

# کنترل ارتعاشات لرزه‌ای سازه‌ها با استفاده از سیستم‌های کنترل غیر فعال

آرش بخشی‌پور صدآپشته، کارشناسی ارشد مهندسی عمران گرایش زلزله، دانشگاه آزاد شبستر، آذربایجان، ایران

پست الکترونیکی نویسنده مسئول: [arash.bakhshipoor@yahoo.com](mailto:arash.bakhshipoor@yahoo.com)

دریافت: 94/08/10 - پذیرش: 95/03/10

## چکیده

یکی از مهمترین مسائلی که در زمینه مهندسی سازه خودنمایی می‌کند، یافتن راه‌های تقلیل نیروی وارده به اعضای سازه‌ای ساختمان می‌باشد. ارتعاشات شدید زمین، نیروهای اینرسی جانبی در سازه را ایجاد می‌کند و باعث می‌شود سازه با دامنه‌ای متناسب با انرژی ورودی آن نوسان می‌کند. اگر سهم اعظم این انرژی در حد حرکات سازه صرف شده باشد، پاسخ لرزه‌ای به طور قابل ملاحظه‌ای بهبود خواهد یافت. بنابراین اگر بتوان قسمت اعظم انرژی لرزه‌ای را به صورت مکانیکی تلف کرد، پاسخ سازه را نیز می‌توان بدون خسارت سازه‌ای کنترل نمود. استفاده از سیستم‌های مستهلک کننده انرژی در ساختمانها سبب ارتجاعی باقی ماندن اعضای سازه‌ای در حین زلزله می‌گردد و در نتیجه از بروز تخریب جلوگیری می‌نماید. یکی از ابزارها و روش‌های جدید و کارآمد مقابله با زلزله، استفاده از انواع میراگرهای فعال و غیر فعال در صنعت ساختمان است. در این میان انتخاب میراگرهای غیرفعال به خاطر کم هزینه بودن و تکنولوژی مناسب تر نسبت به میراگرهای فعال و امکان استفاده آنها در داخل کشور ارجحیت دارد.

واژه‌های کلیدی: سیستم‌های مستهلک کننده انرژی، میراگر ویسکوالاستیک، میراگر لزج، میرایی، ارتعاش سازه

## 1- میرایی در سازه‌ها

ایجاد ارتعاش در آن می‌گردد. نیروی وارده به سازه می‌تواند سرچشمه داخلی یا خارجی داشته باشد. وجود یک دستگاه مرتعش در داخل سازه به نحوی که تکیه گاه این دستگاه به یک عضو سازه‌ای نیرو وارد کند، می‌تواند سبب ارتعاش موضعی یا کلی سازه گردد. نیروهایی نظیر باد منشا خارجی داشته و به طور مستقیم بر سازه وارد می‌گردد و از طرف دیگر، نیروهایی نظیر زلزله، ارتعاش را از طریق زمین به شالوده سازه منتقل کرده و انرژی ارتعاش از شالوده به سایر طبقات انتقال می‌یابد که به این حالت تحریک پایه (Base Excitation) گفته می‌شود.

از طرف دیگر وظیفه اصلی یک سازه انتقال بارهای موثر بر ساختمان، که بخش قابل ملاحظه‌ای از آنها ماهیت دینامیکی (لرزه‌ای، هارمونیک و ضربه‌ای) دارند، به پی و خاک زیر آن است. تحمل و انتقال موثرین بارها به همراه

پدیده‌ای که باعث می‌شود ارتعاش آزاد یک سیستم به تدریج مستهلک گردد، میرایی نامیده می‌شود. در میرایی، انرژی جنبشی ارتعاشی سیستم به واسطه مکانیزم‌های مختلفی مستهلک می‌شود و معمولاً بیش از یک مکانیسم در پدیده‌ی میرایی مشارکت دارند. در یک سازه دز حال ارتعاش، این مکانیزم‌ها عبارتند از اصطحکاک در اتصالات فولادی، بازو بسته شدن ترکهای میکروسکوپی در بتن، اصطحکاک بین عناصر سازه‌ای و غیر سازه‌ای (نظیر دیوارهای جداساز) و موارد مشابه. بنابراین تعریف یک رابطه ریاضی برای هر یک از پدیده‌های فوق در یک ساختمان واقعی غیر ممکن است.

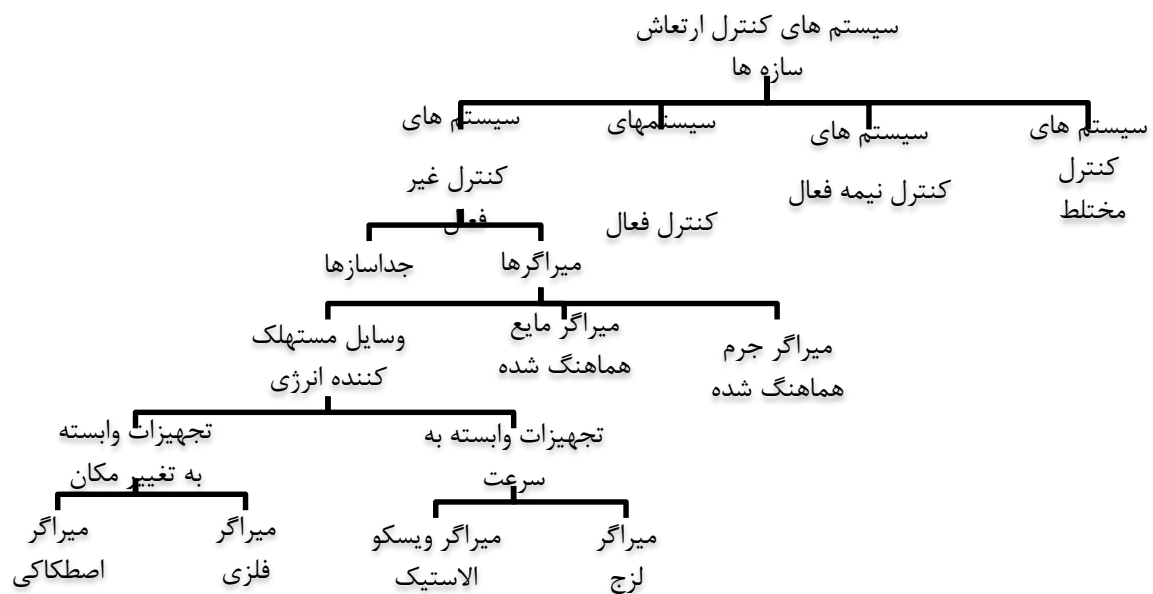
## 2- مفهوم کنترل ارتعاش سازه‌ها

به طور کلی اعمال هرگونه نیرو به یک سازه سبب

تأمین آرامش لازم برای بهره برداری، ایجاب می‌کند که ارتعاشات و نیروهای ناشی از آنها در اعضای سازه‌ای و غیرسازه‌ای کاهش یافته و محدود شوند. کنترل ارتعاشات سازه‌ها در اصل به معنی کاهش در پاسخ تغییر مکان و یا شتاب سازه (مهمترین عوامل ایجاد خرابی به هنگام زلزله) از طریق تعدیل خصوصیات سازه‌ای است. برای ایجاد سهولت در مطالعه روش‌های مختلف کنترل، طبقه بندی‌های مختلفی صورت گرفته است. مبنای برخی از این طبقه بندی‌ها مشخصه‌های دینامیکی سازه‌ها و برخی دیگر محل و نحوه توزیع عامل کنترل‌کننده در ساختمان است، اما کلی‌ترین و متداولترین روش طبقه‌بندی بر اساس نحوه عملکرد سیستم کنترل می‌باشد.

