نقش انواع میراگر در کاهش نیروی زلزله و بهبود سطح عملکرد سازه

نویسنده: سید علی محمودی-بهنام حمزه تاش

مقدمه

با توجه به نیاز و اهمیت مقاوم سازی و طراحی عملکردی سازه ها، بحث استفاده از میراگرها یا همان جداساز های لرزه ای به عنوان در سازه به صورت جدی مطرح است اما میراگر چیست؟ میراگر های غیر فعال را می شناسید؟ مراحل طراحی میراگر به چه صورتی انجام می شود؟

در این جا به بررسی نقش انواع میراگر ها مانند میراگر اصطکاکی، میراگر ویسکوز، میراگر ویسکو الاستیک، میراگر تسلیمی یا همان هیسترزیس را در بهبود سطح عملکرد سازه ای بررسی خواهیم کرد.

فهرست مطالب

صفحه

مقدمه ۱

۱ بخش اول: رویکردهای اصلی در زمان طراحی لرزه ای سازه‌ها ۲

۲ بخش دوم: اثر افزایش میرایی بر پاسخ سازه‌ها ۳

۲. ۱ تاثیر میراگر بر سطوح عملکرد ۵

۲. ۲ تاثیر میرایی در زمان تناوب ۶

۳ بخش سوم: مفهوم کنترل فعال، غیرفعال و نیمه فعال ۷

٤ بخش چهارم: معرفی انواع رایج میراگرهای غیرفعال ۱۱

۴. ۱ میراگرهای وابسته به سرعت و وابسته به تغییرمکان ۱۱

۴. ۲ گام‌های طراحی ساده سازی شده ۱۲

۴. ۳ میراگر ویسکوز ۱۲

۴. ۴ میراگر ویسکوالاستیک ۱۵

۴. ۵ میراگر اصطکاکی ۱۸

۴. ۶ میراگر تسلیمی (هیسترزیس) ۲۱

۵ نتیجه گیری و مقایسه عملکرد میراگرهای مختلف ۲۳

۱ بخش اول: رویکردهای اصلی در زمان طراحی لرزه ای سازه‌ها

همانطور که گفته شد، به طور کلی دو رویکرد طراحی برای مقابله با نیروی زلزله در سازه‌ها وجود دارد که در ادامه با این دو رویکرد بیشتر آشنا می شویم:

۱. **افزایش سختی و مقاومت سازه به صورت کلی و یا موضعی:** در این روش تقویت تیر، ستون، پی و دیگر اجزای سازه ای معمولا با هدف تقویت کلی یا موضعی سازه انجام می‌شود. از مشکلات عمده ی این روش افزایش سهم باربری اجزای سازه از نیروی زلزله با توجه به افزایش سختی المان می‌باشد، به این معنا که اگر مقاومت بتن، فولاد و یا ابعاد مقاطع را به منظور افزایش مقاومت و ظرفیت باربری ارتقا دهیم، در این صورت با توجه به تغییر سختی که سبب بازتوزیع نیروها می شود، نیروهای وارده بر عضو نیز نسبت به حالت اول افزایش یافته و علی‌رغم صرف هزینه و افزایش ابعاد، امکان تاثیرگذاری کم در این روش که روش معمول و سنتی طراحی است، وجود خواهد داشت.

همچنین در این روش عموما نیاز به تضعیف تعدادی از المان‌های سازه‌ای می‌باشد تا با رفتار پلاستیک، انرژی ورودی به سازه را مستهلک کنند که اصطلاحا این اعضا، فیوز نامیده می‌شوند، به عنوان مثال بخشی از مهاربند همگرا، تیر پیوند در مهاربند واگرا و ... نقش فیوز را ایفا می‌نمایند. این فیوزها به صورت کلی می‌توانند موثر و مفید باشند اما استفاده از فیوز ایراداتی دارد که گاهی سبب کاهش کارایی آن‌ها می شود. یکی از این نقاط ضعف عدم کنترل دقیق روی میزان استهلاک انرژی و نیاز به صرف هزینه زیاد پس از پایان زلزله به منظور بازسازی و بازگرداندن اجزای آسیب دیده و فیوز لرزه‌ای می‌باشد. به همین دلیل، به منظور رفع مشکل اول، استفاده از تحلیل‌های غیرخطی و استفاده از روش‌های طراحی عملکردی مطرح شده‌است و به منظور رفع مشکل دوم، در بعضی از اجزای سازه‌ای مانند مهاربند واگرا، از تیر پیوند قابل تعویض استفاده می‌شود.

۲. **استفاده از تئوری کنترل سازه ها:** در کنترل سازه‌ها، سعی بر کاهش انرژی ورودی زلزله و یا باد به کمک استفاده از اعضایی به نام میراگر و یا جداگر لرزه‌ای می‌باشد. سیستم های کنترلی از طریق تغییر در زمان تناوب سازه (به دلیل تغییر سختی و جرم سازه) و همچنین افزایش میرایی سازه خصوصیات دینامیکی سازه را دستخوش تغییر می‌نمایند. به این منظور با اتکا بر قابلیت استهلاک انرژی میراگرها انرژی زلزله به طور مؤثر مستهلک می‌گردد. لازم به ذکر است که امروزه به دلیل نیاز به طراحی سازه‌هایی با سطوح عملکرد بالاتر، رفته رفته تئوری کاهش نیروی زلزله توسط میراگر دستخوش تغییر شده و در بسیاری از حالات به دلیل نیاز به رسیدن به سطوح عملکردی بالاتر، این اتفاق رخ نمی دهد. در ادامه، مفاهیم و تاثیر میراگرها بر رفتار سازه ها توضیح داده خواهد شد.

۲ بخش دوم: اثر افزایش میرایی بر پاسخ سازه‌ها

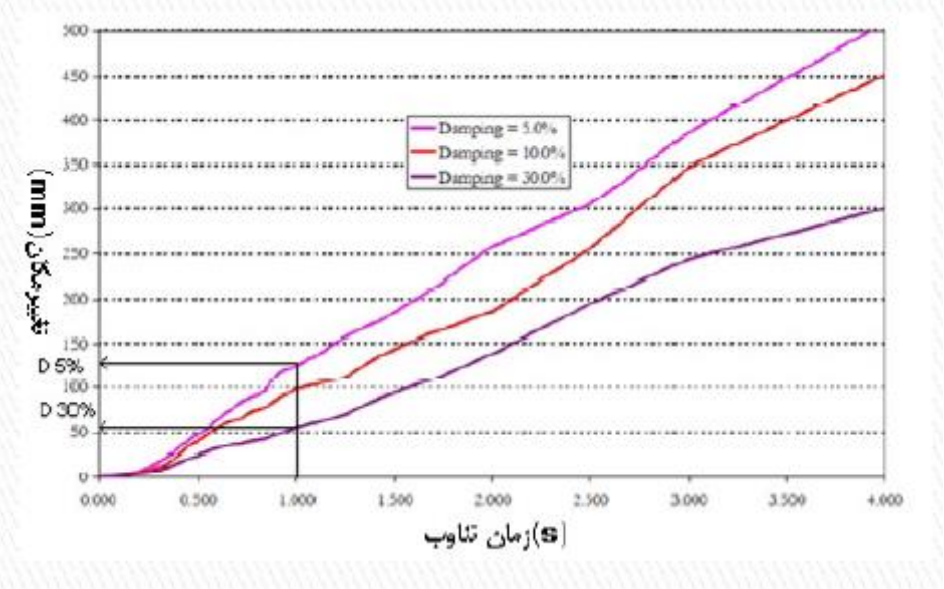
با توجه به معادله زیر که به معادله تعادل دینامیکی سازه‌ها معروف است، به سادگی می توان مشاهده کرد در صورتیکه به عنوان مثال میرایی (C) سازه افزایش یابد، به منظور حفظ تعادل دینامیکی سازه و با فرض اینکه نیروی ورودی به سازه مشخص باشد، باید تغییرمکان و شتاب سازه کم شوند.

$$M\ddot{U} + C\dot{U} + KU = P(t) \qquad (۱)$$

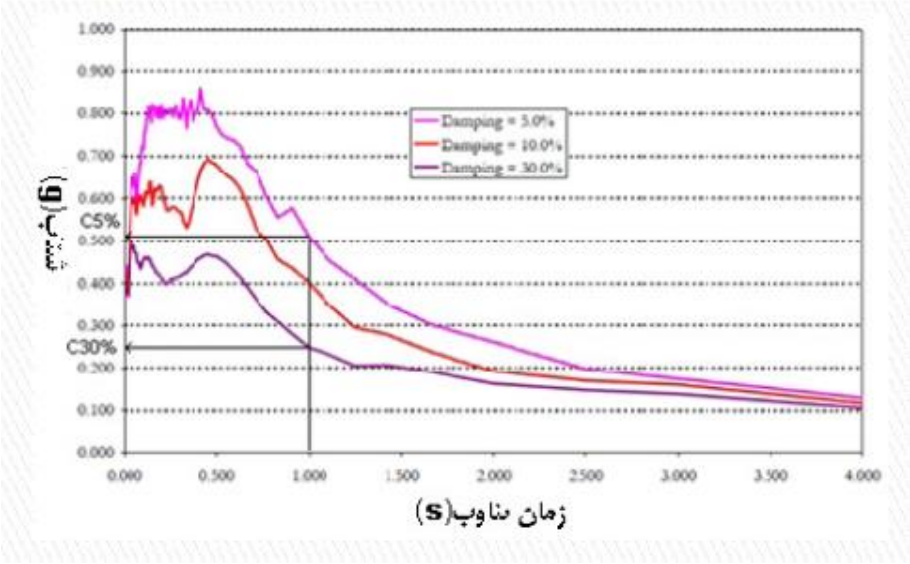
$$V(t) = KU(t) \qquad (۲)$$

در رابطه (۱)، M معرف جرم سازه، C میرایی سازه، K سختی سازه، U تغییرمکان سازه، $\dot{U}$ سرعت سازه، $\ddot{U}$ شتاب سازه $P(t)$ نیروی دینامیکی وارد بر سازه است. برای آشنایی بیشتر با معادلات تعادلات سازه می تواند به مقاله آشنایی با دینامیک سازه ها مراجعه نمایید.

