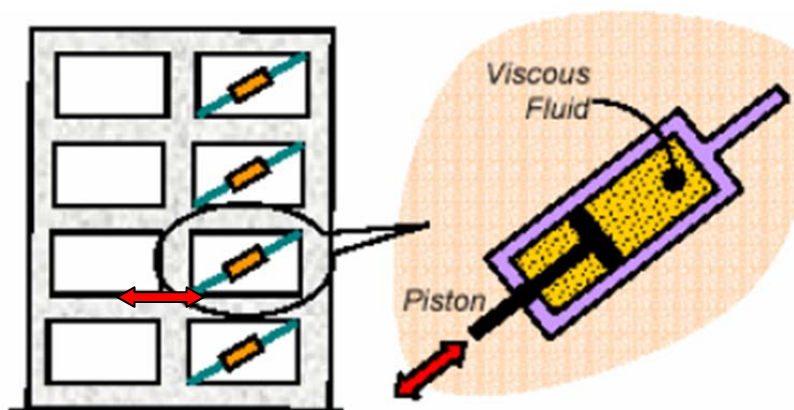
الف-۲-۲-۷- میراگر با سیال ویسکوز

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° الی 70° 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)^{۷۶}، 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.

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 فتوسنتز 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^{۷۷} 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^{۷۸}). علاوه بر این،

⁷⁶ -Nonlinear Energy Sink

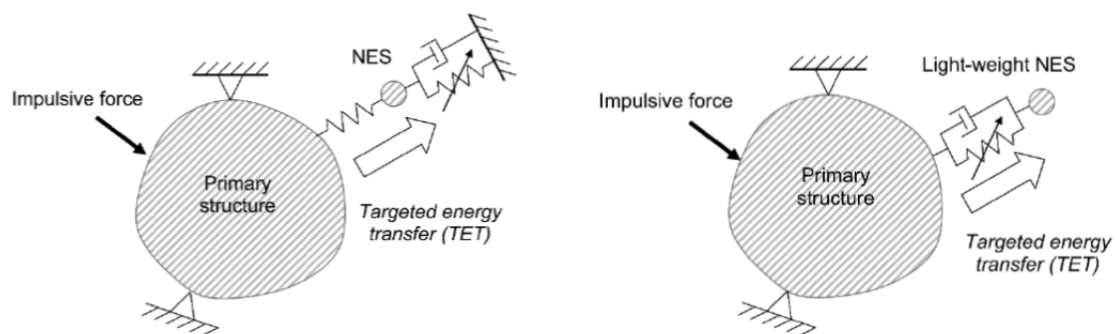
⁷⁷ -Beat Phenomenon

⁷⁸ -Poincaré recurrence theorem

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^{۷۹} 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^{۸۰} این مدارها، برگشت ناپذیری انتقال انرژی را از بین برده و منجر به تحریک مدارهای شبه پریودیک در جریان های کند می‌شود. به طور کلی، انتقال انرژی غیر خطی به دلیل بر هم زدن تقارن در قالب دو شاخه‌ای شدن مد غیر خطی^{۸۱} یا توسط پدیده متمرکز شدن انرژی فضایی ناشی از مدهای متعامد غیرخطی موضعی^{۸۲} می‌تواند رخ دهد.

اخیراً فرم جدیدی از انتقال انرژی غیرخطی بین مدهای با فاصله زیاد (با فرکانس های دور از هم) در سازه‌هایی که تحت تحریک هارمونیک قرار می‌گیرند، تحلیل شده است. در این مکانیزم، انتقال انرژی به صورت غیر فعال، بدلیل اندرکنش تشدید مود بالاتر با مود پایین تر، رخ می‌دهد. این نوع انتقال انرژی از ان جهت که مدهای اندرکنشی شرایط تشدید داخلی را ارضا نمی‌کنند، غیرمعمول است.

می‌توان نشان داد که با اضافه نمودن یک قطعه با سختی غیر خطی، می‌توان به طور قابل ملاحظه‌ای دینامیک کلی سیستم حاصله را تغییر داد. دلیل این امر نیز عدم وجود فرکانس تشدید ترجیحی قطعه متصل شده است که در اصل باعث می‌شود تشدید غیر خطی با هر مود سیستم خطی، در محدوده دلخواه فرکانسی امکان پذیر گردد. می‌توان 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 می‌تواند رخ دهد. بنابراین NES را می‌توان 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 می‌تواند منجر به دو شاخه‌ای شدن‌های ابعاد بالاتر و پدیده‌های دینامیکی مختلط شود. شکل الف-۴۰ نحوه انتقال انرژی به صورت هدفمند را به صورت شماتیک نمایش می‌دهد.