- 3- طبقه‌بندی روش‌های کنترل ارتعاش سازه‌ها**
- سیستم‌های کنترل بر اساس نحوه عملکرد بصورت زیر طبقه‌بندی می‌شوند:
- 1- سیستم‌های کنترل فعال (Active Control Systems)
  - 2- سیستم‌های کنترل غیرفعال (Passive Control Systems)
  - 3- سیستم‌های کنترل نیمه‌فعال (Semi Active Control Systems)
  - 4- سیستم‌های کنترل مختلط (Hybrid Control Systems)

شکل 1. نیز انواع سیستم‌های کنترل ارتعاش سازه‌ها بر اساس نحوه عملکرد سیستم را نشان می‌دهد.



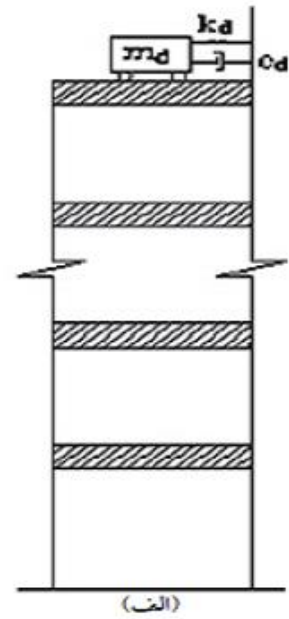
شکل 1. انواع سیستم‌های کنترل ارتعاش سازه‌ها بر اساس نحوه عملکرد سیستم

**4- سیستم‌های کنترل غیر فعال (Passive Control Systems)**

در اینگونه سیستم‌ها، عامل کنترل‌کننده ارتعاش، در محل مناسبی از سازه قرار می‌گیرد و عملاً تا پیش از تحریک سازه غیرفعال باقی می‌ماند. غیرفعال بودن نام این سیستم‌های کنترلی نیز به همین معنی است (شکل 2).

با شروع تحریک سازه، سیستم فعال شده و عملکرد کنترلی خود (اعم از تغییر سختی، پریرود، میرایی یا جرم) را در حین تحریک انجام می‌دهد و پس از خاتمه تحریک، دوباره به حالت غیر فعال باز می‌گردد که به دلیل جذب بخشی از انرژی ورودی به سازه، احتمالاً شاهد خرابی جزئی یا کلی در آن خواهیم بود. این سیستم‌ها مجهز به

وسایلی هستند که مشخصات سازه‌ای مثل شکل‌پذیری،



شکل 2. سیستم کنترل غیر فعال

فعال نمود.

### 5- وسایل میرا کننده غیر فعال

همانطور که در بخش‌های قبل ملاحظه گردید، وجود میرایی در سازه‌ها می‌تواند به مقدار قابل ملاحظه‌ای پاسخ سازه (تغییر مکان و شتاب) را کاهش دهد و نیز نیروهای برشی را در ارتفاع ساختمان کم نماید. استفاده از میراگرهای الحاقی غیر فعال در ساختمان‌ها به دلایل زیر می‌تواند سودمند باشد:

- 1- میراگرهای الحاقی می‌توانند با فراهم کردن سختی و میرایی اضافی در سازه، سبب کاهش پاسخ آن گردند.
- 2- استهلاك مورد نیاز انرژی در ساختمانها می‌تواند اساسا توسط میراگرهای الحاقی تامین شود.
- 3- خسارت وارده به ساختمانها را می‌توان با الحاق این وسایل محدود نمود. به طوریکه در صورت لزوم می‌توان به راحتی آنها را تعویض نمود، بدون آنکه بر سیستم باربر ثقلی اثر بگذارد.

### 6 - نحوه عملکرد مستهلک کننده‌های انرژی

با توجه به اینکه میزان خسارات و صدمات وارده به سازه‌ها (در اثر آزاد شدن انرژی ناشی از زلزله) به میزان انرژی جذب شده توسط اعضای مهم و اصلی آنها بستگی دارد، بررسی رفتار سازه‌ها بر مبنای انرژی می‌تواند روش مناسبی جهت ارزیابی و ارائه راهکارهای بهبود پاسخ سازه تحت زلزله باشد. رابطه‌ی تعادل انرژی در یک سازه تحت را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$E_I = E_K + E_S + E_{\xi} + E_H \quad (1)$$

در این رابطه  $E_I$  انرژی ورودی به سازه ناشی از زلزله،  $E_K$  انرژی جنبشی سازه،  $E_S$  انرژی کرنشی سازه (قابل برگشت)،  $E_{\xi}$  انرژی ناشی از میرایی ذاتی سازه و  $E_H$  انرژی کرنشی غیر خطی یا انرژی ناشی از میرایی چرخه‌ای (هیستریزیس) می‌باشد. هر کدام از پارامترهای موجود در رابطه 1 می‌توانند بیانگر پدیده‌ای در سازه باشند. مجموع انرژی‌های جنبشی و کرنشی سازه که به انرژی ارتعاشی الاستیک سازه معروف است، منجر به تغییر شکل‌های

مقاومت و غیره را اصلاح می‌کنند و یا انرژی را مستهلک می‌نمایند. بنابراین طی این عمل، ارتعاشات سازه کنترل می‌گردد (کاهش می‌یابد). این سیستم‌ها احتیاج به وسایلی با مشخصات ویژه (سختی، مقاومت، رفتار چرخه‌ای یا هیستریزیس و غیره) دارند، بطوریکه می‌توان این وسایل را به دو گروه کلی جداسازها (Isolators) و میراگرها (Dampers) تقسیم نمود که هر کدام از این موارد شامل انواع مختلفی (بر حسب رفتار مکانیکی یعنی رابطه نیرو و تغییر مکان) هستند. سیستم‌های کنترل غیر فعال 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 غیر مشخصی دارند (مثل زلزله) به شدت اثر می‌گذارد و در نتیجه سبب محدود شدن کارایی و کاربرد هر سیستم برای بارگذاری و تحریک خاصی می‌شود. برای کاهش این محدودیت و افزایش محدوده کاربرد و میزان کارایی این سیستم‌ها، می‌توان اقدام به استفاده توأم از انواع مختلف وسایل غیر

الاستیک اعضای سازه‌ای و یا به وجود آمدن انرژی جنبشی در این اعضا می‌شود. این دو صورت از انرژی قابل تبدیل یکدیگر و برگشت پذیر هستند. اما انرژی ناشی از میرایی ذاتی لزج سازه و انرژی ناشی از رفتار غیرخطی برخی اعضای سازه که به انرژی جذب شده توسط سیستم معروفند بصورت کار لازم برای ایجاد تغییر مکان دائمی در اعضای سازه‌ای و یا به صورت کار تلف شده به واسطه وجود میرایی ذاتی توسط سازه جذب شده و قابل برگشت نمی‌باشند. بنابراین می‌توان رابطه 1 را می‌توان به صورت زیر ساده نمود:

$$E_E = E_K + E_S \quad (2)$$

$$E_A = E_\xi + E_H \quad (3)$$

## 6-1 وسایل مستهلک کننده انرژی وابسته به تغییر مکان (افزاینده $E_H$ )

پاسخ این وسایل اساساً مستقل از سرعت سازه است و تاثیر آنها در کاهش پاسخ لرزه‌ای به تغییر مکان نسبی به وجود آمده در سازه بستگی دارد. هنگامی که این وسایل در قاب ساختمانی نصب می‌شوند، معمولاً به همراه اضافه کردن سختی، سبب افزایش میرایی در سازه می‌شوند. در واقع با تسلیم این وسایل انرژی به واسطه جاری شدن (مانند میراگرهای فلزی) یا لغزش (مانند میراگرهای اصطکاکی) مستهلک می‌شود.