همان‌طور که در دو شکل ۱ و ۲ مشاهده می‌شود؛ افزایش میرایی باعث کاهش تغییرمکان و شتاب در منحنی طیف سیستم یک درجه آزادی می‌شود که مطابق با رابطه (۱) می‌باشد؛ به عبارت دیگر در شکل زیر مشاده می شود، در یک زمان تناوب ثابت (مثلا ۱ ثانیه) در حالتی که میرایی ۳۰ درصد است (نمودار بنفش) نسبت به میرایی ۵ درصد (نمودار صورتی) هم تغییرمکان و هم شتاب سازه کمتر می‌باشند.



شکل ۱ اثر میرایی بر طیف پاسخ تغییر مکان



شکل ۲ اثر میرایی بر طیف شتاب

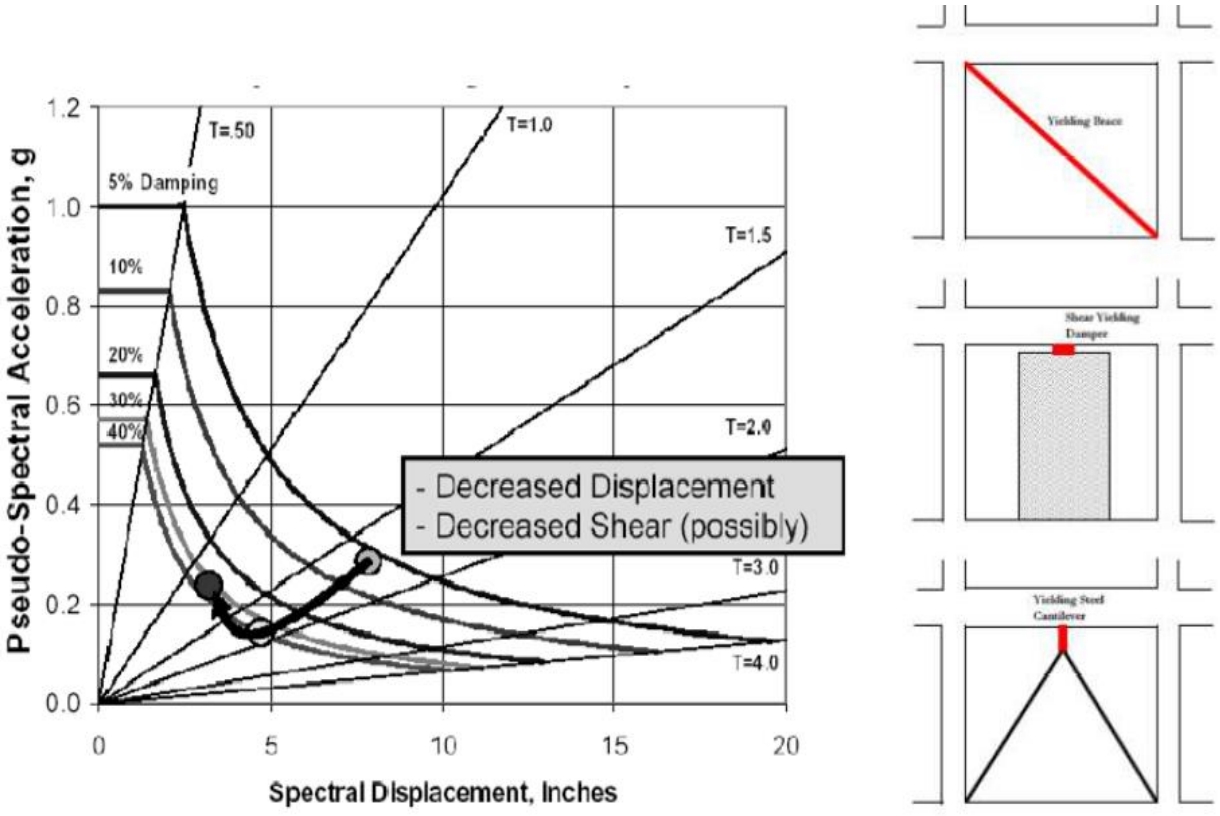
مساله قابل تذکر در میراگرها وجود این نکته است که با توجه به این که میراگرها در بسیاری از حالات همراه با المانی مشابه با مهاربند در سازه نصب می‌گردند، بنابراین باعث تغییر سختی سازه نیز می‌شوند. به همین دلیل، لازم است تاثیر همزمان افزایش میرایی و سختی بررسی شود.

با توجه به روابط (۱) و (۲) و شـکل ۳، افزایش میرایی باعث کاهش جابجایی و کاهش برش پایه می شـود که این مفهوم در منحنی دوگانه طیف جابجایی- شتاب ملاحظه می‌گردد (شکل ۳)، اما از طرف دیگر افزایش سختی باعث کاهش جابجایی و افزایش برش پایه در منحنی طیف دوگانه می‌گردد. بنابراین همیشـه اضـافه کردن میراگر باعث کاهش جابجایی و رسـیدن به سـطوح عملکردی بالاتر می‌شود، اما از طرف دیگر ممکن است باعث کاهش یا افزایش برش پایه گردد.

۱.۲ تاثیر میراگر بر سطوح عملکرد

این نکته بسـیار حائز اهمیت می باشـد که اضـافه نمودن میراگر به سازه لزوما سبب کاهش برش پایه نشده و در بسیاری حالات، حتی برش پایه افزایش می یابد؛ حال، شـاید از خود بپرسـید که در این حالت که برش پایه افزایش یافته و سـازه سـنگین تر از حالت عادی طراحی خواهد شد، پس چرا باید از میراگر استفاده نمود و مزیت آن در چیست؟

پاسخ این سوال بسیار ساده است، هدف از استفاده از میراگر همواره در وهله اول، بالاتر رفتن سطوح عملکردی سازه بوده که این هدف گاهی با افزایش برش پایه همراه می شود.



شکل ۳ اثر همزمان تغییر میرایی و سختی بر منحنی طیف شتاب-تغییرمکان

پیش از توضیحات بیشتر، لازم است خیلی کوتاه با سطوح عملکردی متداول که برای سازه ها در نظر گرفته می شوند آشنا شویم:

الف) سطح عملکرد خدمت‌رسانی بی‌وقفه یا (OPerational)

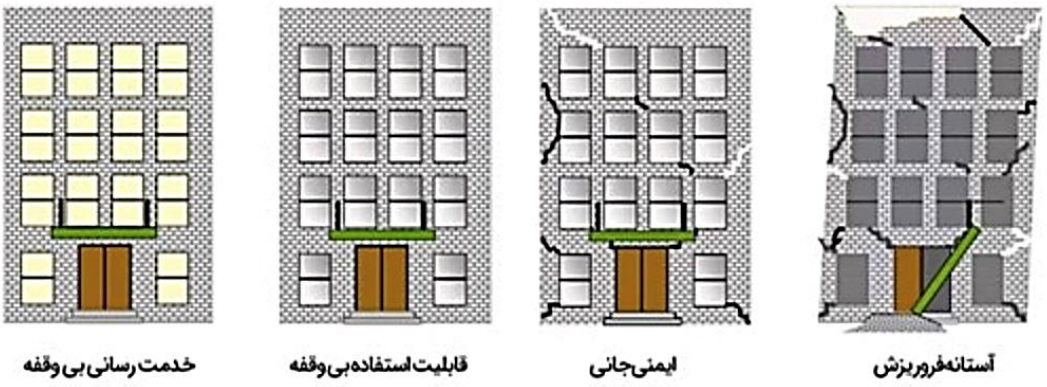
ب) سطح عملکرد قابلیت استفاده بی وقفه یا (Immediate Occupancy)

پ) سطح عملکرد ایمنی جانی یا (Life Safety)

ت) سطح عملکرد آستانه فرو ریزش یا(Collapse Prevention)

این چهار سطح عملکردی در شکل زیر مشاهده می شوند، بدیهیست که سطح عملکرد خدمت رسانی بی وقفه بالاترین سطح (ایمن ترین) و سطح آستانه فروریزش پایین ترین سطح عملکردی یک سازه می باشند و با توجه کاربری سازه و نیازهای کارفرما پیش از ساخت سازه، یکی از سطوح فوق برای آن در نظر گرفته می شود. برای آشنایی بیشتر با مفهوم سطوح عملکردی به این مقاله از سبزسازه مراجعه نمایید.