شکل الف-۴۰- نحوه انتقال انرژی به صورت هدفمند

⁷⁹ -heteroclinic orbit

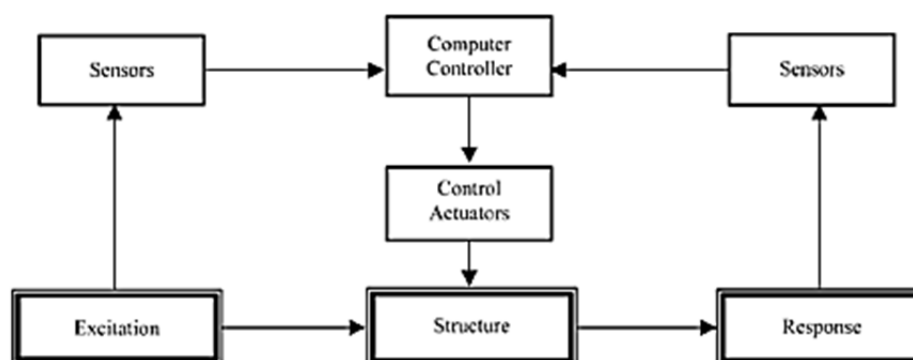
⁸⁰ -perturbation

⁸¹ -nonlinear mode bifurcation

⁸² -nonlinear normal modes

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^{۸۳} 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^{۸۴} که معمولاً جهت تولید نیروهای کنترل مورد نیاز از منابع خارجی، انرژی دریافت می‌کنند. سیستم کنترل پس‌خور^{۸۵} 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^{۸۶} 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^{۸۷} می‌نامند. 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.

⁸³-Sensors

⁸⁴-Actuators

⁸⁵-Feed Back Control Systems

⁸⁶-Feed Forward Control Systems

⁸⁷-Feed Back – Feed Forward Control Systems

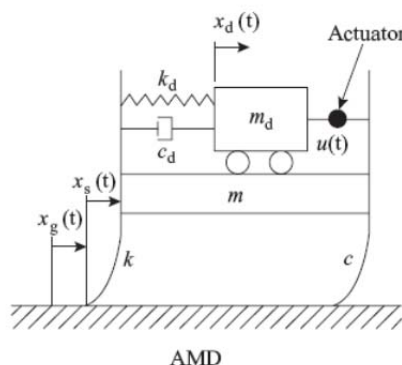
انواع سیستم‌های میراگر فعال عبارتند از:

- 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^{۸۸}

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.

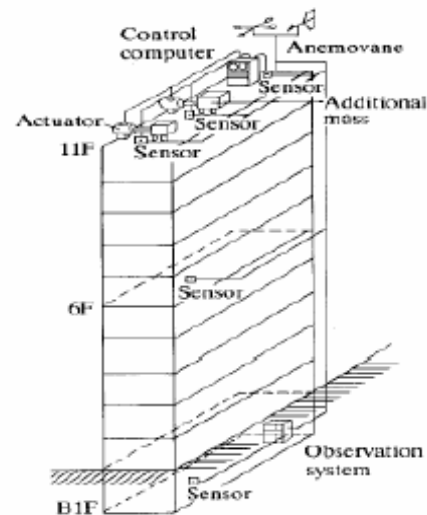
با تحریک جرم اضافی توسط عملگر، یک نیروی مضاعف در سیستم بوجود می‌آید که مکمل نیروی تولید شده توسط جرم هماهنگ شده بوده و در نتیجه، سبب افزایش میرایی معادل TMD می‌شود. از آنجائیکه برای تحریک جرم اضافی، نیاز به نیروی خارجی می‌باشد، این سیستم در رده سیستم‌های کنترل فعال قرار می‌گیرد. شماتیک این سیستم در شکل 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.

