



## توسعه یک میراگر ویسکوز غیر خطی:

### مطالعات آزمایشگاهی و تعیین مشخصات رفتار مکانیکی

حسین پزشکی<sup>۱</sup>، منصور ضیایی<sup>۲</sup>

(دریافت: ۸۹/۴/۲۱، پذیرش: ۸۹/۹/۱۶)

#### چکیده

میراگرهای ویسکوز جزء تجهیزات اتلاف انرژی می‌باشند که در روشهای نوین طراحی لرزه‌ای مورد توجه قرار گرفته‌اند. یکی از چالشهای موجود در مورد این دسته میراگرها وجود آببندهای رزینی و در نتیجه نیاز به بازرسی‌های دوره‌ای می‌باشد. با در نظر گرفتن تکنولوژیهای موجود ساخت قطعات در داخل کشور و ایده‌ی حذف آب‌بند و به تبع آن کاهش و یا حذف بازرسی‌های دوره‌ای، میراگری با استفاده از بخشی از اتصالات آکاردئونی طراحی گردید. نمونه میراگر ساخته شده دارای ظرفیت نیرویی کاربردی، ۲۲۴ کیلونیوتن، و دامنه‌ی تغییر مکانی مناسب، ۶۵ میلیمتر می‌باشد و همچنین رفتار میرایی آن نیز دارای تابع غیرخطی می‌باشد. مشخصه‌های رفتار ذاتی میراگر با استفاده از مدل کلونین تعیین شده است و مقدار میرایی خطی معادل نیز برای آن مورد محاسبه قرار گرفته است.

#### کلمات کلیدی

میراگر ویسکوز، مطالعه آزمایشگاهی، رفتار مکانیکی، مدل کلونین، میرایی خطی معادل

## Development of a Nonlinear Viscous Damper: Experimental Studies and Mechanical Characteristics Determination

Pezeshki.H, Ziyaeifar.M

#### ABSTRACT

Viscous dampers are parts of energy dissipation devices which have received considerable attention in modern seismic design approaches. One of the most important challenges of them is fluid seals which needs maintenance. Considering technologies in Iran and idea of removing seals and so the need of maintenance, a dashpot using some parts of expansion joints was designed. The manufactured dashpot is a practical one, which has appropriate stroke, 65 mm, and efficient capacity, 224 kN, and also displays nonlinear damping behavior. Constitutive law characteristics of the dashpot using Kelvin Model is determined, and also Equivalent Linear Damping is calculated.

#### Keywords

Viscous Dashpot, Experimental Study, Linear & Nonlinear Damping, Kelvin Model, Equivalent Linear Damping

۱. کارشناس ارشد مهندسی زلزله، پژوهشگاه زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله [h.pezeshki@iiees.ac.ir](mailto:h.pezeshki@iiees.ac.ir) (نویسنده مسئول)

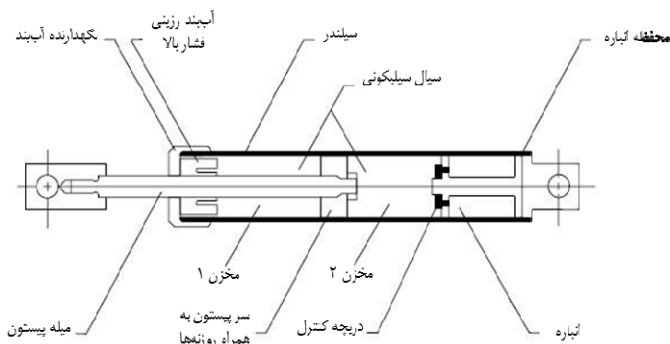
۲. دانشیار پژوهشکده سازه، پژوهشگاه زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله [mansour@iiees.ac.ir](mailto:mansour@iiees.ac.ir)

ساخته شده، طرح اولیه بوده است، دارای ظرفیت نیرویی و همچنین دامنه تغییر مکانی پایینی می‌باشد. رفتار میرایی در این نمونه رفتار خطی است. در ساخت نمونه بعدی، توام با افزایش ظرفیت نیرویی و دامنه تغییر مکانی، رفتار میرایی غیرخطی نیز در این نمونه ایجاد گردیده است.

با توجه به آنکه تحلیل سازه‌هایی که در آنها میراگر نصب شده است، نیاز به مدل‌های ساده‌ای دارد که بیانگر رفتار ذاتی میراگر باشند، مدل کلونین با میرایی غیرخطی و میرایی خطی معادل برای بررسی رفتار میراگر نمونه مورد استفاده قرار گرفته‌اند و مشخصه‌های رفتاری میراگر نمونه بر اساس آنها تعیین شده است.