در یک نگاه دقیق‌تر با توجه به تحقیقات صورت گرفته، میراگرها برای رسیدن به سطوح عملکردی قابلیت استفاده بی‌وقفه (IO) و خدمت رسانی بی وقفه (OP) ایده آل بوده و برای سطوح پایین تر استفاده از میراگرها چندان اقتصادی نبوده و با سایر روش های طراحی امکان رسیدن به این سطوح، بدون صرف هزینه ی زیاد، امکان پذیر است.



شکل ٤ سطوح عملکردی سازه ها

۲.۲ تاثیر میرایی در زمان تناوب

انرژیی که به واسطه زلزله (E) به سازه وارد می شود، مطابق با رابطه (۳) ، به وسیله چهار مکانیزم استهلاک انرژی در سمت راست رابطه ی زیر، مستهلک می‌شود:

$$E = E_k + E_s + E_h + E_d \qquad (۳)$$

در رابطه (۳) E انرژی ورودی زلزله، E_k انرژی جنبشی، E_s انرژی کرنشی قابل بازگشت در محدوده الاستیک، E_h انرژی اتلاف‌شده به وسیله تغییرشکل پلاستیک و E_d انرژی مستهلک شده به وسیله میراگر می‌باشد.

مطابق با رابطه (۳) سهم زیادی از انرژی ورودی زلزله می‌تواند به وسیله میراگرها (E_d) جذب و مستهلک شود.

میرایی در سازه از طریق منابع متفاوتی می‌تواند تامین شود که عبارتند از:

- میرایی ناشی از اتصلات
- میرایی ناشی از اصطکاک بین سطوح سازه‌ای
- میرایی ناشی از رفتار هیسترزیس ماده تشکیل‌دهنده
- میرایی ناشی از استفاده از دمپر (میراگر)
- ...

استفاده از میراگرها، نه تنها بر میرایی ذاتی سازه تاثیرگذار است بلکه باعث تغییر زمان تناوب سازه طبق رابطه‌ی شناخته شده زیر هم می‌گردد:

$$T_D = \frac{T}{\sqrt{1-\xi^2}} \qquad (۴)$$

در رابطه (۴)، ξ نسبت میرایی سازه است که در حالت عادی بدون میراگر حداکثر تا ۵ درصد و در حالت استفاده از میراگر تا حداکثر ۳۰ درصد (البته در برخی شرایط خاص ممکن است از این مقدار هم فراتر رود) خواهد رسید. T و T_D زمان تناوب‌های سازه بدون میراگر و با میراگر (به عبارت دیگر، T زمان تناوب طبیعی و T_D زمان تناوب در حالت میرا) می‌باشند.

سیستم‌های کنترلی باید به گونه‌ای طراحی شوند که برای بارهای طراحی شامل نیروهای لرزه ای کاهش نیافته، میراگرها در حالت خطی باقی بمانند. در آیین‌نامه‌های مختلف از جمله نشریه ۷۶۶ ایران، ضوابط و محدودیت‌های مربوط به انتخاب نوع تحلیل (خطی، غیرخطی) برای سازه‌های مختلف و روند انجام آن‌ها ذکر شده است.

۳ بخش سوم: مفهوم کنترل فعال، غیرفعال و نیمه فعال

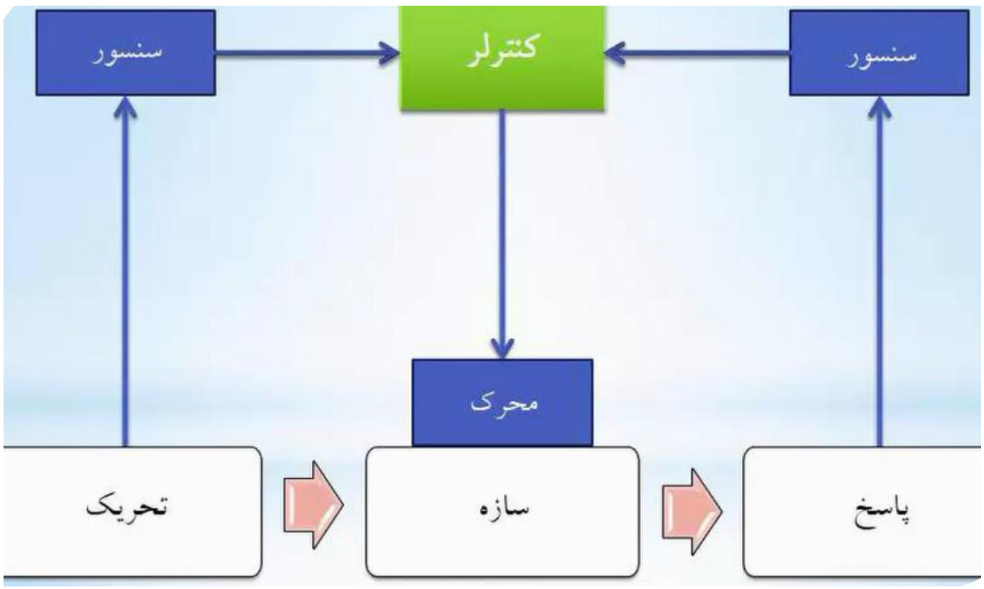
در دسته‌بندی اول، کنترل سازه را به سه دسته می توان تقسیم نمود:

۱. کنترل فعال (Active)
۲. کنترل غیرفعال (Passive)
۳. کنترل نیمه‌فعال (Semi Active)

یک سیستم کنترل غیر فعال، سیستمی است که سختی یا میرایی سازه در طول زمان ثابت می باشد، اما در نقطه ی مقابل سیستم های کنترل فعال می باشند که به کمک یک منبع خارجی جهت مقابله با نیروی زلزله یا باد، ممکن است در طول زمان بارگذاری مقدار سختی و میرایی سازه را تغییر می‌دهند. سازه های همراه با سیستم های کنترل فعال مشابه با یک ربات عمل کرده و با توجه به نیروی اعمالی امکان تغییر پارامترهای دینامیکی سازه را به طرق مختلف دارند. بدیهیست که این سیستم ها بسیار پیچیده بوده و نیاز به تکنولوژی ها و امکانات فوق العاده بالایی برای طراحی، ساخت و بهره برداری سازه دارند، از این رو

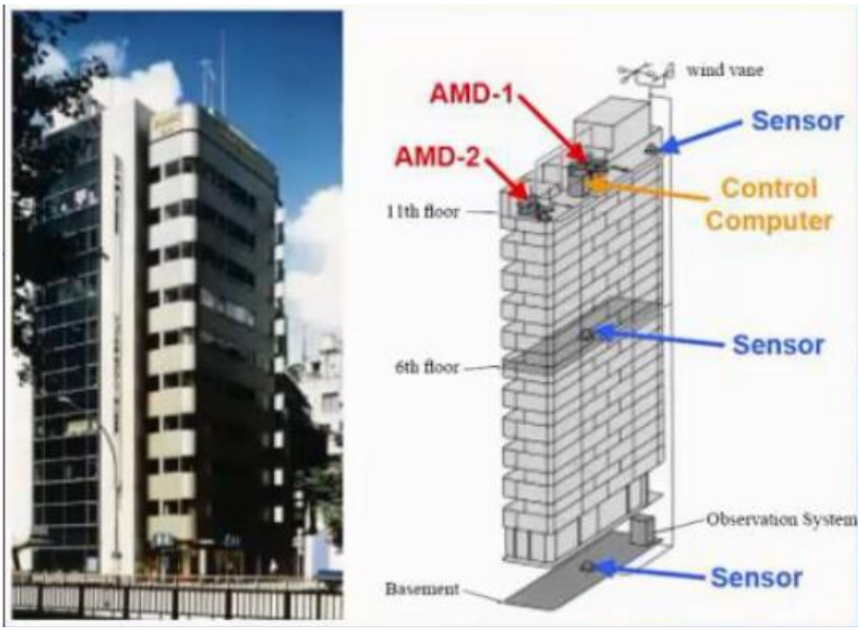
اسـتفاده از این سـیسـتم ها تاکنون چندان فراگیر نشـده اسـت عموما در کشـور ژاپن آن هم در شـرایط خاص مورد استفاده قرار میگیرند.

در سـیسـتم های کنترل غیرفعال برخلاف سـیسـتم های فعال، نیازی به یک منبع خارجی جهت تغییر پارامترها دینامیکی سـازه نیست و سختی و میرایی از ابتدا در سازه ثابت می باشند. سیستم های کنترل غیرفعال به دلیل سادگی طراحی، تعمیر و نگهداری و همچنین عدم نیاز به نیروی محرک خارجی نسبت به کنترل فعال، کابرد و استفاده بیشتری دارند.