⁸⁸-Active Mass Damper(AMD)



شکل الف-۴۳- اولین نمونه دستگاه 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)

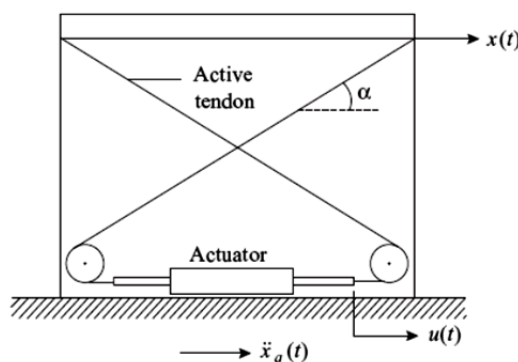


(الف)

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 تاندون های پیش تنیده می باشد که کشش آنها توسط سیستم مکانیزم فرمان بر برق کنترل می شود. شماتیک این سیستم در شکل الف-۴۶ ارائه شده است.

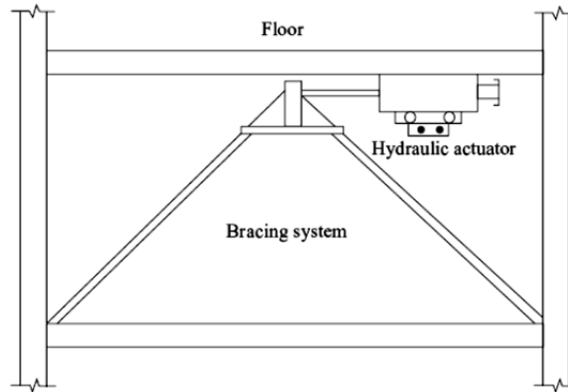


شکل الف-۴۶- شماتیک سیستم تاندون فعال

تاندون های فشاری در میان دو طبقه سازه و عملگر در کف نصب می شود. یک سر تاندون به طبقه بالا و سر دیگر آن به عملگر وصل می شود. دریافت ایجاد شده در اثر ارتعاش سازه در طول زلزله، باعث حرکت پیستون عملگر می شود. این حرکت نسبی باعث تغییر میزان کشش تاندون پیش تنیده شده و نیروی کنترلی u باعث کاهش پاسخ لرزه ای می شود. 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 لرزه ای در این سیستم می باشد. مزایای این سیستم این است که اولاً این سیستم قابلیت استفاده در سازه های 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 می شود. 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 می شود. 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 لرزه ای را ثبت می کنند. کامپیوتر هماهنگ کننده، این اطلاعات را دریافت کرده و سیگنال کنترلی را تولید می کند. 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 نیروی های لرزه ای سازه استفاده می شود.



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 نفوماتیک 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.

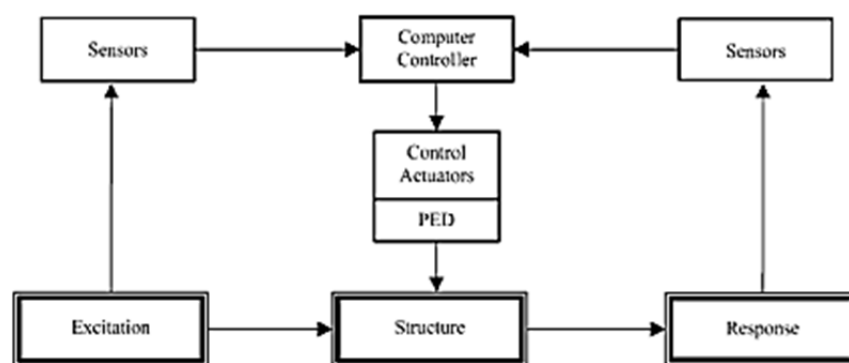
الف-۲-۳-۵- میراگر فعال با سختی متغیر^{۸۹}

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

^{۸۹} - Active Variable Stiffness Damper

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 عملکرد، مستقیماً جهت اعمال انرژی مکانیکی به سازه بکار نمی‌رود.



شکل الف-۴۸- نحوه عملکرد سیستم کنترل نیمه فعال

سیستم‌های کنترل نیمه فعال 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. میزان تغییر در خصوصیات مکانیکی سیستم، براساس بازخورد^{۹۰} پاسخ‌های اندازه‌گیری شده سازه در یک لحظه قبل از تحریک زمین، تعیین می‌شود. در این سیستم‌ها از انرژی خارجی جهت تغییر خصوصیات دستگاه، مانند میرایی یا سختی استفاده می‌شود، لذا نیاز این سیستم‌ها به انرژی بسیار ناچیز است. در حالی که در سیستم‌های فعال به علت اینکه از انرژی خارجی جهت تولید نیروی کنترل استفاده می‌شود، نیاز به انرژی بسیار بزرگی است.