## ۲- میراگرهای ویسکوز معمول

شکل عمومی میراگرهای ویسکوز سیلندر-پیستونی در شکل (۱) نمایش داده شده است. در انتهای پیستونی که در داخل سیلندر قرار دارد، سرپیستون قرار دارد که داخل سیلندر را به دو مخزن تقسیم می‌کند. با حرکت دو سر میراگر نسبت به همدیگر، پیستون در داخل سیلندر حرکت می‌کند و باعث می‌شود که حجم مخزن‌ها نسبت به یکدیگر تغییر کند، و سیال به اجبار از روزه‌هایی که در میان سرپیستون تعبیه شده است، جابجا می‌شود تا بتواند این تغییر حجم مخازن را جبران کند و این روند، توانایی اتلاف انرژی قابل توجه در میراگرهای ویسکوز را ایجاد می‌کند.



شکل (۱): طرح کلی میراگرهای ویسکوز سیلندر-پیستونی [۷]

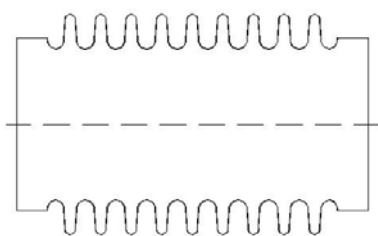
طراحی معمول سازه‌ها بر مبنای ظرفیت رفتار غیرالاستیک و اتلاف انرژی از طریق رفتار هیستریزس و تحمل خسارت در اجزای آن می‌باشد، در این حالت، عموم اجزای آسیب دیده، پس از زمین‌لرزه قابل تعویض نمی‌باشند. در روش‌های نوین طراحی لرزه‌ای، دو دیدگاه کلی برای مقابله با انرژی زمین‌لرزه وجود دارد. دیدگاه اول، شامل روش‌هایی است که باعث کاهش نیروی وارد به سازه با استفاده از جداساختن سازه از ارتعاش زمین می‌شوند که سیستم‌های جداسازی پایه در این دسته قرار می‌گیرند. در دیدگاه دوم، جایگزین ساختن تجهیزات میرایی برای اتلاف انرژی لرزه‌ای مینا می‌باشد که این تجهیزات از طریق اتلاف بخش عمده‌ای از انرژی زمین‌لرزه، باعث کاهش خسارات اجزای سازه‌ای ناشی از رفتار غیرالاستیک می‌شوند [۱،۲].

تجهیزات اتلاف انرژی مختلفی، نظیر میراگرهای اصطکاکی، میراگرهای ویسکوالاستیک و میراگرهای ویسکوز سیال، معرفی شده‌اند. میراگرهای ویسکوز از میان این تجهیزات، با توجه به اندازه و ظرفیت اتلاف انرژی بالا بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند [۳].

از جمله میراگرهای ویسکوز سیال معمول، میراگرهای سیلندر-پیستونی می‌باشند. در این نوع میراگرها وجود آببند رزینی باعث لزوم انجام بازدیدهای دوره‌ای در فواصل زمانی معینی می‌گردد، با توجه به اینکه در سازه‌ها به طور معمول تعداد بسیاری از این میراگرها مورد استفاده قرار می‌گیرند، بازدیدهای دوره‌ای مستلزم صرف هزینه و زمان زیادی می‌باشد. با مد نظر قرار دادن این موضوع، ایده‌ی حذف آببندهای رزینی در این دسته میراگرها مطرح گردید و سعی شد که میراگری فاقد آببند رزینی و بدون نیاز به بازرسی‌های دوره‌ای توسعه یابند [۴].

در همین راستا نمونه‌ی اولیه‌ی میراگر پیشنهادی طی مطالعه‌ی فروغی‌کیا و ضیایی‌فر [۵] ساخته شد و مورد بررسی قرار گرفت. این میراگر با توجه به آنکه نمونه‌ی

برای اینکار، از قسمتی از اتصال آکاردئونی (Expansion Joint)، تحت عنوان بلاوز (Bellows) بهره گرفته شده است (شکل ۲). اتصالات آکاردئونی، تجهیزات آب‌بندی می‌باشند که دارای قابلیت انعطاف‌پذیری بوده و بلاوز، قسمت اصلی آنها می‌باشد که از جنس فلز (به طور معمول استیل ضدزنگ) ساخته شده است و خاصیت انعطاف‌پذیری به صورت طولی، عرضی (خارج از محور) و زاویه‌ای دارد. این خاصیت انعطاف‌پذیری گاهی ممکن است مخرب باشد، بنابراین برای هر مورد خاص و مشخص متناسب با نیاز، انعطاف‌پذیری باید محدود شود.