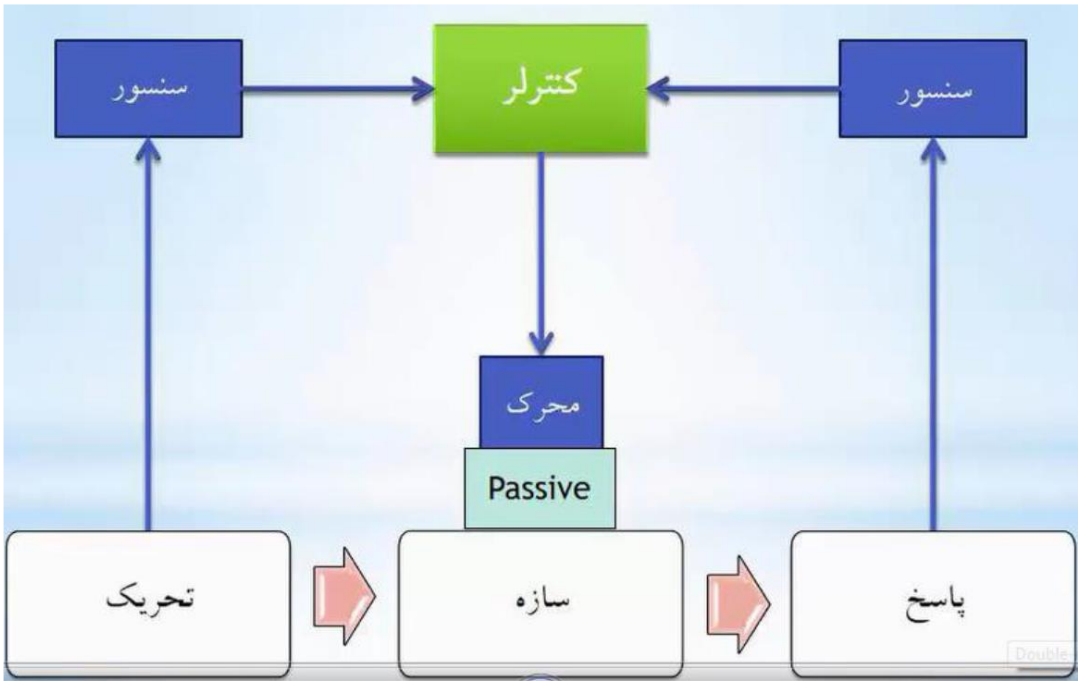
شکل ۵ نحوه عملکرد سیستم کنترل فعال

میراگر نیز به عنوان یکی از ابزارهای کنترل سـازه می‌توانند در هر کدام از این سـه دسته قرار گیرند؛ اما بیشتر در حالت غیرفعال مورد استفاده قرار می‌گیرند. در سیستم کنترل فعال، یک کنترلر بر اساس یک برنامه رایانه ای و متناظر با تحریک دریافت شده از طرف سـازه، نیروی متقابل مورد نیاز را محاسبه و دستور اعمال آن را به سیستم محرک می‌دهد. به عنوان مثال میراگرهای جرم فعال جهت کاهش ارتعاشات ساختمان‌های بلند به هنگام زلزله، نیرویی در خلاف جهت زلزله به ساختمان وارد می‌کند.

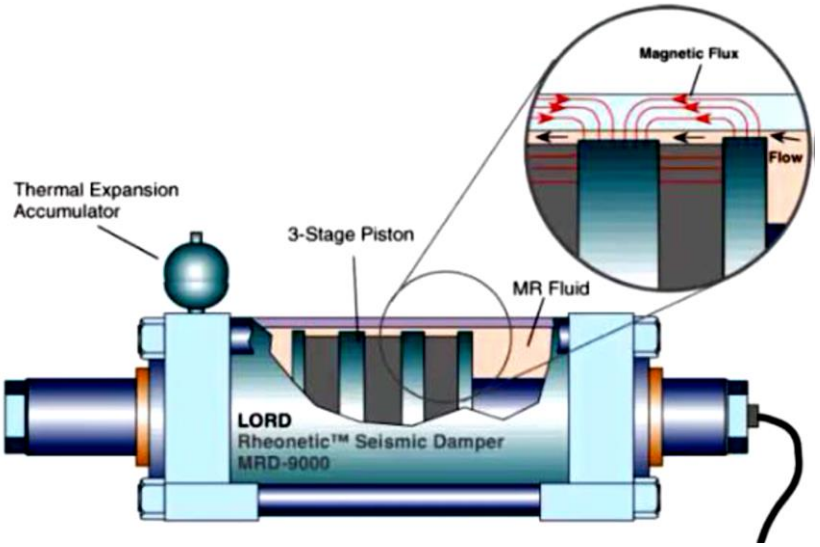


شکل ٦ کاربرد ۲ میراگر جرمی تنظیم شونده فعال در بام ساختمان ۱۱ طبقه ژاپن

سیستم‌های نیمه فعال هم ترکیبی از دو رویکرد موجود در سیستم‌های فعال و غیرفعال وجود داشته و امکان استفاده از هر دو سیستم به طور همزمان وجود دارد. این سیستم‌ها در واقع سیستم‌های غیرفعالی می‌باشند که قادر به تنظیم و تغییر خصوصیات مکانیکی خود می‌باشند؛ به عنوان مثال، میراگرهای MR با تغییر ولتاژ، امکان تغییر میرایی را فراهم می نمایند که در این حالت کنترلر ولتاژ مدنظر را به میراگر اعمال نموده تا نهایتا میرایی کل سازه متناسب با نیاز تغییر نماید. از دیگر مثال های سیستم های نیمه فعال می توان به میراگر روزنه‌ای، اصطکاکی متغیر و یا میراگرهای سیال قابل کنترل اشاره نمود.

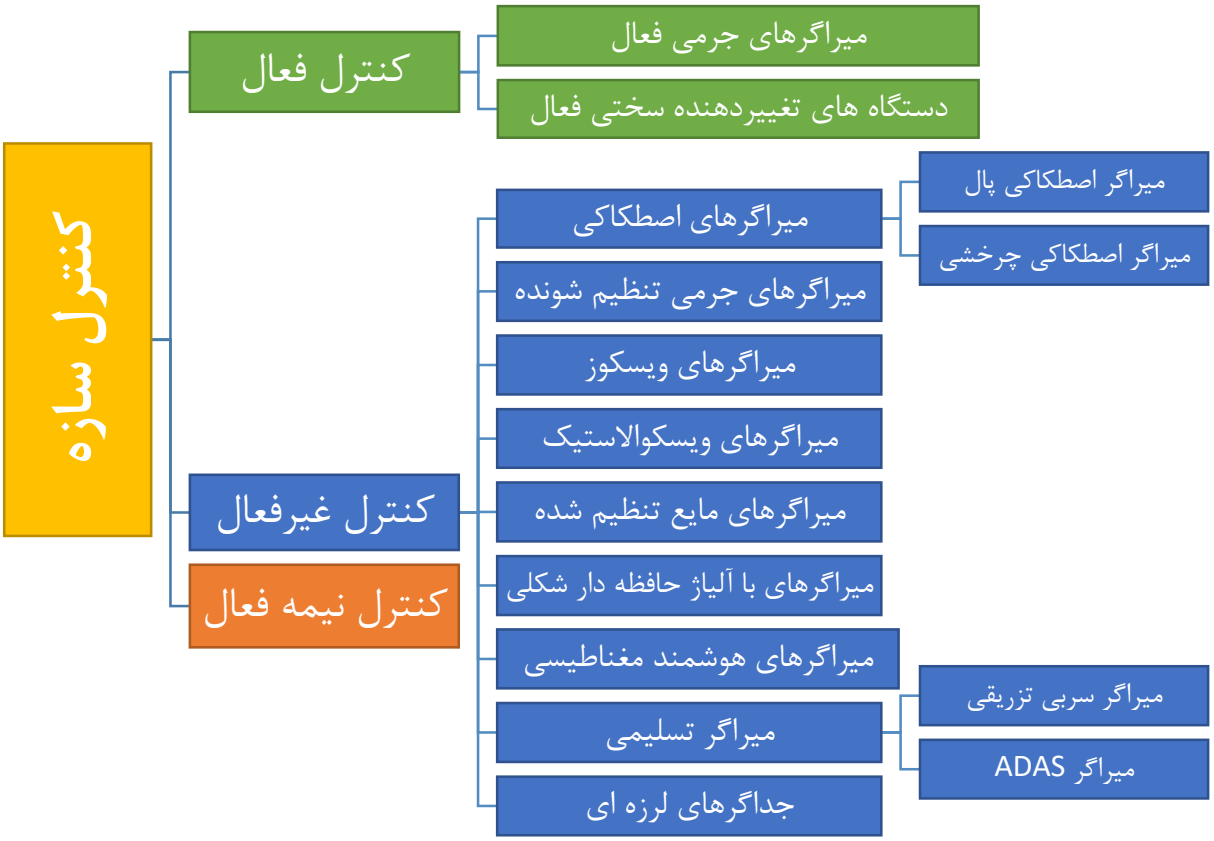


شکل ۷ نحوه عملکرد سیستم کنترل نیمه‌فعال



شکل ۸ میراگر با سیال کنترل‌شونده توسط میدان مغناطیسی

به طور کلی میتوان سیستم های کنترلی را به صورت زیر دسته بندی نمود؛ البته توجه نمایید با توجه به گستردگی این سیستم ها امکان نام بردن از تمامی مدل های موجود در نمودار نبوده و این تنها بخشی از مهم ترین سیستم های کنترلی می باشند.



شکل ۹ دسته بندی انواع سیستم های کنترلی

٤ بخش چهارم: معرفی انواع رایج میراگرهای غیرفعال

پیش از معرفی انواع رایج میراگرها لازم است با یک مفهوم به نام میراگر وابسته به سرعت و یا تغییر مکان آشنا شویم.