مزایای این نوع سیستم‌های کنترل عبارتند از:

- ۱- عملکرد آن‌ها از سیستم‌های کنترل غیرفعال بهتر است.
- ۲- دارای خاصیت سازگاری لحظه به لحظه سیستم‌های کنترل فعال هستند، بدون آنکه به انرژی زیادی نیاز داشته باشند.
- ۳- چون انرژی خارجی به سیستم وارد نمی‌کنند، باعث ناپایداری سازه کنترل شده نمی‌شوند.
- ۴- مانند ابزارهای کنترل غیرفعال قابل اعتماد هستند.
- ۵- اگر منبع انرژی خارجی در طول زلزله آسیب ببیند، همانند یک سیستم غیرفعال به فعالیت خود ادامه می‌دهند.

انواع مختلف سیستم‌های کنترل نیمه فعال عبارتند از:

- ۱- میراگر با دریچه متغیر^{۹۱}
- ۲- میراگر با سختی متغیر^{۹۲}

^{۹۰}-Feedback

^{۹۱}-Variable Orifice Damper

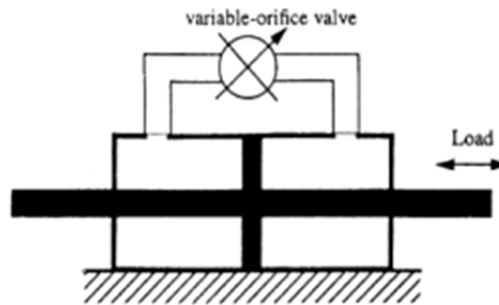
۳- میراگر با جرم متوازن نیمه فعال^{۹۳}

۴- میراگر با ستون مایع کنترل شونده^{۹۴}

۵- میراگر با سیال کنترل شونده^{۹۵}

الف-۲-۴-۱- میراگر با دریچه متغیر

این نمونه از سیستم‌های کنترل نیمه فعال، قدیمی‌ترین نوع از انواع این سیستم‌ها می‌باشد اما هنوز مورد استفاده قرار می‌گیرد. شماتیک این سیستم در شکل الف-۴۹ ارائه شده است.



شکل الف-۴۹- میراگر با دریچه متغیر

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 ویسکوز 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^{۹۶} نصب شده‌اند (شکل الف-۵۰). این پل در سال ۱۹۷۲ بهره‌برداری 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^{۹۷} ژاپن، هشت میراگر با دریچه متغیر نصب شده است.