## 6-2 وسایل مستهلک کننده انرژی وابسته به سرعت (افزاینده $E_\xi$ )

این وسایل مستقل از تغییر مکان بوده و براساس سرعت نسبی در سازه عمل می‌کنند و به دو دسته کلی میراگرهای ویسکوز (لزج) و میراگرهای ویسکوالاستیک تقسیم می‌شوند. وسایل مستهلک کننده وابسته به سرعت به خاطر ساختار شیمیایی خود میرایی قابل ملاحظه‌ای را برای سازه فراهم می‌کنند. یکی از تفاوت‌های عمده این دو نوع میراگر در این است که میراگرهای ویسکوالاستیک بر خلاف میراگرهای ویسکوز، علاوه بر افزایش میرایی قادر به تامین سختی اضافی در سازه نیز می‌باشند (میراگرهای ویسکوز از آنجائی که تنها سبب افزایش میرایی می‌شوند و هیچ سختی اضافی‌ای در محدوده فرکانس‌های اصلی معمول سازه‌ها را فراهم نمی‌کنند، شبیه ضربه گیری‌های اتومبیل هستند). خواص مکانیکی هر دو نوع میراگر تابع درجه حرارت و فرکانس تحریک سازه است.

## 7- توزیع میراگرها

توزیع وسایل مستهلک کننده انرژی در امتداد ارتفاع ساختمان امری مهم است. محققین متعددی که کاربرد وسایل مستهلک کننده را برای ساختمان جدید بررسی نموده اند، پیشنهاد می‌نمایند که میراگرها بایستی در سراسر

با توجه به روابط فوق و به ازای یک انرژی ورودی ثابت، هر چقدر بتوان  $E_A$  را افزایش داد،  $E_E$  (انرژی ارتعاشی الاستیک) کاهش می‌یابد و در نتیجه اعضای سازه‌ای تحت تغییر شکل‌های کوچکتری قرار می‌گیرند. اما برای افزایش  $E_A$  بایستی طریقی را پیش گرفت که کمترین صدمه به اعضای اصلی سازه‌ای وارد شود. به همین منظور ایده بکارگیری وسایل مستهلک کننده انرژی مطرح گردید، به طوریکه با الحاق این وسایل به سیستم سازه‌ای، اتلاف انرژی را در این وسایل متمرکز نموده و در نتیجه اعضای اصلی سازه‌ای از هرگونه خرابی احتمالی مصون نگه داشته می‌شوند. وسایل مستهلک کننده انرژی معمولاً به دو صورت کلی سبب افزایش انرژی جذب شده و در نتیجه کاهش انرژی ارتعاشی الاستیک در سازه می‌شوند.

برخی از این وسایل که به مستهلک کننده‌های وابسته به سرعت معروفند با افزایش میرایی لزج سبب افزایش  $E_\xi$  و در نتیجه افزایش  $E_A$  می‌شوند. اما گروه دیگری از این وسایل که در رده مستهلک کننده‌های وابسته به تغییر مکان قرار می‌گیرند به واسطه تمرکز رفتار غیر خطی چرخه‌ای (هیسترزیس) در اعضای میرا کننده سبب افزایش  $E_H$  و در نتیجه افزایش انرژی جذب شده توسط سیستم سازه‌ای می‌شوند.

سازه طوری توزیع شوند تا موارد 1 و 2 تامین شوند.

1- نظم سختی در پلان 2- نظم سختی در ارتفاع

مزیت تحلیل با تامین پیشنهادهای فوق، این است که درگیری دینامیکی مودها ایجاد نمی‌شود. هر چند مطالعات نشان می‌دهد که درگیری دینامیکی مودها به مقدار ناچیز، مشخصات کلی پاسخ را تغییر نمی‌دهد. میرائی لزج معادل برای هر مود را می‌توان با استفاده از زمان تناوب تقریبی مودهای بالاتر و سختی اضافه شده تقریبی ناشی از وسایل الحاقی تعیین کرد. برای بدست آوردن نیروهای تقریبی اعضا می‌توان از جمع آثار مودی استفاده کرد. به هنگام طراحی اعضای حامل میراگرها، باید سازگاری نیروی این وسایل را مورد توجه قرار داد.

اضافه نمودن میراگرها به قاب‌های خمشی، معمولاً افزایش سختی جانبی سازه را به همراه دارد. ولی با تبدیل قاب بادبندی شده به قاب بادبندی میراشده ممکن است سختی کاهش یابد. الحاق میراگرها در هر دو مورد فوق می‌تواند سبب افزایش یا کاهش نیروی جانبی در سازه شوند که مقدار آن بستگی به مشخصات دینامیکی سازه شامل میراگر و بادبندی اتصال (پیوندی) و نیز مشخصات زمین لرزه وارده دارد. بطور مشابه، پاسخ تغییر مکان سازه نیز ممکن است افزایش یا کاهش یابد. ارزیابی‌های مقدماتی درباره مزایای کاهش پاسخ که ممکن است با استفاده میراگرهای الحاقی فراهم شود را می‌توان با مرور طیف پاسخ محل انجام داد که بطور نسبی اثر میرائی و اثر انتقال زمان تناوب را بر پاسخ جابجایی شتاب نشان می‌دهد.

در تعدادی از انواع میراگرهای وابسته به تغییر مکان، نیروی میراگرها هم فاز با نیروی اعضای سیستم سازه‌ای است و این دو نوع نیرو بطور مستقیم با یکدیگر جمع می‌شوند. در میراگرهای وابسته به سرعت، نیروی میراگرها 90 درجه اختلاف فاز با نیروی اعضای سیستم سازه‌ای درند در نتیجه بایستی بصورت برداری جمع شوند. اگر میراگرها به یک قاب ساده (بدون اعضای مثل بادبند، دیوار برشی و ...) اضافه شوند، سختی افزایش یافته به

طور مستقیم از محل میراگرها نتیجه می‌شود. بزرگی سختی جانبی ناشی از نیروهای میراگرها، در حدود 20 تا 200 درصد سختی ذاتی قاب است. بنابراین مقاومت جانبی اعضای سازه تحمیل می‌کند که کدام وسیله میراکننده الحاقی تعبیه گردد تا بتواند مفید واقع گردد.

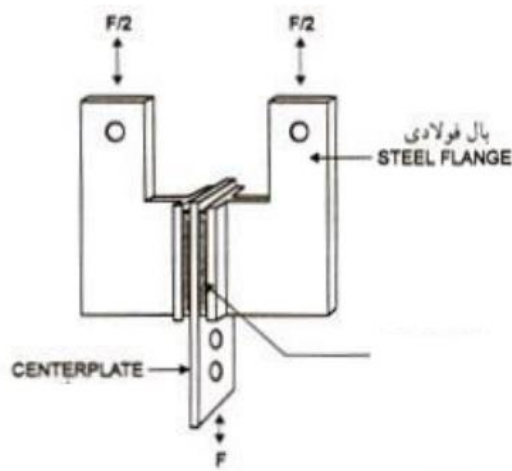
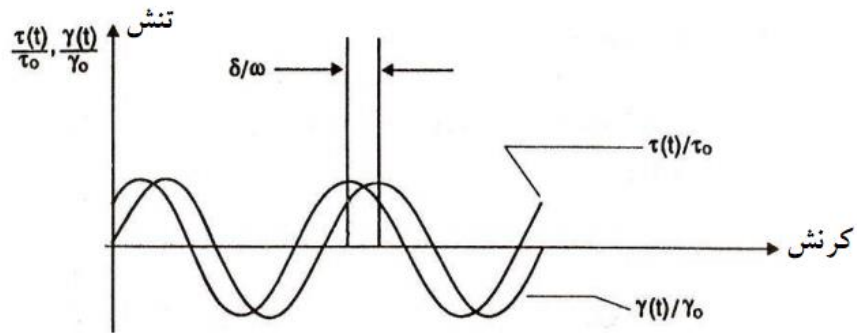
### 8- میراگرهای ویسکوالاستیک

کاربرد موارد ویسکوالاستیک جهت کنترل ارتعاشات به سال 1950 بر می‌گردد. زمانی که برای اولین بار بر روی هواپیما به عنوان وسیله‌ای برای کنترل خستگی ناشی از ارتعاشات در بدنه هواپیماها مورد استفاده قرار گرفت. از آن زمان به بعد این مواد به شکل وسیعی در هواپیماها و سازه‌های هوافضا استفاده شد. کاربرد این مواد در سازه‌های مهندسی عمران در سال 1969 آغاز شد، وقتی که 10000 میراگر ویسکوالاستیک در هریک از برج‌های دوقلوی مرکز تجارت جهانی در شهر نیویورک جهت کمک کردن به مقاومت در برابر بارهای ناشی از باد نصب شدند. سپس چندین کاربرد مشابه از این میراگرها در ساختمان‌های بلندی که در معرض باد بودند در آمریکا و خارج از آن استفاده شد. کاربردهای لرزه‌ای میراگرهای ویسکوالاستیک ریشه در سال‌های اخیر دارد. برای کاربردهای لرزه‌ای، افزایش میرایی بیشتر در مقایسه با آن چیزی که برای کاهش اثرات زلزله نیاز است مورد احتیاج است.