٤. ١ میراگرهای وابسته به سرعت و وابسته به تغییرمکان

در یک دسته بندی، میراگرها به دو نوع وابسته به سرعت و وابسته به تغییرمکان دسته بندی می‌شوند. در میراگرهای وابسته به سرعت، مشخصات و عملکرد آن‌ها وابسته به سرعت ایجاد شده درون آن‌ها بوده و در میراگرهای وابسته به تغییرمکان، عملکرد آن‌ها وابسته به تغییرمکان ایجاد شده درون آن‌ها می‌باشد. در واقع در میراگرهای وابسته به سرعت، رابطه نیرو–تغییرمکان اساسا تابع سرعت دو انتهای میراگر بوده و در میراگر وابسته به تغییرمکان، نیروی میراگر اساسا تابع تغییرمکان نسبی بین دو انتهای میراگر می‌باشد.

در میراگرهای وابسته به سرعت، مقادیر حداکثر شتاب، سرعت و تغییرمکان ایجاد شده در میراگر در یک لحظه اتفاق نمی‌افتند و اصطلاحا اختلاف فاز وجود دارد لذا نیروی حداکثر ایجاد شده در هر یک از اعضا که در زمان حداکثر شدن شتاب رخ می‌دهد در لحظه‌ای که سرعت حداکثر شده رخ نمی‌دهد که این خود یک مزیت برای میراگرها وابسته به سرعت می باشد.

به عنوان یک نکته طراحی، میراگرهای وابسته به تغییرمکان و وابسته به سرعت باید برای دامنه جابجایی برابر با ۱/۳ برابر بیشینه جابجایی سازه و میراگرهای وابسته به سرعت برای ۱/۵ برابر سرعت بیشینه سازه تحت زلزله MCE طراحی شوند.

در دسته‌بندی دیگر، میراگرهای غیرفعال بر اساس مکانیزم استهلاک انرژی و اجزای سازنده آن ها به صورت زیر دسته‌بندی می‌شوند:

۱. میراگر ویسکوز
۲. میراگر ویسکواالاستیک
۳. میراگر اصطکاکی
۴. میراگر تسلیمی (هیسترزیس)

در بخش های آتی، هر یک از این میراگرها و نحوه ی عملکرد آنها توضیح داده خواهند شد.

۲.٤ گام‌های طراحی ساده سازی شده

به طور کلی برای طراحی میراگرها مطابق با فلوچارت‌های موجود در کتاب‌ها و آیین‌نامه‌های معتبر، باید مراحل زیر طی شود که در ادامه برای هر یک از میراگرها، جزییات بیشتری ارائه خواهد شد. لازم به ذکر است که روند شرح داده شده به منظور طراحی سازه‌های جدید با میراگر بوده و به منظور مقاوم‌سازی سازه های موجود به کمک میراگر نیاز به طی کردن روند متفاوتی می باشد که در نشریه ۷۶۶ و آیین‌نامه‌های دیگر در این رابطه صحبت شده است.

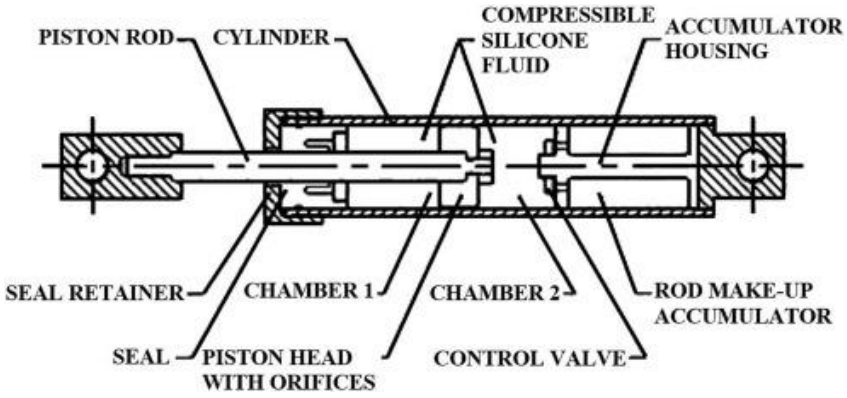
به صورت ساده و کلی، گام های زیر برای طراحی یک سازه همراه با سیستم کنترلی باید طی شوند:

۱. تعیین درصد میرایی هدف که معمولا بین ۱۵ تا ۳۰ درصد است.
۲. ادامه محاسبه برش پایه حداقل.
۳. تحلیل طیفی (مودال) سازه با فرض یک سختی اولیه برای سازه با در نظر گرفتن حداقل دو میراگر در هر طبقه با استفاده از طیف طراحی.
۴. تعیین پریود مود اصلی و سایر مودها در جهت مورد نظر و در ادامه محاسبه جرم موثر لرزه‌ای و ضریب مشارکت هر مود و نهایتا تعیین جابجایی مرکز جرم هر طبقه در هر مود.
۵. محاسبه نیروها و جابجایی در میراگرها و تغییر مشخصات آن‌ها در صورت لزوم

۳.٤ میراگر ویسکوز

عملکرد این میراگرها، وابسته به سرعت ایجاد شده درون آن‌ها است. در این میراگرها با استفاده از حرکت مایع لزج، درون یک محفظه سیلندر مانند، انرژی مستهلک می‌شود. نیروی ایجاد شده به شکل و اندازه روزنه‌ها و سرعت حرکت مایع وابسته است. یکی از مزایای این میراگرها مربوط به تولید نیروی میرایی حداکثر غیرهم‌فاز با ماکزیمم جابه‌جایی سازه است (به دلیل اختلاف پاسخ موجود در نیروی میراگر به دلیل رابطه نیرو و تغییر شکل میراگر که وابسته به حرکت پیستون و سرعت مایع است). این میراگرها به دلیل سادگی در نصب، تنوع ابعاد، اندازه‌ها و قابلیت انطباق و هماهنگی با سایر اعضا، کاربرد بسیاری در طراحی و مقاوم سازی پیدا کرده‌اند. این میراگرها در اکثرسازه ها قابلیت پیاده سازی و کاربرد دارند.

نکته قابل توجه قبل از ذکر مراحل طراحی این میراگرها این است که طبق آیین نامه NEHRP و به جهت اطمینان از عملکرد سازه و میراگر، سازه اولیه و بدون میراگر باید بتواند ۷۵ درصد برش پایه سازه را به تنهایی تحمل کند.



شکل ۱۰ ساختار مکانیکی میراگر ویسکوز (Viscous Damper)

با توجه به شکل ۱۰، پیستون قادر به حرکت درون سیلندر بوده و بر اثر این حرکت، مایع از سوراخ اوریفیس واقع در سر پیستون جابجا می شـود. درنتیجه‌ی حرکت مایع با سـرعت بالا از بین این سـوراخ ها، بین ذرات سـیال و جداره اصـطکاک ایجاد شـده که منجر به استهلاک انرژی به صورت حرارت می‌شود.

مراحل کلی طراحی میراگر ویسکوز به شرح زیر می‌باشد.

گام ۱: در مرحله اول، نسبت میرایی سازه با میراگر طبق رابطه (۵) در زیر محاسبه می‌شود.

$$\xi_d = \frac{T \sum C_j \varphi_{rj}{}^2 \cos^2 \theta_j}{4\pi \sum m_i \varphi_i{}^2} \qquad (۵)$$

در رابطه (۵)، T پریود مود اصلی سازه، C_j ضریب میرایی طبقه j، φ_{rj} جابجایی افقی نسبی دو انتهای میراگر در اثر تغییرشکل سـازه در مود اول تغییرشـکـل، θ_j زاویه میراگر با افق در طبقه j، m_i جرم لرزه‌ای طبقه i و φ_i تغییرمکان طبقه i در اثر تغییرشکل در مود اول سازه می‌باشد. رابطه (۵) مختص میراگرهای خطی (رابطه نیرو و تغییرشکل میراگر خطی) است.

گام ۲: در این مرحله باید جرم لرزه‌ای اجزا و طبقات براساس سطح بارگیر طبقات و ترکیب بار لرزه‌ای مندرج در آیین‌نامه لرزه‌ای استاندارد ۲۸۰۰ محاسبه شود.

گام ۳: در این مرحله، شکل مودی و پریود مود اول محاسبه می‌شود.

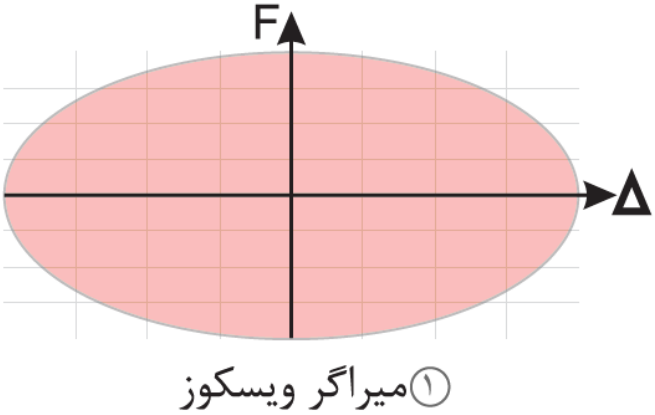
گام ٤: در این مرحله زاویه میراگر با افق تعیین می‌گردد که در صورتیکه میراگر به صورت قطری در سازه نصب شود به سادگی با قانون مثلثات محاسبه می‌شود.