شکل (۲): برش بلاوز، بخشی از اتصال آکاردئونی

تحمل درجه حرارت و فشار از ویژگیهای اصلی اتصالات آکاردئونی می‌باشد و خاصیت انعطاف‌پذیری، این اتصالات در صنایع مختلفی نظیر آب، نفت، گاز، نیروگاه‌ها و ... کاربرد گسترده‌ای دارند. در مورد کاربرد بلاوزها در میراگر، هدف عمده، بهره‌گیری از قابلیت انعطاف محوری آنها بوده است. همچنین قابلیت تولید بلاوزها در قطرهای مختلف، امکان دستیابی به ظرفیت‌های نیرویی متنوعی را فراهم می‌آورد. برای ایجاد دو مخزن مجزا، از دو بلاوز استفاده می‌شود که در میان آنها صفحه‌ای فولادی قرار دارد و میله‌ای نیز به دو صفحه‌ی فولادی قرارگرفته در دو انتهای بلاوزها وصل می‌شود. این میله در داخل نیز از میان صفحه‌ی فولادی عبور کرده است و فقط نسبت به صفحه‌ی میانی حرکت نسبی دارد. نحوه قرارگیری و اتصال میله به صفحات باعث می‌شود که دو مخزن مجزا با قابلیت تغییرشکل بوجود آید و در نتیجه آن، نیاز به

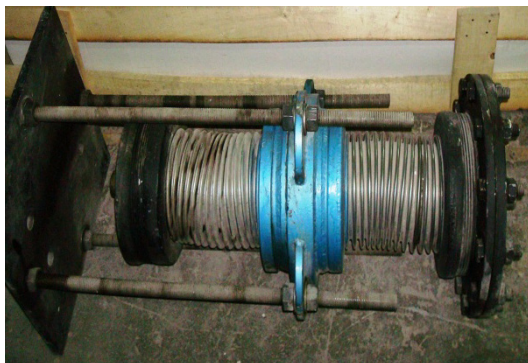
میراگرهای ویسکوز، اولین بار در سالهای ۱۹۶۰ تولید شده و در کنترل غیر فعال بکار رفته‌اند. روزنه‌های این میراگرها می‌توانند به گونه‌ای مشخص در بازه‌ی گوناگونی از توابع میرایی طراحی شوند. فشار عملکردی آنها نیز بین ۱۳۷ تا ۶۹۰ بار می‌باشد. به حداقل رساندن تغییرات ویسکوزیته سیال، باعث تثبیت عملکرد آنها می‌شود و در این نوع میراگرها، نتیجه چندان از دما و نوع سیال تاثیر نمی‌پذیرد. میراگرهای ویسکوز، به عنوان ابزار اتلاف انرژی لرزه‌ای کاربرد داشته‌اند و قابل درک است که با توجه به تغییرات پتانسیل تحریک ورودی، تناسب خطی نیروی میراگر با سرعت قابل قبول نیست. خروجی میراگرهای سیال را می‌توان به فرم خطی تنظیم کرد، اما به طور معمول، توان سرعت در تابع میرایی، بین ۰/۴ تا ۰/۷، عملکرد لرزه‌ای بهتری نسبت به حالت خطی دارد [۶].

در این نوع میراگرها با توجه به حرکت نسبی میله نسبت به پیستون، در محل خروج پیستون از سیلندر نیاز بوجود آب‌بند می‌باشد، تا بتوان از اتلاف سیال داخل سیلندر جلوگیری کرد، برای اینکار لازم است که این آب‌بند، توانایی تحمل فشارهای بالا را داشته باشد و به مرور زمان کارایی خود را از دست ندهد و همچنین باید دقت بسیاری در ساخت وجود داشته باشد تا بتوان کارایی این قطعه را تضمین کرد. این نکته چالشی در مورد میراگرهای سیلندر پیستونی می‌باشد. وجود این قطعه نیاز به بازرسی‌های دوره‌ای را بوجود می‌آورد.