### 8-1- ارزیابی میراگرهای ویسکوالاستیک

مواد ویسکوالاستیک استفاده شده در کاربردهای سازه‌ای عموماً از جنس هم پلیمرها یا شیشه‌ای است بطوریکه وقتی تحت تاثیر تغییر شکل برشی قرار می‌گیرند انرژی را تلف می‌کنند. یک میراگر ویسکوالاستیک که بطور نمونه در شکل 2 نشان داده شده است، شامل لایه‌های ویسکوالاستیک متصل به ورق‌های فولادی می‌باشد. وقتی این میراگرها در سازه قرار می‌گیرند و ارتعاش سازه‌ای سبب حرکت نسبی بین بال‌های فولادی

خارجی و ورق میانی صورت می‌گیرد، تغییر شکل برشی و به دنبال آن اتلاف انرژی صورت می‌پذیرد.

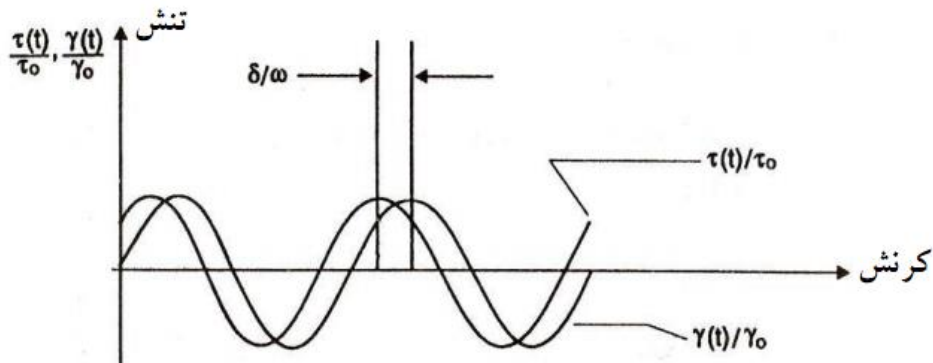


شکل 3. نمونه میراگر ویسکوالاستیک

تحت یک بارگذاری سینوسی با فرکانس  $\omega$  و کرنش برشی  $\gamma(t)$  و تنش برشی  $\tau(t)$  یک ماده ویسکوالاستیک خطی در همان فرکانس  $\omega$  نوسان می‌نماید. اما در حالت کلی دارای یک اختلاف فاز می‌باشد. این مقادیر با روابط زیر بیان می‌شوند:

در این روابط همانطوریکه در شکل 4 نشان داده شده است  $\tau_0$  و  $\gamma_0$  به ترتیب حداکثر کرنش برشی و حداکثر تنش برشی و  $\theta$  زاویه تاخیر فاز است. برای یک  $\gamma_0$  مشخص، هر یک از مقادیر  $\tau_0$  و  $\theta$  تابعی از  $\omega$  هستند.

$$\gamma(t) = \gamma_0 \sin \omega t, \tau(t) = \tau_0 \sin [\omega t + \theta] \quad (4)$$



شکل 4. رابطه تنش - کرنش در بارگذاری سینوسی

به دلیل اینکه ، لذا رابطه 9  
 برای حرکت هارمونیک معتبر است و کمیت  $G''(\omega)/\omega$   
 ضریب میرایی ماده میراگر بوده و نسبت میرایی معادل نیز  
 برابر است با :

$$\dot{\gamma}(t) = \gamma_0 \omega \cos \omega t \quad (10)$$

بنابراین  $G'(\omega)$  به عنوان مدول ذخیره برشی ماده  
 ویسکوالاستیک تعریف می شود که اندازه ای از انرژی  
 ذخیره شده برای هر سیکل است و  $G''(\omega)$  به عنوان مدول  
 برشی از دست رفته تعریف می شود که اندازه ای از انرژی  
 تلف شده در هر سیکل را مشخص می کند. ضریب اتلافی  
 ( ضریب از دست رفتگی )  $\eta$  نیز چنین تعریف می شود :

$$\eta = \frac{G''(\omega)}{G'(\omega)} = \tan \theta \quad (11)$$

رابطه فوق اغلب برای اندازه گیری ظرفیت اتلاف  
 انرژی مواد ویسکوالاستیک استفاده می شود. با توجه به  
 روابط فوق اینطور استنباط می شود که دو مدول  $G'(\omega)$  و  
 $G''(\omega)$  ، رفتار دینامیکی ماده ویسکوالاستیک خطی را در  
 برش تحت تحریک هارمونیک زمانی تعیین می کند. این  
 مدول ها نه تنها تابعی از فرکانس تحریک  $\omega$  هستند بلکه  
 تابعی از دمای محیط و در بعضی مواقع کرنش برشی  
 هستند. عامل دیگری که می تواند در ارزیابی عملکرد  
 میراگرهای ویسکوالاستیک مهم باشد، تغییرات درجه  
 حرارت داخلی مواد آنها در هنگام عملکردشان می باشد.

8-2-مدول های برشی ذخیره شده و از دست رفته

همانطوری که گفته شد، مدول ذخیره برشی و مدول  
 برشی از دست رفته مواد ویسکوالاستیک عموماً تابعی از  
 فرکانس تحریک  $\omega$ ، درجه حرارت محیط  $T$ ، کرنش برشی  
 $\gamma$  و درجه حرارت  $\theta$  می باشند. یکی از راه های مناسب  
 برای تخمین وابستگی این مواد به این پارامترها از طریق  
 انجام آزمایش هایی بر روی نمونه های ویسکوالاستیک در  
 روی محدوده مناسبی از این متغیرها می باشد.

همچنین تنش برشی را می توان بصورت زیر نوشت :

$$\tau(t) = \gamma_0 [ G'(\omega) \sin \omega t + G''(\omega) \cos \omega t ] \quad (5)$$

در این رابطه :

$$\begin{cases} G'(\omega) = \frac{\tau_0}{\gamma_0} \cos \theta \\ G''(\omega) = \frac{\tau_0}{\gamma_0} \sin \theta \end{cases} \quad (6)$$

با استفاده از رابطه 4 و  $\sin^2 \omega t + \cos^2 \omega t = 1$  می توان رابطه  
 5 را بصورت زیر نوشت :

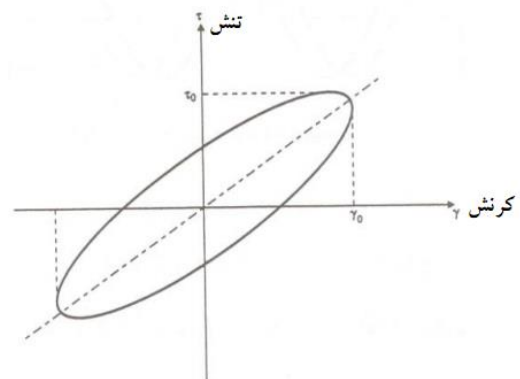
$$\tau(t) = G'(\omega) \gamma(t) \pm G''(\omega) [\gamma_0^2 - \gamma^2(t)]^{1/2} \quad (7)$$