^{۹۲}-Variable Stiffness Damper

^{۹۳}-Semi – Active Tuned Mass Damper

^{۹۴}-Adjustable Tuned Liquid Column Damper

^{۹۵}- Controllable Fluid Damper

^{۹۶}-Purcell, Oklahoma

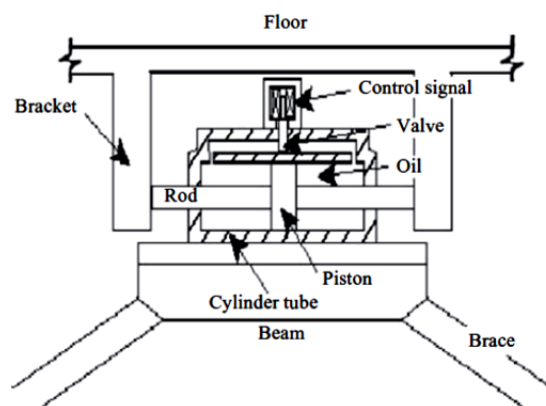
^{۹۷}-Shizuka City



شکل الف-۵۰- میراگر روزنه متغییر نصب شده بر روی پل اینتر استیت در اکلاهما

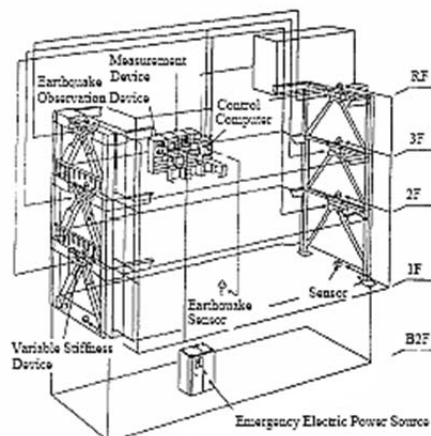
الف-۲-۴-۲- میراگر با سختی متغیر

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

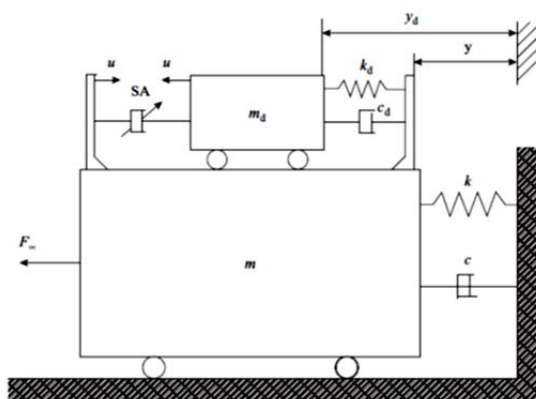
همانطور که از ابزارهای کنترل نیمه‌فعال انتظار می‌رود، مصرف انرژی آنها بسیار پایین است (حدود ۲۰ وات) و خرابی آنها در هنگام زلزله، به ندرت رخ می‌دهد. شکل الف-۵۲ نمونه‌ای از بکارگیری این دستگاه‌ها را بر روی مرکز تحقیقات Kobori نشان می‌دهد.



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 نیمه‌فعال جهت کاهش ارتعاشات ناشی از باد استفاده می‌شود. این دستگاه شبیه به سیستم‌های TMD است اما قابلیت تغییر در سطح میرایی را دارد. شبیه سازی‌های انجام شده نشان داده‌اند که عملکرد این دستگاه‌های نیمه فعال فراتر از سیستم‌های TMD بوده و قابل مقایسه با سیستم‌های AMD که از نوع فعال هستند، می‌باشد. نمونه دیگری از این دستگاه‌ها، جرم میراگر تنظیم شده‌ی نیمه فعال سختی متغیر است که عملکرد آن خیلی شبیه به دستگاه‌های AMD است اما مصرف انرژی در آن‌ها کمتر است. شماتیک این سیستم در شکل الف-۵۳ ارائه شده است. این سیستم دارای یک TMD و یک فعال کننده در سقف می‌باشد. 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 می‌باشد. فعال کننده، نیروی کنترلی u را تولید می‌کند، به گونه‌ای که سیستم همواره در حالت بهینه برای هر تغییر تحریکی می‌باشد. 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 روزه 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 ^{۹۸}ER

۲- میراگرهای ^{۹۹}MR

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 می‌باشند. این تغییر که با افزایش یا کاهش در شدت میدان مغناطیسی یا الکتریکی صورت می‌گیرد، آن‌ها را تبدیل به میراگرهای قابل کنترل کرده است.

^{۹۸}-Electro-Rheological Damper

^{۹۹}-Magneto-Rheological Damper

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، دستگاه‌های مطمئنی بوده و نگهدارشان ساده می‌باشد.

برای کنترل سازه‌ها، نخست میراگرهای ER مورد تحقیق و بررسی قرار گرفتند. با این وجود استفاده تجاری و اقتصادی آنها به چند دلیل زیر محدود می‌باشد:

- ۱- میراگرهای ER نمی‌توانند به تنش‌های تسلیم بالا دست یابند.
- ۲- ظرفیت و توانایی سیال ER با ورود ناخالصی‌هایی مانند رطوبت در طول ساخت یا نگهداری کاهش می‌یابد.
- ۳- ولتاژی که هنگام عملکرد نیاز دارند، نسبتاً بالا می‌باشد (تقریباً ۴۰۰۰ ولت)، بنابراین همواره در دسترس نبوده و پرهزینه‌اند.

در مقابل، میراگرهای MR فاقد این مشکلات هستند. میراگر MR از یک مایع هوشمند استفاده می‌کند که یک آنالوگ مغناطیسی مایع ER است. این میراگر معمولاً شامل ذرات پلاریزه شده مغناطیسی است که در یک مایع ویسکوز همچون روغن سیلِسکون پراکنده شده است. هنگامیکه مایع MR در جریان مایع مغناطیسی قرار می‌گیرد، ذرات درون مایع پلاریزه شده و مایع رفتار ویسکوپلاستیک نشان می‌دهد و در نتیجه در مقابل جریان مایع مقاومت می‌کند.

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. در 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 سیستم‌های 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، پریود 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 آتش نشانی 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 مناطقی 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 آسیب دیدن 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 باستان شناسی 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 راه حل‌های 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 بی وقفه 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.