گام ٥: آرایش میراگرها و تعداد آن‌ها در هر جهت تعیین می‌گردد.

گام ٦: ضریب میرایی میراگرها محاسبه می‌شوند.

گام ٧: در مرحله هفتم، نیروی جانبی و نیروی برشی در هر طبقه براساس محاسبات مراحل قبل محاسبه می شوند.

شکل ۱۱ میراگر ویسکوز در سازه‌ها



شکل ۱۲ منحنی نیرو-جابجایی میراگر ویسکوز

٤.٤ میراگر ویسکوالاستیک

این میراگرها بر اساس مکانیزم تغییرشکل‌های برشی ویسکواالاستیک که در واقع ترکیب دو رفتار ویسکوز و الاستیک می باشند که به معنای رابطه تنش-کرنش وابسته به زمان و برگشت‌پذیر به وضعیت اولیه در صورت باربرداری می باشد. خصوصیات این میراگرها به حرارت و فرکانس بارگذاری بستگی دارد. ضریب میرایی ماده ویسکوالاستیک به ابعاد ماده ویسکوالاستیک، مدول اتلاف و فرکانس بارگذاری وابسته است که از رابطه زیر برای زمانی که سازه تحت بار هارمونیک است محاسبه می‌گردد.

$$G' = e^{10.17443} T^{-3.10205} . F^{0.475466} \quad (۶)$$

$$G'' = \eta_v G' \quad (۷)$$

$$C = \frac{G''A}{F_{s1} h} \quad (۸)$$

به طور خلاصه روند محاسبات و طراحی میراگر ویسکوالاستیک به صورت زیر است.

گام ۱: تعیین نسبت میرایی مورد نیاز برای سازه

گام ۲: فرض اولیه برای تعیین نسبت سختی بادبند به سختی میراگر

گام ۳: تعیین K_{v-b} با استفاده از روش انرژی کرنشی. به این منظور در ابتدا η_{v-b} به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\eta_{v-b} = \frac{\frac{k_b}{k_v}}{\eta^2_v + \frac{k_b}{k_v} + 1} \eta_v \quad (۹)$$

k_b سختی بادبند و k_v سختی میراگر می‌باشد. در ادامه با فرض این که شکل مودی سازه پس از اضافه کردن میراگر تغییری نمی‌کند، نسبت میرایی را از فرمول زیر محاسبه می‌کنیم.

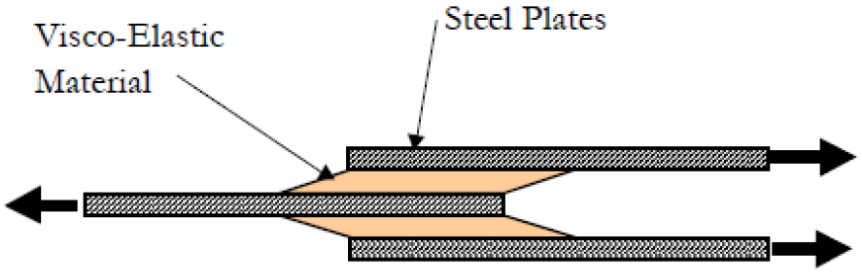
$$\xi_1 = \frac{\eta_{v-b}}{2} (1 - \frac{\omega_1^2}{\omega_{s1}^2}) \quad (۱۰)$$

ω_1 فرکانس در حالت بدون میراگر و ω_{s1} فرکانس در حالت ترکیب میراگر و بادبند می‌باشد و به دنبال محاسبه این پارامتر هستیم تا با استفاده از آن K_{v-b} یا سختی ترکیبی میراگر و بادبند محاسبه شود.

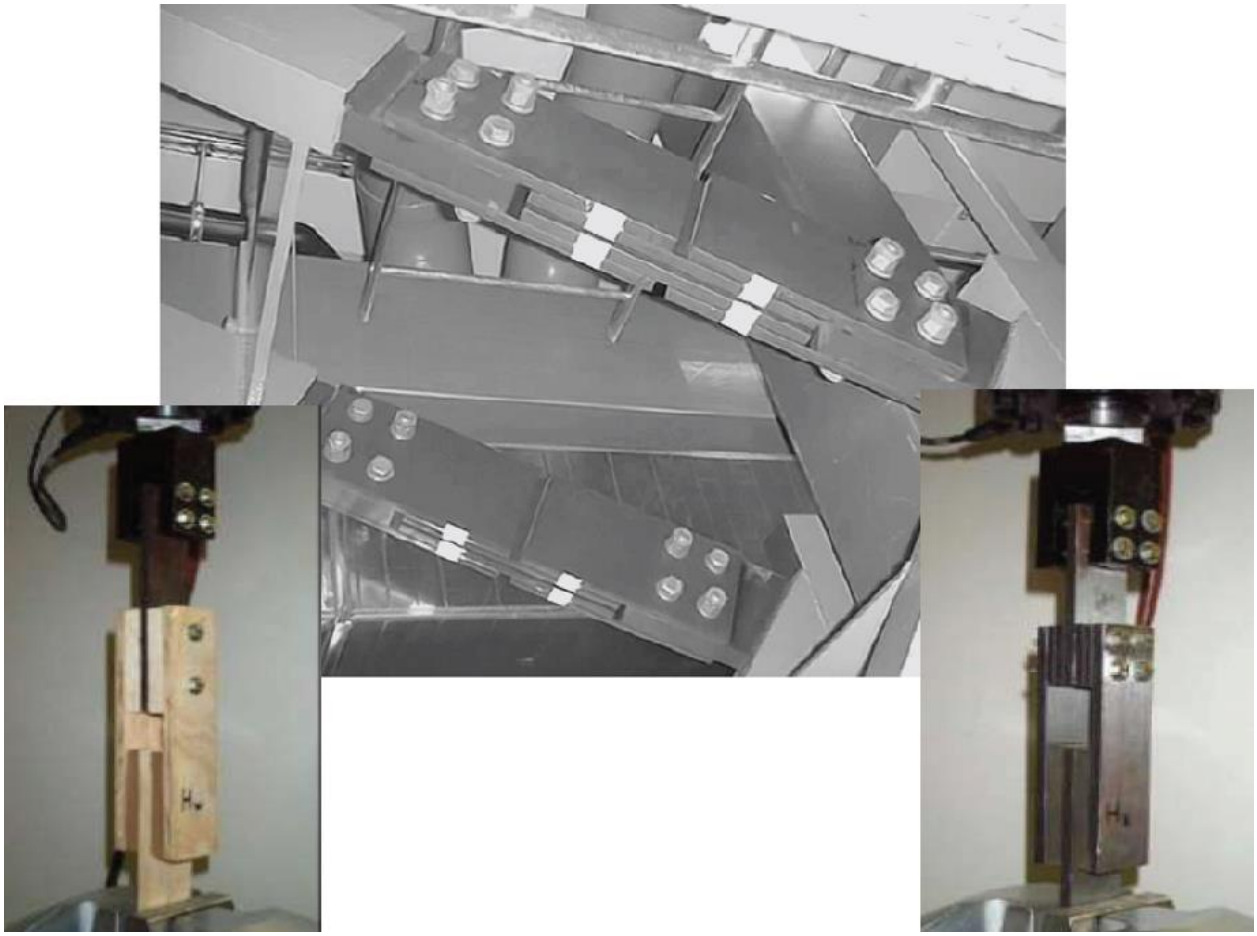
گام ٤: در این مرحله با توجه به فرمول (۱۱) سختی بادبند محاسبه می‌شود.

$$k_v = \frac{[(1+\eta^2_v) + \frac{k_b}{k_v}][1+\eta_{v-b}^2]}{\frac{k_b}{k_v}(1+\eta^2_v)} k_{v-b} \quad (۱۲)$$

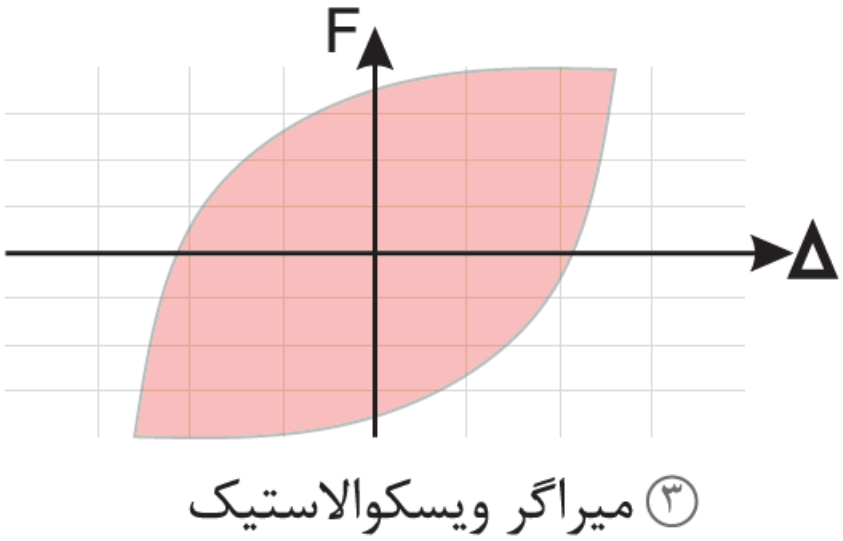
گام ۵: در مرحله آخر با توجه به بیشینه مقدار تغییرشکل مجاز میراگر، ابعاد و ضخامت ماده ویسکوالاستیک محاسبه می‌شود.