رابطه 8 طبق شکل 5 یک بیضی است که سطوح داخلی  
 آن، انرژی تلف شده توسط ماده ویسکوالاستیک در واحد  
 حجم برای هر سیکل نوسانی را نشان می دهد و بصورت  
 زیر بیان می شود :

$$E_H = \int_0^{2\pi/\omega} \tau(t) \dot{\gamma}(t) dt$$

$$E_H = \int_0^{2\pi/\omega} \omega \gamma_0^2 \cos \omega t [G'(\omega) \sin \omega t + G''(\omega) \cos \omega t] dt$$

$$E_H = \pi \gamma_0^2 G''(\omega)$$



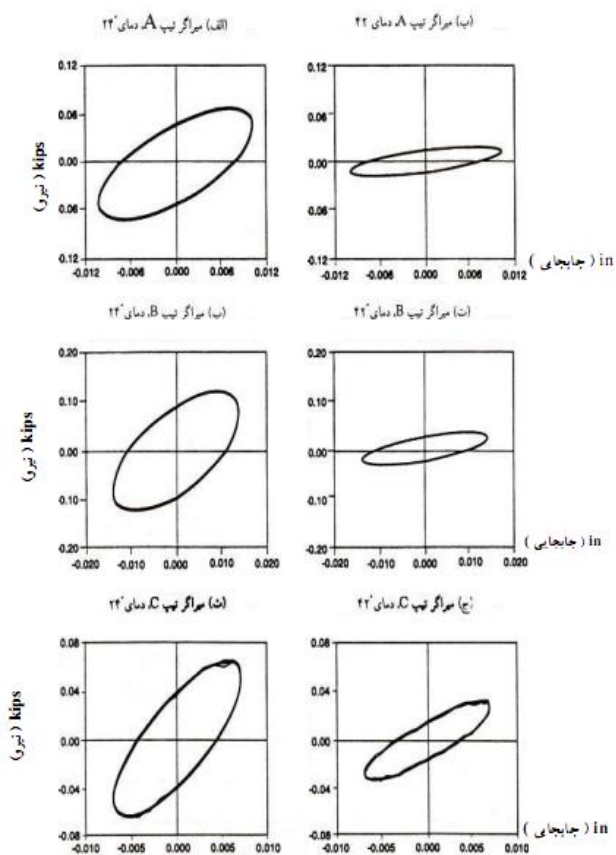
شکل 5: نمودار تنش - کرنش

با بازنویسی معادله 7 خواهیم داشت :

$$\tau(t) = G'(\omega) \gamma(t) + \frac{G''(\omega)}{\omega} \dot{\gamma}(t) \quad (9)$$

$$\xi = \frac{G''(\omega)}{\omega} \left[ \frac{\omega}{2G'(\omega)} \right] = \frac{G''(\omega)}{2G'(\omega)}$$

حلقه‌های هیستریزس تقریباً بیضوی هستند و نشان می‌دهد که میراگرها به شکل موثری انرژی را تلف نموده‌اند. از این شکلها اینطور به نظر می‌رسد که سختی میراگر و مقدار اتلاف انرژی در یک سیکل برای تمامی انواع میراگرها با افزایش درجه حرارت محیطی کاهش یافته است. هرچند، ضرایب از دست رفتگی کم و بیش برای هریک از انواع میراگرها بدون توجه به تغییرات درجه حرارت محیطی ثابت مانده است. مقایسه خواص میراگرها در بین این سه نوع میراگر مطابق جدول 2 می‌باشد.



شکل 6. مقایسه روابط نیرو - تغییر شکل

طبق جدول 2 اینطور می‌توان نتیجه گرفت که میراگر نوع C نسبت به تغییرات درجه حرارت محیطی حساسیت کمی دارد. کاهش درصدی ظرفیت اتلاف انرژی ناشی از تغییرات درجه حرارت محیطی از 24 درجه سانتیگراد به 42 درجه سانتیگراد به ترتیب برابر با 73٪ و 71٪ و 60٪ برای میراگرهای نوع A و B و C می‌باشد. حساسیت به

تعدادی از این آزمایشها در چند سال اخیر انجام شده است. اولین سری از این آزمایشها توسط Change در سال 1993 بر روی سه نوع میراگر ویسکوالاستیک طبق شکل 3 و ابعاد مختلف و نوع ماده ویسکوالاستیک انجام گردید. این میراگرها به ترتیب با حروف A، B و C نشان داده شده‌اند. میراگرهای نوع A و B از یک ماده مشابه ویسکوالاستیک ساخته شده بودند اما ابعاد آنها متفاوت می‌باشند. میراگر نوع C از یک ماده ویسکوالاستیک دیگری ساخته شده بود. جدول 1 سطح، ضخامت و حجم هریک از این نوع میراگرها را نشان می‌دهد.

جدول 1. ابعاد میراگر ویسکوالاستیک

نوع	سطح (in <sup>2</sup> )	ضخامت (in)	حجم (in <sup>3</sup> )
A	1×1.5=1.5	0.2	0.3
B	2×1.5=3.0	0.3	0.9
C	6×3=18	0.15	2.7

میراگر A در ابتدا تحت شش درجه حرارت محیطی مختلف 21 و 24 و 32 و 36 و 40 درجه سانتی گراد مورد آزمایش قرار گرفت. در هریک از این درجه حرارتهای به ترتیب شش آزمایش با فرکانسهای 0/1 و 1 و 2 و 3 و 3/5 و 4 هرتز تا پنجاه سیکل تغییر شکلی در سه محدوده کرنشی مختلف 5٪ و 20٪ و 50٪ صورت پذیرفت. سپس میراگرهای نوع B و C در کرنش ثابت 5٪ با فرکانسهای 3 و 3/5 و 4 هرتز تحت پنج درجه حرارت مختلف 25 و 30 و 34 و 38 و 42 درجه سانتیگراد قرار گرفتند. در نهایت میراگرهای نوع B در سه کرنش دیگر 15٪ و 25٪ و 50٪ تحت درجه حرارت 24 درجه سانتیگراد به منظور شبیه سازی اثر کرنش میراگر بر روی ظرفیت اتلاف انرژی میراگرهای ویسکوالاستیک که تحت اثر حرکات زمینلرزه‌های متوسط تا شدید قرار می‌گیرند بررسی شد. منحنی‌های نیرو - تغییر شکل این سه نوع میراگر تحت اثر تحریکات سینوسی با فرکانس 3/5 هرتز و کرنش میراگر 5٪ تحت دو درجه حرارت محیطی در شکل‌های 6 نشان داده شده است. تمامی



η	G*(psi)	G'(psi)	کرنش (درصد)	فرکانس (HZ)	دما (°C)
1.2	170	142	5	1	24
1.2	167	139	20	1	24
1.19	324	272	5	3	24
1.2	306	256	20	3	24
1.13	67	59	5	1	36
1.12	65	58	20	1	36
1.10	119	108	5	3	36
1.09	112	103	20	3	36

همانطور که قبلاً اشاره شد، این نتایج آزمایشی می‌تواند جهت رسیدن به فرمول‌های تجربی برای  $G'$  و  $G''$  بر حسب توابعی از این پارامترها از تحلیل رگرسیون استفاده کرد. برای مثال فرمولهای تجربی  $G'$  برای این سه نوع میراگر استفاده شده در این مقاله مطابق زیر است:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{نوع A : } G' = C_1 \omega^{0.69} T^{-2.26} \\ \text{نوع B : } G' = C_2 \omega^{0.69} T^{-2.26} \\ \text{نوع C : } G' = C_3 \omega^{0.43} T^{-0.69} \end{array} \right. \quad (12)$$

که در آن  $C_1$  و  $C_2$  و  $C_3$  ثوابت تناسبی دارند. روابط ارائه شده در فرمول 12 برای میراگرهای نوع A و C بر اساس میانگین 20 سیکل اول تغییر شکل میراگر با کرنش متوسط 5٪ به دست آمده است. برای میراگر نوع B، کرنش میراگر 7٪ برای در نظر گرفتن محدوده‌های مختلف کرنشی میراگر ناشی از تحریک‌های بزرگ به معادله اضافه شده است.