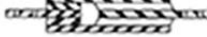
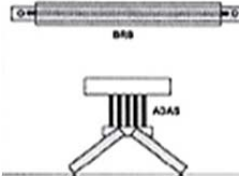
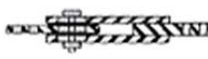
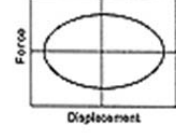
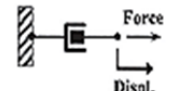
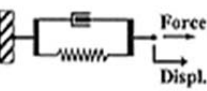
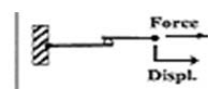
میراگرهای با جرم متوازن و میراگرهای مایع متوازن مشخصات اشکال مدی اصلی سازه را اصلاح کرده و باعث افزایش میرایی می‌شوند. همانطور که در پیشتر عنوان شد، این میراگرها بویژه در سازه‌های بلند که دارای فرکانس اصلی پایین هستند، کاربرد دارند. در اثر اضافه کردن این سیستم به سازه، باید افزایش وزن ناشی از اضافه نمودن 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 آتش نشانی است. به علاوه برای تمامی جهات بارگذاری موثر می باشد. از معایب میراگر مایع با جرم متوازن هزینه اولیه و هزینه نگهداری بالای آن است. یکی از معایب میراگرهای مایع متوازن، رفتار به شدت غیرخطی آنها و عدم پوشش فرکانس های مختلف می باشد که استفاده از آنها را برای مهندسين 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 ارزان تر از موارد دیگر بوده و همچنین تکنولوژی تولید پیچیده ای ندارند. بنابراین تولید آنها در کشور به لحاظ عملی امکان پذیر می باشد.

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	ویسکوالاستیک	جاری شونده فلزی	اصطکاکی
شکل شماتیک				
رفتار هیسترتیک ایده آل				
مدل فیزیکی ایده آل			وجود ندارد	
محاسن	موثر در جابجایی‌های کوچک، نیروی بازگرداننده حداقل، ساده سازی مدل میراگر برای میراگرهای خطی، عدم وابستگی خصوصیات به فرکانس بارگذاری و دما.	موثر در جابجایی‌های کوچک، وجود نیروی بازگرداننده، رفتار خطی و مدلسازی ساده میراگر، رفتار پایدار، جابجایی ماندگار کوچک	رفتار چرخه‌ای پایدار، قابلیت اعتماد در دراز مدت، عدم حساسیت به دمای بهره برداری، آشنا بودن رفتار ماده برای مهندسين	استهلاک انرژی بالا در هر چرخه، عدم حساسیت به دمای بهره‌برداری
معایب	احتمال نشت سیال (مشکل قابلیت اعتماد)	ظرفیت تغییر شکل محدود، خصوصیات وابسته به فرکانس بارگذاری و دما، احتمال جداشدگی و پارگی ماده ویسکوالاستیک (مشکل قابلیت اعتماد)	آسیب دیدگی میراگر پس از زلزله (احتمال نیاز به تعویض)، رفتار غیرخطی (احتمال نیاز به تحلیل غیرخطی)	امکان تغییر شرایط سطح لغزش 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

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 inviscid 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 Grzymislawski, 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.ASCE6; and R. J. McNamara, F.ASCE7 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, *ISCT 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. *ISCT 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.

**Islamic Republic of Iran
Plan and Budget Organization**

Manual for Structural Damping Systems in Design and Retrofitting of Buildings

No. 766

Deputy of Technical,
Infrastructure and
Production Affairs

Department of Technical &
Executive affairs,
Consultants and Contractors

nezamfanni.ir

Road, Housing & Urban
Development Research
Center

Department of Research

www.bhrc.ac.ir

Executive Organization for
Public and Government
Buildings and Infrastructure

Deputy for Planning and
Engineering

www.cobi.gov.ir

2018

این ضابطه

با عنوان «دستورالعمل استفاده از میراگرها در طراحی و مقاوم‌سازی ساختمان‌ها» به منظور راهنمایی مهندسان در فرآیند طراحی و بهسازی لرزه‌ای ساختمانهای دارای سیستم‌های استهلاک انرژی تدوین شده است. در فصول اول و دوم این دستورالعمل، ضوابط بهره‌گیری از میراگرها در مباحث طراحی و مقاوم‌سازی ارائه شده و در فصل سوم با هدف تشریح رفتار میراگرها، به طور عمومی رهنمودهایی برای تعیین برخی مشخصات محاسباتی ارائه شده‌است.