شکل ۱۳ میراگر ویسکوالاستیک (Viscoelastic Damper)



شکل ۱٤ میراگر ویسکوز در سازه‌ها



شکل ۱۵ منحنی نیرو-جابجایی میراگر ویسکوالاستیک

٤. ٥ میراگر اصطکاکی

اساس کار این نوع میراگرهای وابسته به تغییرمکان، بر استفاده از اصطکاک کولومب است که انرژی ناشی از زلزله به انرژی گرمایشی در اثر اصطکاک تبدیل می‌شود که سبب می‌شود زمان تناوب ارتعاش سیستم بالا رود. مزیت این نوع میراگرها عدم ایجاد خستگی در بارهای سرویس بوده و عملکرد آن‌ها به سرعت بارگذاری و دمای محیط وابسته نیست (بر خلاف میراگرهای ویسکوز و ویسکوالاستیک). معمولاً این میراگرها به صورت ترکیبی با مهاربندها نصب می‌شوند و به دو نوع کلی اصطکاکی پال و اصطکاکی چرخشی تقسیم‌بندی می‌شوند. این میراگرها برای ساختمان‌های کوتاه و متوسط در مقابل زلزله مناسب‌ترند.

تحت بارهای بهره‌برداری، این میراگرها به صورت یک عضو سازه‌ای معمولی رفتار کرده و به محض این‌که نیروی ایجاد شده در آن به نیروی لغزش رسید، عملکرد اصلی خود را نشان داده و تا زمانی که جهت نیرو و بارگذاری عوض نشود، نیرو ثابت باقی می‌ماند، بنابراین شکل منحنی چرخه‌ای آن مستطیلی شکل و مستقل از سرعت است.

انرژی مستهلک شده در سازه‌ها با میراگر اصطکاکی تا حد زیادی بستگی به مقدار نیروی لغزش دارد. نیروی لغزش حداقل مقدار نیرویی است که باعث لغزش دو صفحه میراگر نسبت به هم می‌شود. برای این نیرو باید حد متعادلی انتخاب شود زیرا اگر مقدار آن زیاد باشد، با توجه به عدم حرکت دو صفحه نسبت به همدیگر، مقدار انرژی استهلاکی صفر خواهد بود و سازه همانند قاب مهاربندی معمولی کار می‌کند و در مقابل هم در صورتی که نیروی لغزش بسیار کوچک باشد، جابجایی بین دو صفحه زیاد بوده و به مانند قبل مقدار انرژی مستهلک شده برابر با صفر خواهد بود و سازه مانند یک قاب خمشی عمل می‌کند. بنابراین نیاز به در نظرگیری یک نیروی لغزش بهینه است که باید از نیروی باد هم بیشتر باشد تا در اثر باد عملکردی از خود نشان ندهد و عملاً کارایی آن تحت نیروی زلزله ی مشخصی شروع گردد.

مراحل کلی طراحی این میراگر به صورت زیر می‌باشد.

گام ۱: انتخاب ابعاد مهاربند

گام ۲: تعیین پریود غالب ارتعاش زمین و شتاب مبنای طرح

گام ۳: کنترل محدودیت‌های روش طراحی

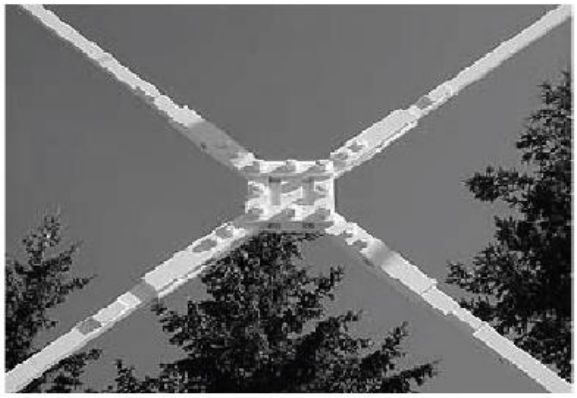
گام ٤: رسم طیف طراحی بار-لغزش

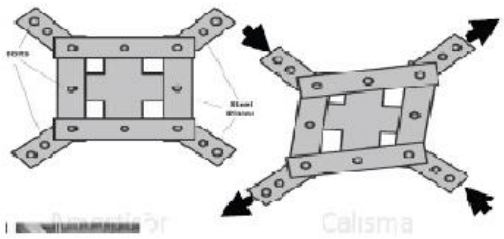
گام ٥: تعیین نیروی لغزشی کل و توزیع در طبقات

گام ٦: تعیین نیروی لغزشی بین میراگرها

گام ۷: کنترل عدم لغزش میراگرها تحت باد

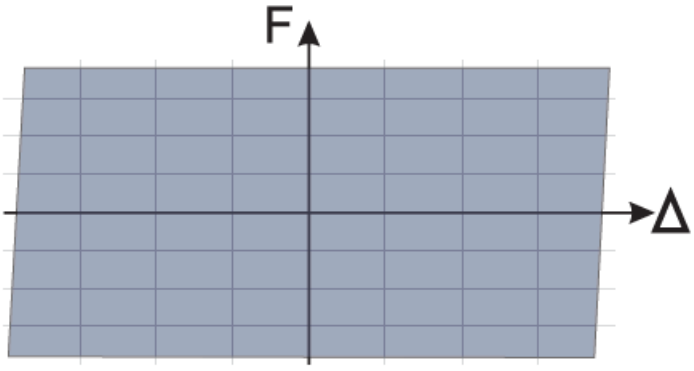
گام ۸: کنترل عدم جاری شدن مهاربندها قبل از لغزش میراگرهای اصطکاکی





شکل ١٦ میراگر اصطکاکی در سازه‌ها

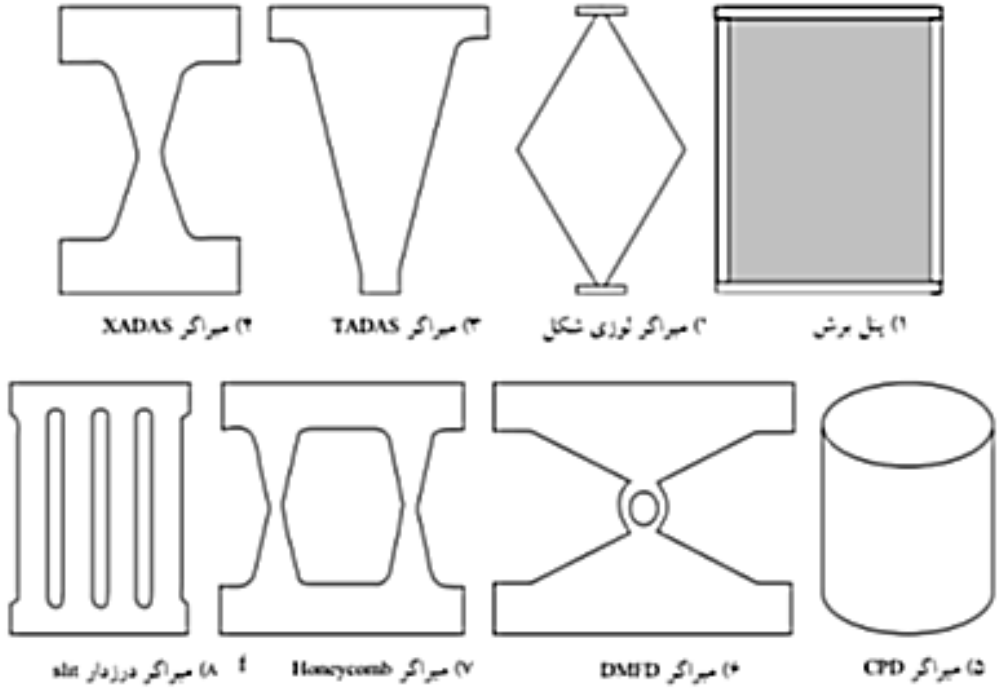
شکل ۱۷ نوعی دیگر از میراگر اصطکاکی در سازه‌ها



شکل ۱۸ منحنی نیرو-جابجایی میراگر اصطکاکی

٦.٤ میراگر تسلیمی (هیسترزیس)

این میراگرها وابسته به تغییرمکان بوده و انرژی ناشی از زلزله را ازطریق تسلیم، رفتار غیرخطی و رفتار غیرالاستیک اجزا و قطعاتِ به کار رفته در میراگر مانند فولاد، سرب و مواد دیگر مستهلک می‌کنند. بسته به نوع سازه و نحوه قرارگیری میراگر، این میراگرها به اشکال مختلف برشی، خمشی و محوری می‌توانند تغییر شکل داده و انرژی را مستهلک کنند. با ایجاد انواع اشکال برای میراگرها مانند مثلث متساوی الساقین، می‌توان از اتلاف انرژی زلزله به میزان بیشتری بهره‌مند شد.