### 8-2-1 وابستگی به فرکانس تحریک

مدلهای که برای مواد ویسکوالاستیک پیشنهاد شده است شامل مدلهای Kelvin و Maxwell و ترکیب‌های پیچیده از این دو مدل می‌باشد. یک مشخصه جالب توجه از این مدلها، سادگی آنهاست و برای تعدادی از مواد جامد که خصوصیتشان تغییرات قابل ملاحظه‌ای نسبت به حرارت و فرکانس ندارند کاربرد دارد.

### 8-2-2-2 وابستگی به حرارت محیط

به منظور تعیین وابستگی  $G'(\omega)$ ،  $G''(\omega)$  به حرارت

درجات پایین برای میراگر نوع C همچنین در کاهش مقدار سختی میراگرهای A و B و C که به ترتیب برابر با 70٪ و 68٪ و 34٪ می‌باشد مشاهده می‌شود.

جدول 2. خواص میراگر ویسکوالاستیک با فرکانس 3/5 هرتز و 5٪ کرنش

نوع میراگر	دما (°C)	G'(psi)	G*(psi)	η
A	21	402.8	436.7	1.08
	24	305	344.5	1.13
	28	228.4	275.1	1.20
	32	169	198.2	1.17
	36	120.9	130.9	1.08
	40	91.4	92	1.01
B	25	251.1	301.3	0.2
	30	187.8	223.5	1.19
	34	136.9	161.5	1.18
	38	110.9	122	1.10
	42	89.8	94.3	1.05
	25	28.2	24.6	0.87
C	30	23.1	18.1	0.78
	34	21	15	0.71
	38	17.6	11.6	0.65
	42	15.6	9.8	0.62

مطابق توضیحات قبل واضح است که شخص می‌باید تاثیر درجه حرارت محیطی و فرکانس تحریک را برای یک طرح موثر میراگرهای ویسکوالاستیک در نظر بگیرد. خواص میراگر، همچنین تا حدی وابسته به تعداد سیکل‌های بارگذاری و محدوده تغییر شکل به ویژه برای کرنش‌های بزرگ ناشی از افزایش درجه حرارت ماده داخلی میراگر می‌باشد. نتایج آزمایش بر روی نمونه میراگر B تحت فرکانس تحریک 1 و 3 هرتز، درجه حرارت‌های محیطی 24 و 36 درجه سانتیگراد، کرنش‌های میراگر 5٪ و 20٪ طبق جدول 3 می‌باشد. اینطور به نظر می‌رسد که خواص میراگر تا حدی ثابت می‌ماند و مستقل از کرنش (زیر 20٪) به ازای هر درجه حرارت و هر فرکانس است.

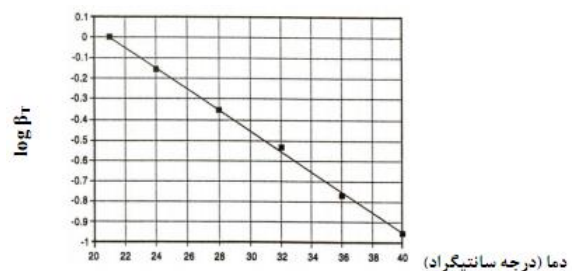
جدول 3. خواص میراگرها

محیط می‌توان از روش متغیرهای کاهش یافته Ferry استفاده کرد. این روش می‌تواند یک ساده‌سازی در جداکردن دو متغیر اصلی یعنی فرکانس و حرارت انجام دهد که خصوصیات ماده ویسکوالاستیک به آن بستگی داشته و این خصوصیات را بر حسب تابع واحد از هرکدام که شکل آنها می‌تواند به طور تجربی تعیین شود بیان نماید. با استفاده از این روش آن دسته از خصوصیات مواد ویسکوالاستیک که وابسته به حرارت می‌باشند، می‌توان با رسم روابط زیر به دست آورد.

$$\begin{cases} G'_T(\omega) = G'_{T_0}(\omega)\rho_0 T_0 / \rho T & \text{بر حسب } \omega\beta_T \\ G''_T(\omega) = G''_{T_0}(\omega)\rho_0 T_0 / \rho T & \text{بر حسب } \omega\beta_T \\ G_T(t) = G_{T_0}(t)\rho_0 T_0 / \rho T & \text{بر حسب } t/\beta_T \end{cases} \quad (13)$$

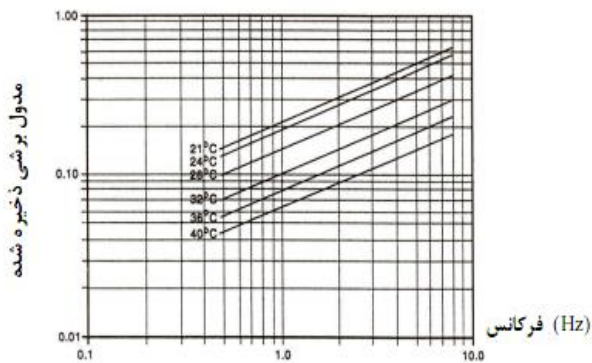
که در آن  $T$  واحد درجه کلونین  $[^{\circ}k]$  دمای محیط مورد نظر،  $T_0$  یک حرارت مرجع انتخابی با واحد درجه کلونین  $[^{\circ}k]$  که اندازه‌گیری‌ها در آن انجام می‌گیرد،  $\rho$  چگالی ماده ویسکوالاستیک،  $\beta_T$  یک ضریب انتقال زمان یا فرکانس که بطور تجربی تعیین می‌شود می‌باشد. ضریب  $P_0 T_0 / P T$  بسیار نزدیک به واحد است در صورتی که  $T$  به طرز قابل ملاحظه‌ای از  $T_0$  متفاوت نباشد. برای همان ماده ویسکوالاستیک آزمایش شده قبلی، تغییرات  $\text{Log}\beta_T$  بر حسب حرارت از 21 درجه سانتی‌گراد تا 40 درجه سانتیگراد در شکل 7 نشان داده شده است. عبارت رگرسیون این رابطه در ازا  $21^{\circ}C < 40^{\circ}C$  یک خط مستقیم است به طوریکه :

$$\log \beta_T = -\frac{0.0561}{T} + 1.218 \quad (14)$$

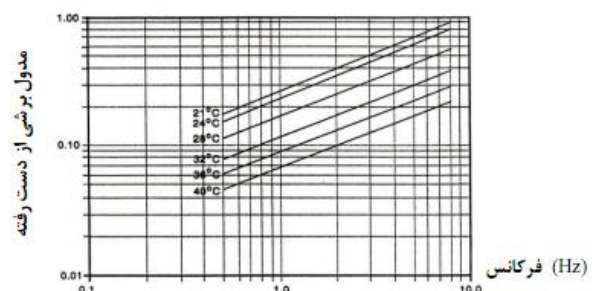


شکل 7: رگرسیون ضریب مقیاس  $\beta_T$

وابستگی  $G'(\omega)$ ،  $G''(\omega)$  بر حرارت محیط می‌تواند با استفاده از معادلات 13 برآورده شود. در مقیاس  $\text{Log-Log}$  شکلهای 8 و 9 نشان می‌دهند که اثر حرارت باعث یک انتقال ساده  $G'(\omega)$ ،  $G''(\omega)$  از محدوده فرکانسی 0/5 هرتز به 8 هرتز شود.