### ۳- میراگر پیشنهادی

حرکت میله‌ی پیستون نسبت به سیلندر نیاز به استفاده از آب‌بند را ایجاد می‌کند، پس با حذف حرکت نسبی قطعات می‌توان نیاز به آب‌بند را از بین برد. با جایگزینی مخازنی که قادر به تغییرشکل فیزیکی باشند، می‌توان به ایده‌ی حذف آب‌بند و در نتیجه، کاهش و یا حذف بازرسی‌های دوره‌ای دست یافت.

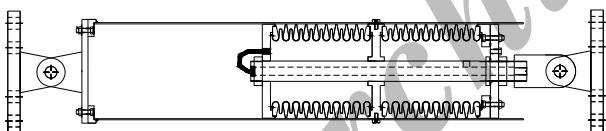
دو بخش میراگر به جای غلاف، با استفاده از ۴ میله می‌باشد. قطر نمونه نیز برابر ۴۰۰ میلیمتر می‌باشد.



شکل (۴): نمونه‌ی اولیه ساخته شده میراگر ویسکوز [۵]

در طرح نمونه‌ی بعدی، با افزودن حلقه‌های محیطی به بلاوزها، ظرفیت تحمل فشار آنها افزایش یافته است و با استفاده از شیارهای پله‌ای رفتار غیرخطی در میراگر ایجاد شده است و همچنین به جای میله‌های فولادی از غلافی فلزی استفاده شده است که ضمن احتمال کاهش کمانش، دارای نقش هدایت کننده حرکت نیز می‌باشد.

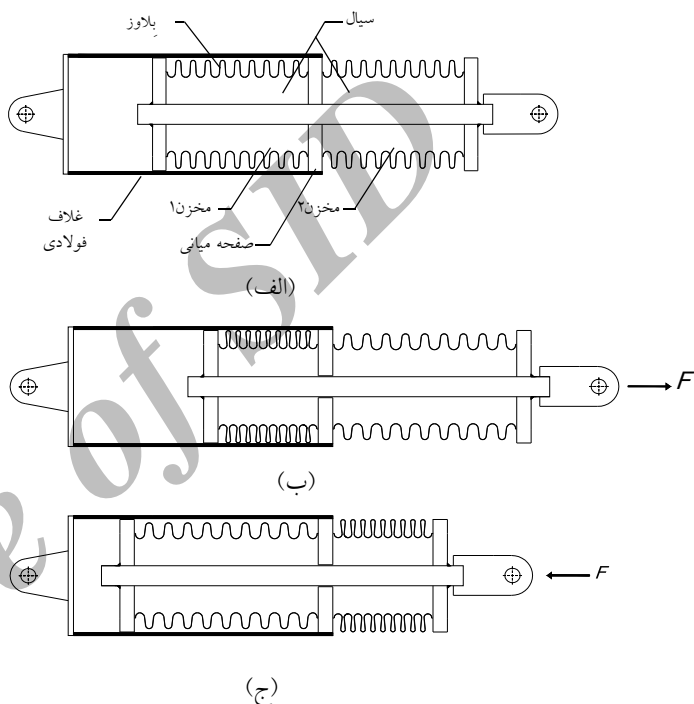
در شکل (۵) طرح نمونه میراگر ساخته شده ارایه شده است. اتصال دو انتهای میراگر نیز بگونه‌ی مفصلی طراحی شده‌اند و توانایی دوران در یک صفحه را دارا می‌باشند.



شکل (۵): طرح نمونه میراگر ساخته شده [۴]

میراگر ساخته شده در شکل (۶) به نمایش گذارده شده است. میراگر دارای دامنه‌ی تغییر مکانی ۶۵ میلیمتر می‌باشد. قطر نمونه نیز برابر ۲۴۰ میلیمتر می‌باشد.

آب‌بند از بین می‌رود. برای انتقال نیرو نیز، غلاف فلزی از یک‌طرف به صفحه فلزی و از طرف دیگر به تکیه‌گاه متصل می‌شود و که این غلاف نیرو را از صفحه‌ی میانی به تکیه‌گاه انتقال می‌دهد. در شکل (۳)-الف طرح کلی میراگر و اجزا آن ارایه شده است و همچنین در اشکال (۳)-ب و ج نیز عملکرد آن، در حالت‌های تحت فشار و کشش و نحوه‌ی جابجایی سیال بین دو مخزن در این دو حالت نشان داده شده است.