شکل ۱۹ منحنی نیرو-جابجایی میراگر اصطکاکی

میراگرهای تسلیمی ADAS دسته‌ای از میراگرهای تسلیمی هستند که توانایی تسلیم گسترده و اتلاف انرژی فوق‌العاده را دارا می‌باشند و میراگرهای سربی تزریقی نیز از یک سیلندر و دو محفظه پیستون و سرب تشکیل شده است که با حرکت پیستون به هنگام زلزله سرب از محفظه بزرگ‌تر به محفظه کوچک‌تر با تغییرشکل خمیری انرژی جنبشی را به صورت حرارتی تلف می‌کند.

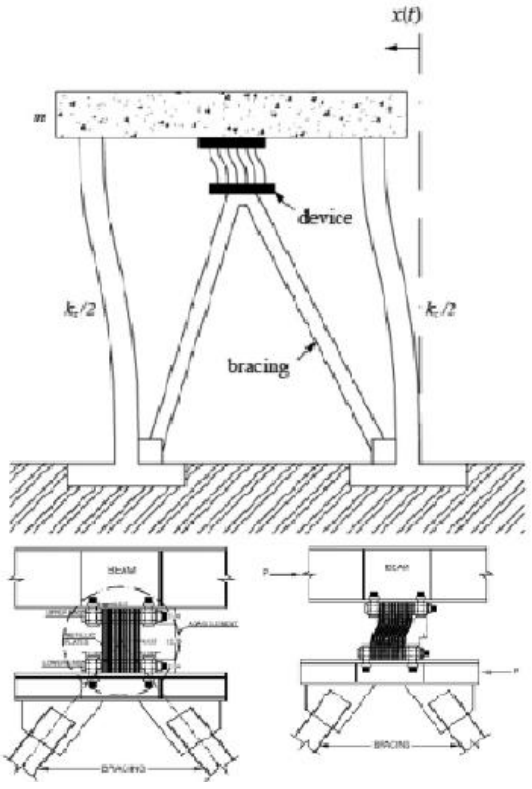
روند کلی طراحی میراگرهای T-ADAS به این صورت است که با توجه به این موضوع که نسبت به پدیده خستگی حساس هستند، در نخستین گام نیاز هست تا تعداد سیکل قابل تحمل این المان‌ها محاسبه شود و بعد از آن با توجه به شکل‌پذیری المان میراگر و بیشینه تغییر مکان ایجاد شده در المان، ابعاد لازم محاسبه شود و نهایتاً در مراحل آخر با توجه به ابعاد، برش تسلیم محاسبه و برای برش طبقات بررسی شود. خلاصه‌ای از فرمول‌های مراحل گفته شده در زیر نوشته شده است.

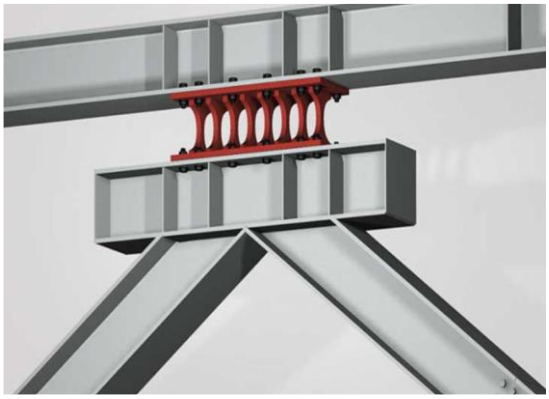
$$\varepsilon_{\max} = 0.08N^{-0.3}_{f} \qquad (۱۳)$$

$$\mu_d = \frac{D_{\max}}{D_y} \qquad (۱۴)$$

$$D_{\max} = \frac{\varepsilon_{\max} h^2}{t} \qquad (۱۵)$$

$$V_y = \frac{F_y b t^2}{4h} \qquad (۱۶)$$

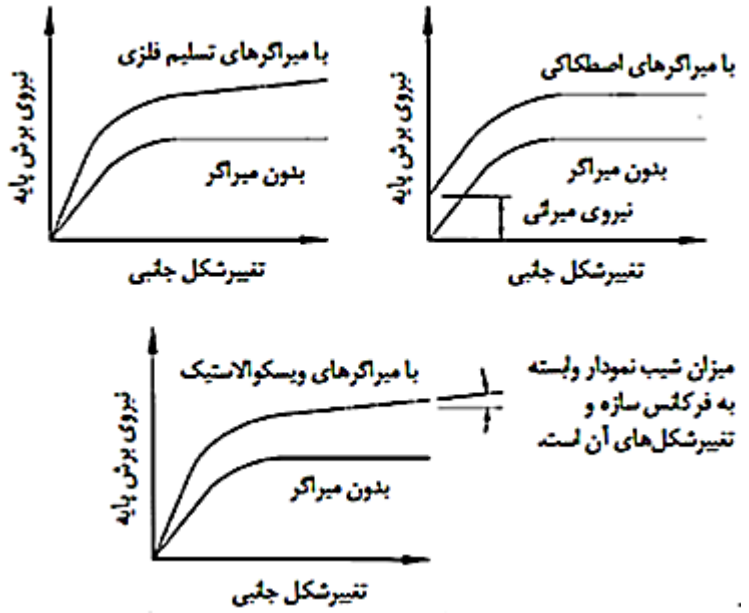




شکل ۲۰ میراگر تسلیمی در سازه‌ها

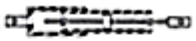
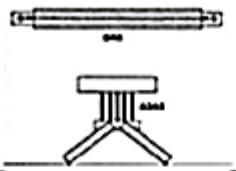
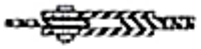
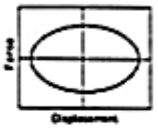
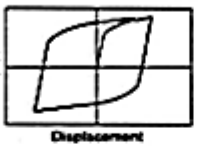
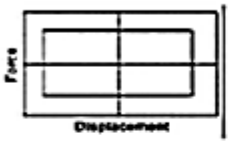
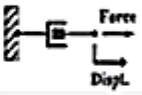
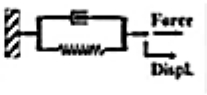
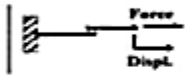
۵ نتیجه گیری و مقایسه عملکرد میراگرهای مختلف

تاثیر استفاده از انواع میراگرها را بر نمودار نیرو–تغییرمکان سازه در شکل زیر مشاهده می شود که می‌تواند کارایی و تاثیر هر کدام را مشخص کند. به عنوان مثال مشاهده می شود که در یک تغییرشکل جانی ثابت استفاده از هر یک از میراگرهای تسلیمی، اصطکاکی و ویسکوالاستیک سبب افزایش نیروی برش پایه ساختمان می شود اما در عین حال عموما سختی (شیب نمودار) و شکل پذیری سازه (سطح زیر نمودار) افزایش قابل توجهی می یابد که این خود منجر به بهبود سطح عملکرد سازه می شود که در بخش های گذشته در این رابطه بحث گردید.



شکل ۲۱ تاثیر انواع میراگرها بر پاسخ نیرو-تغییرمکان سازه

به صورت کلی، تفاوت عملکردی، محاسن، معایب و بقیه مشخصات میراگرهای غیرفعال در شکل زیر نمایش داده شده است.

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 مهندسین	استهلاک انرژی بالا در هر چرخه، عدم حساسیت به دمای بهره‌برداری
معایب	احتمال نشت سیال (مشکل قابلیت اعتماد)	ظرفیت تغییرشکل 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

شکل ۲۲ مقایسه میراگرهای غیرفعال برای کاهش پاسخ لرزه‌ای

منابع

1. NEHRP2000, "NEHRP Recommended provisions for seismic regulations for new buildings and other structures," Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C., 2000.
2. -S. Hwang, "Seismic Design of Structures with Viscous Dampers," International Training Program for Seismic Design of Building Structures
3. C. Chang, Y. Y. Lin, and M. L. Lai, "Seismic Analysis and Design of Structures with Viscoelastic Dampers," ISET Journal of Earthquake Technology, vol. 4(35), pp. 143-166, 1998.
4. Filiatrault, A., and Cherry, S. (1990)." Seismic Design Spectra for Friction-Damped Structures." Journal of Structural Engineering, Vol. 116, No. 5, May,1990. ©ASCE

- - Smart structures, innovative systems for seismic response control, By Franklin Y.Cheng, Hongping Jiang, Kangyu Lou, Taylor & Francis Group, 2008
- Passive Energy Dissipation Systems In Structural Engineering T.T.Soong and G.F. Dargush,1997
- Passive Energy Dissipation Systems for Structural Design and Retrofit M.C.Constantinou, T.Soong and G.F. Dargush,1998
- Passive and Active Structural Vibration Control in Civil Engineering T.T.Soong and M.C.Constantinou,1994
- In-structure Damping and Energy Dissipation; Design Guidelines Trevor E Kelly, S.E.2001
- دستورالعمل استفاده از میراگرها در طراحی و مقاوم‌سازی ساختمان‌ها، ضابطه شماره ۷۶۶، سازمان برنامه و بودجه کشور

کلیه حقوق مادی و معنوی این اثر برای شـرکت مهندسـی سبز سازه محفوظ می باشد و هرگونه کپی برداری ، تقلید یا باز نشر غیر قانونی بوده و تحت پیگرد قانونی قرار خواهد گرفت.