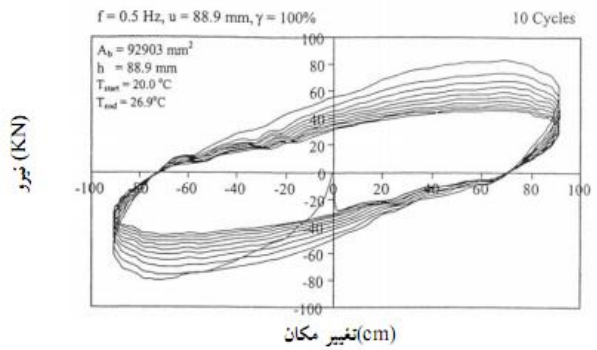
شکل 8. رابطه بین مدول ذخیره برشی با فرکانس



شکل 9. رابطه بین مدول برشی از دست رفته با فرکانس

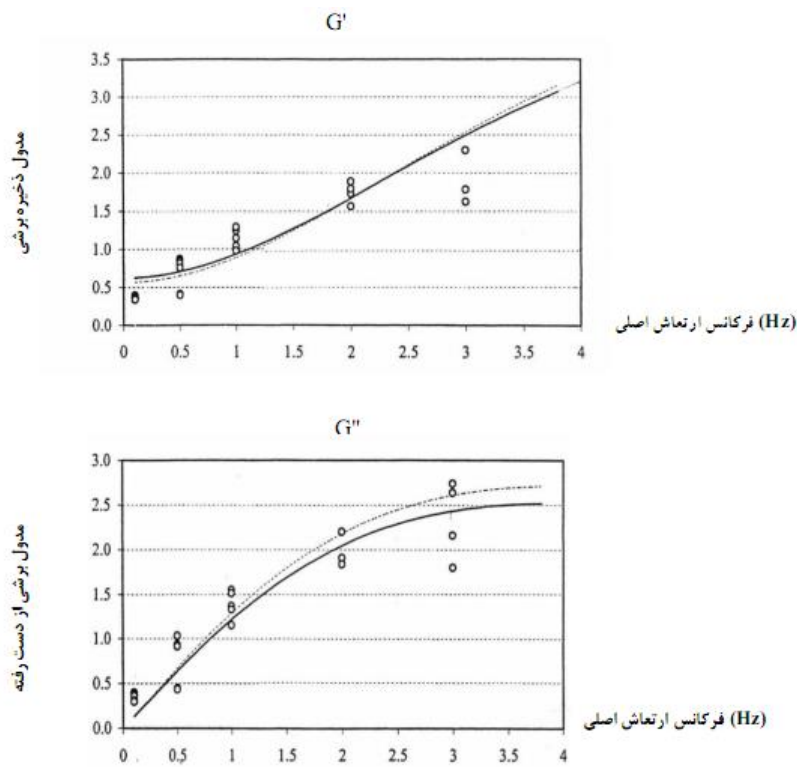
همچنین Zimmer در سال 1999 مطالعات آزمایشگاهی وسیعی را بر روی میراگرهای ویسکوالاستیک با ماده 3MISD110 انجام داد. بطوریکه در اثر تحقیقات انجام یافته بر روی میراگرهای ویسکوالاستیک با ماده 3MISD110 (با سطح مقطع‌های مختلف و ضخامت‌های متنوع) معلوم شد که در اثر افزایش درجه حرارت از 20 درجه سانتی‌گراد الی 26/9 درجه سانتی‌گراد در مدت زمان آزمایش، کاهش اساسی در سختی موثر و انرژی جذب شده در این سیستم طبق شکل 10 به وجود می‌آید.

خواص مواد دارند و محدوده آنها بین 10 الی 50 درجه سانتیگراد و 0/1 الی 3 هرتز می‌باشد. شکل 11 نیز نشان دهنده ارتباط بین داده‌های مدول برشی از دست رفته و مدول ذخیره شده بر حسب فرکانس‌های مختلف ارایه شده از طرف Zimmer در درجه حرارت 20 درجه 2001، همچنین گروه هولمز در ال 2001، تغییرات مدول ذخیره برشی و مدول برشی از دست رفته را بر اساس فرکانس و کرنش برشی بصورت شکل‌های 12 نشان داده‌اند.

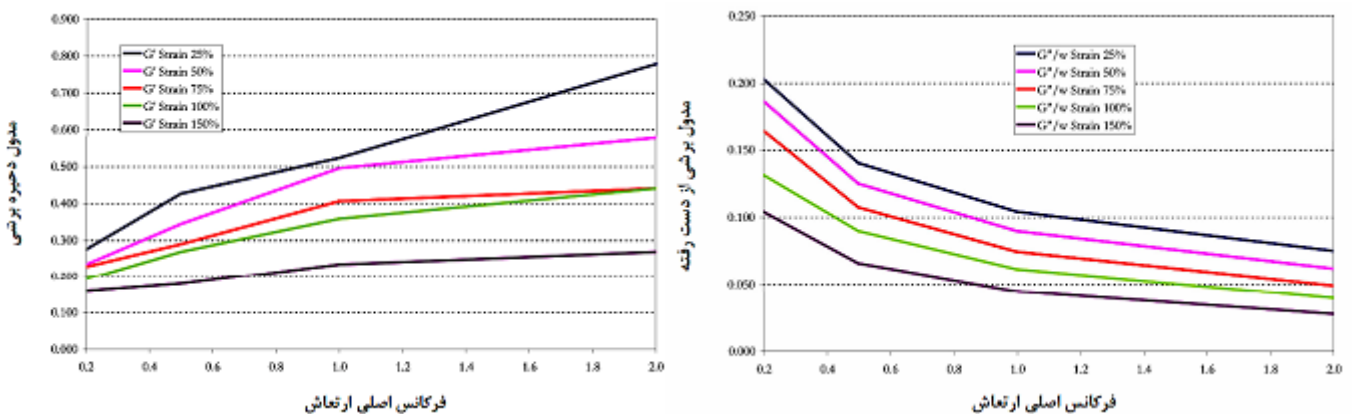


شکل 10. نمونه لوپ نیرو - تغییر مکان

Zimmer بر اساس آزمایشات انجام یافته نتیجه گرفت که کرنش برشی در محدوده 25٪ الی 100٪ نمی‌تواند تاثیر مهمی را بر روی خواص مواد ویسکوالاستیک داشته باشد. در حالی که درجه حرارت و فرکانس، اثرات مهمی را روی

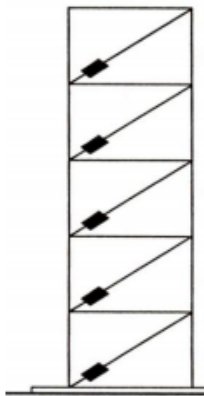


شکل 11. ارتباط بین فرکانس - مدول برشی از دست رفته و مدول ذخیره برشی (Zimmer)



شکل 12. ارتباط بین فرکانس - مدول برشی از دست رفته و مدول ذخیره برشی (Holmezt)

می‌باشد. ضریب موقعیت  $f$  بر اساس نحوه‌ی قرارگیری میراگرهای الحاقی در ساختمان‌ها طبق شکل 14 مقادیر مختلف خواهد داشت.



شکل 13. سازه پنج طبقه با میرایی ناشی از میراگر الحاقی

در سیستم‌های چند درجه آزادی اگر میرایی متناسب فرض شود، معادله حرکت برای جابجایی‌های مودی در این حالت ناهمبسته می‌شوند و اصلاح در میرایی و سختی مودی ناشی از اضافه کردن میراگرهای الحاقی ویسکوالاستیک را می‌توان به وسیله روش انرژی کرنشی مودی انجام داد.

### 3-8- تحلیل سازه‌ها با میراگرهای الحاقی ویسکوالاستیک

بر اساس موضوعات ارائه شده در قسمت‌های قبل اینطور به نظر می‌رسد که در یک حرارت محیطی مفروض و تحت کرنش‌های میانی، تنش در ماده ویسکوالاستیک نسبت به کرنش و نرخ آن تحت حرکت هارمونیک به شکل خطی می‌باشد. برای یک سیستم یک درجه آزادی با الحاق میراگر ویسکوالاستیک رابطه نیرو جابجایی متناظر برای آن چنین است:

$$F(t)_{\text{SDOF}} = K_e(\omega)x(t) + C_e(\omega)\dot{x}(t) \quad (15)$$

$$K_e(\omega) = \frac{A_b G'(\omega)}{h_b}, \quad C_e(\omega) = \frac{A_b G''(\omega)}{\omega h_b} \quad (16)$$

در این رابطه  $A_0$ ، سطح مقطع برشی و  $h_0$ ، ضخامت برشی میراگر ویسکوالاستیک و  $K_e$  و  $C_e$  بترتیب سختی موثر و میرایی ویسکوز موثر بوده و  $F(t)_{\text{SDOF}}$  نیز نیروی متناظر میراگر ویسکوالاستیک می‌باشد. بنابراین بر خلاف میراگرهای فلزی و اصطکاکی، یک سازه خطی با میراگرهای ویسکوالاستیک الحاقی، در عین حالیکه میراگرها به افزایش میرایی و سختی جانبی کمک می‌کنند، سازه همچنان خطی باقی می‌ماند. این خصوصیت، ساده سازی قابل ملاحظه‌ای را در تحلیل سازه‌های میرا شده به شکل ویسکوالاستیکی فراهم می‌کند.