شکل (۳): (الف) طرح کلی میراگر پیشنهادی و اجزا آن، عملکرد میراگر پیشنهادی، (ب) تحت کشش و (ج) تحت فشار

نمونه‌ی اولیه طی مطالعه‌ی فروغی کیا و ضیایی فر [۵] ساخته شده است (شکل ۴). با توجه به آنکه در کاربردهای عمومی اتصالات آکاردئونی در صنایع، اجازه‌ی ایجاد فشارهای بیش از ۱۰ الی ۲۰ بار را نمی‌دهند، نمونه‌ی ساخته شده دارای ظرفیت نیرویی پایین، در حدود ۵۰ کیلونیوتن می‌باشد و دامنه‌ی تغییر مکانی آن نیز برابر ۳۰ میلیمتر است. رفتار نمونه اولیه به صورت خطی می‌باشد. همچنین انتقال نیرو بین

جدول (۱): مشخصات بارگذاری‌های اعمال شده

فرکانس بارگذاری (هرتز)	تعداد چرخه	دامنه (میلیمتر)	ردیف
۰/۳۳۳	۳	۵۰/۶۷	۱
۰/۵	۳	۴۲/۵۲	۲
۰/۸	۳	۳۱/۰۶	۳
۱/۰۰	۳	۳۰/۲۵	۴
۱/۱۱۱۱	۳	۲۷/۶۲	۵
۱/۳۳۳	۳	۲۴/۱۱	۶

پس از انجام مراحل مختلف آزمایش‌های مقدماتی، پیکربندی نهایی آزمایش در قاب عکس‌العمل قرار داده شد که نحوه‌ی قرارگیری در شکل (۷) نمایش داده شده است. برای اعمال بارگذاری از جک محرک ۲۵۰ کیلونیوتنی مورد استفاده قرار گرفته است.



شکل (۷): پیکربندی آزمایش در مرحله‌ی نهایی [۴]

#### ۶- مدل‌های رفتاری

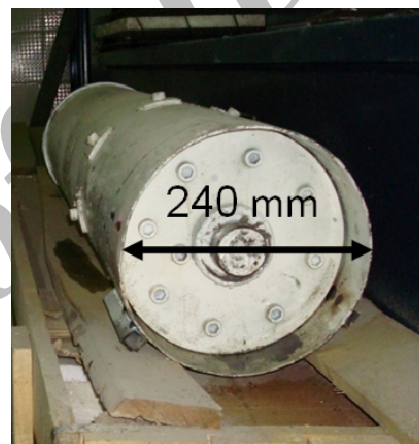
نیروی میرایی حاصل از میراگر را برابر توانی از سرعت  $\alpha$ ، ضربدر ضریب میرایی  $C$ ، در نظر می‌گیرند؛

$$F_d = C\dot{u}^\alpha \quad (1)$$

در رابطه (۱)، اگر توان سرعت  $\alpha$ ، برابر یک باشد، نیروی میرایی دارای تابع خطی و در غیر اینصورت دارای تابعی غیرخطی می‌باشد و به اصطلاح این دو حالت را میرایی خطی و میرایی غیرخطی می‌نامند. توان سرعت در

#### ۴- الگوی بارگذاری و پیکربندی آزمایش

الگوی بارگذاری آزمایش‌ها به صورت کنترل تغییرمکانی و تحریک سینوسی در دامنه و فرکانس‌های مختلف می‌باشد. با توجه به محدودیت‌های موجود در شرایط بارگذاری، دامنه‌ی حداکثر آزمایش‌ها ۵۵ میلیمتر انتخاب شده است. در ابتدا برای بررسی وجود اصطکاک بین قطعات، آزمایشی با سرعت بسیار پایین در مدت زمان ۱۰۰ ثانیه برای هر چرخه انجام شده است، که در این آزمایش، ویسکوزیته تحریک نمی‌شود و فقط نیروهای مرتبط با تغییرمکان تحریک خواهند شد.

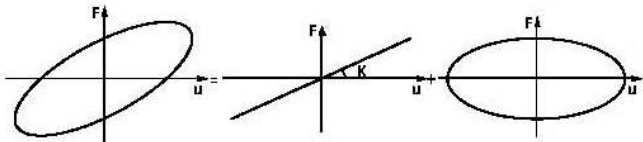


شکل (۶): نمونه‌ی ساخته شده [۴]

سپس، نمونه تحت فرکانس‌های بارگذاری مختلفی قرار گرفته است و پاسخ‌ها ثبت شده‌اند. با توجه به ضعف جک محرک دامنه‌های اعمالی با دامنه‌ی مورد نظر متفاوت می‌باشند، مشخصات بارگذاری اعمال شده بر نمونه که توسط دستگاه ثبت شده، در جدول (۱) ارائه شده‌اند. آزمایش‌ها بگونه‌ای تنظیم شده‌اند که نمونه، فرکانس‌های مختلفی را تجربه کند و پاسخ‌ها در حالات مختلف مورد بررسی قرار گیرد.