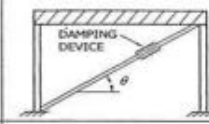
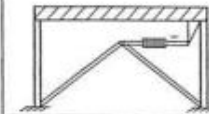
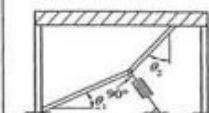
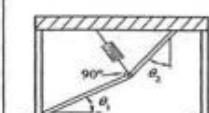
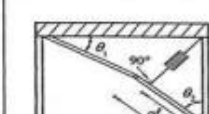
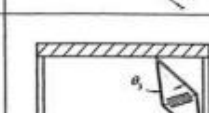
برای یک سازه چند درجه آزادی مطابق شکل 13، که تحت اثر حرکت هارمونیک (با فرکانس  $\omega$ ) قرار گرفته است، نیروی متناظر میراگر بعلاوه اضافه کردن میرایی ناشی از میراگر الحاقی ویسکوالاستیک با سطح مقطع برشی  $A_b$  و ضخامت  $h_b$  برابر است با:

$$F(t) = f[K_e(\omega)x(t) + C_e(\omega)\dot{x}(t)] \quad (17)$$

که در این رابطه  $F(t)_{\text{MDOF}}$  نیروی متناظر میراگر و  $f$  ضریب موقعیت و  $K_e$  سختی موثر و  $C_e$  میرایی موثر

## 10-مراجع

- Soong, T.T. and Dargush, G.F.(1997), "Passive Energy Dissipation Systems in Structural Engineering", John Wiley & Sons Ltd., London (UK) and New York (USA).
- NEHRP, National Earthquake Hazard Reduction Program (1997), "NEHRP.
- Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures", Federal Emergency Management Agency, Report No. FEMA 302, Washington, D.C., to be published.
- Chopra, A.K. (2001), "Dynamics of Structures", Theory and Application to Earthquake Engineering.
- Julio, C.M. (1995), "Passive and Active Control of Structures", Presented for The Degree of Master of Science in Civil Engineering-Earthquake Engineering in Massachusetts Institute of Technology.
- Ashour, S., Hanson R.D. and Scholl R.E. (1993), "Effect of Supplemental Damping on Earthquake Response".
- Aiken, I.D., Nims D.K., Whittaker A.S. and Kelly J.M. (1993), "Testing of Passive Energy Dissipation Systems", EERI, Earthquake Spectra, Volume 9, Number 3.
- Anderson, D.L., Devall, R.H., Lofflor, R.J. and Vutura, C.E. (1999), "Preliminary Guidelines for the Non-Linear Analysis and Design of Hysteretic (Displacement Dependent) Energy Dissipation Devices in Buildings".
- Mahmoodi, P. (1969), "Structural Dampers", ASCE, 95(8), pp.1661-1672.
- Ross, D., Uangar, E.E., and Kerwin, E.W. (1959), "Damping of Plate Flexural Vibrations Means of Viscoelastic Laminar,

Diagonal		$f = \cos \theta$
Chevron		$f = 1.00$
Lower Toggle		$f = \frac{\sin \theta_2}{\cos(\theta_1 + \theta_2)}$
Upper Toggle		$f = \frac{\sin \theta_2}{\cos(\theta_1 + \theta_2)} + \sin \theta_1$
Reverse Toggle		$f = \frac{\alpha \cos \theta_1}{\cos(\theta_1 + \theta_2)} - \cos \theta_2$
Scissor-Jack		$f = \frac{\cos \psi}{\tan \theta_3}$

شکل 14. تعیین ضریب موقعیت f

## 9 - نتیجه گیری

استفاده از سیستم‌های میراگر الحاقی موجب استهلاک مقدار زیادی از انرژی ورودی زلزله می‌شوند و موجب کاستن از پاسخ‌های سازه در برابر زلزله و جلوگیری از تخریب می‌گردد. با توجه به اینکه پاسخ میراگرهای ویسکوالاستیک وابسته به فرکانس تحریکات ورودی است با بکار بردن این میراگرها در سازه، میرایی مودهای بالا بیشتر می‌گردد. از این منظر استفاده از این میراگرها در سازه‌های بلند نسبت به سایر سیستم‌های جاذب انرژی برتری دارد. با افزایش میرایی تا یک حد مشخص پاسخ سازه به نحو مناسبی کاهش یافته و پس از آن افزایش میرایی تاثیر چندانی بر پاسخ سازه ندارد. این حد مشخص بستگی به مشخصات سازه، خصوصاً ارتفاع آن داشته و با افزایش ارتفاع، این مقادیر بهینه کاهش می‌یابند.

Structural Damping", (ed., Ruzicka, E.J.), ASME, NY.

- Morgenthaler, D.R. (1987), "Design and Analysis of Passive Damped Large Space Structures", Role of Damping in Vibration and Noise Control, ASCE, NY, pp.1-8.
- Zhang, R.H., Soong, T.T. and Mahmoodi, P. (1989), "Seismic Response of Steel Frame Structures with Added Viscoelastic Dampers", ASCE, 18(5), pp.389-396.
- Zhang, R.H. Soong, T.T. (1992), "Seismic Design of Viscoelastic Dampers for Structural Application", ASCE, 118(5), pp.1375-1392.
- Chang, K.C., Lai, M.L., Soong, T.T., Hao, D.S. and Yeh, Y.C. (1993a), "Seismic Behavior and Design Guide Lines for Steel Frame Structures with Added Viscoelastic Damper", NCEER 93-0009, National Center for Earthquake Engineering Research, Buffalo, NY.
- Zhang, R.H. and Soong, T.T. (1992), "Seismic Design of Viscoelastic Dampers for Structural Applications", ASCE, 118(5), pp.1375-1392.
- Ferry, J.D. (1980), "Viscoelastic Properties of Polymer", John Wiley, New York, NY.
- Zimmer, M. (2000), "Characterization of Viscoelastic Materials for Use in Seismic Energy Dissipation Systems", Master of Science Thesis, Department of Civil, Structural and Environmental Engineering, University at Buffalo, State University of New York, Buffalo, N.Y.

# Control of Seismic Vibrations of Structures Using Inactive Control Systems

*A. BakhshiPour Sedaposhte, M.Sc. Grad., Civil Engineering Earthquake Orientation,  
Islamic Azad University Shabestar, Shabestar, Iran.*

*E-mail: [arash.bakhshipoor@yahoo.com](mailto:arash.bakhshipoor@yahoo.com)*

## **ABSTRACT**

One of the most important issues in structural engineering is finding ways to reduce the force to structural members of the building. The intense ground vibrations create lateral inertial forces in the structure, which makes the structure oscillate with a range proportional to its input energy. If the large share of this energy is spent on the structural motions, the seismic response will be considerably improved. Therefore, if a large amount of seismic energy can be wasted mechanically, the structure response can also be controlled without structural damage. The use of energy-dampening systems in buildings is responsible for the resilience of structural members during an earthquake and, as a result, prevents damage. One of the new and effective ways of coping with earthquakes is the use of a variety of active and passive dampers in the building industry. In the meantime, the selection of passive dampers is preferable because of low cost and more suitable technology than active dampers and their use in the country.

**Keywords:** Energy Deterioration Systems, Viscoelastic Mirror, Lazy Depletion, Mortality, Structural Velocity