به علت موازی قرار گرفتن فنر و میراگر، نیروی کل برابر با جمع نیروی میرایی و نیروی سختی فنر می‌باشد. شکل (۹) نشان‌دهنده‌ی تاثیر سختی و میرایی بر نیروی کل می‌باشد.

$$F = F_s + F_d \Rightarrow F = Ku + C\dot{u}^\alpha \quad (۳)$$



شکل (۹): (الف) مدل رفتار کلوین، (ب) مولفه‌ی سختی خطی خالص، (ج) مولفه‌ی میرایی خالص

نتایج حاصل از آزمایش‌های چرخه‌ای، به صورت منحنی‌های هیستریزس نیرو-تغییر مکان ترسیم می‌شوند که سطح زیر این منحنی‌ها نشانگر میزان انرژی اتلافی می‌باشد. یکی از روشهای معمول که بیشتر در مورد منحنی‌های هیستریزس که ناشی از میرایی ویسکوز خطی نباشد، مورد استفاده قرار می‌گیرد، محاسبه‌ی ضریب میرایی ویسکوز معادل می‌باشد. این ضریب با فرض میرایی خطی محاسبه می‌شود که در دامنه‌ی حرکتی برابر، اتلاف انرژی یکسانی با منحنی موجود داشته باشد. بر مبنای این فرض، این ضریب را می‌توان از رابطه (۴) محاسبه کرد [۱۰]:

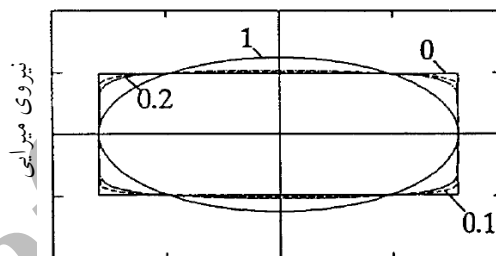
$$C_{eq} = \frac{W_D}{\pi \cdot \omega u_0^2} \quad (۴)$$

$W_D$ ، مساحت زیر منحنی هیستریزس،  $\omega$ ، فرکانس بارگذاری و  $u_0$ ، دامنه‌ی بارگذاری می‌باشد. در ادامه بر اساس نتایج آزمایش‌های انجام شده، ضریب میرایی معادل محاسبه می‌شود.

#### ۷- بررسی رفتاری مکانیکی میراگر پیشنهادی

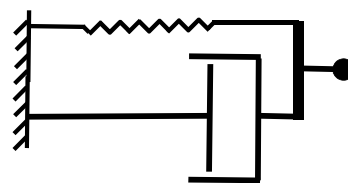
نمونه‌ی نتایج ثبت شده در آزمایش در نمودار (۲) ارائه شده است، همانگونه که مشخص است، چرخه‌ی نخست و چرخه‌ی پایانی نسبت به دیگر چرخه‌ها متفاوت می‌باشد و فقط چرخه‌ی میانی به طور کامل

میرایی غیرخطی به طور معمول، بین ۰/۱ تا ۲/۰ می‌باشد. مقدار انتخابی این عدد وابسته به کاربرد آن می‌باشد. برای کاربرد لرزه‌ای عددی کمتر از یک مناسب می‌باشد [۷]. مزیت اصلی استفاده از توانهای پایین سرعت در تابع میرایی آن است که باعث محدود شدن پیک نیروهای میرایی در مقادیر پایین و در نتیجه، کاهش مقادیر برش پایه سازه می‌شود. در مقابل، استفاده از میراگر با تابع میرایی خطی، در مقام مقایسه، تا حدودی باعث کاهش اثر میرایی و همچنین افزایش نیروها می‌شود [۸]. اثر تغییر توان سرعت بر منحنی نیرو-جابجایی در نمودار زیر مشخص است.



تغییر مکان

نمودار (۱): اثر تغییر توان سرعت بر منحنی نیرو-جابجایی [۹]  
رفتار میراگرهای ویسکوز را می‌توان با استفاده از مدل کلوین بررسی نمود. مدل کلوین از یک میراگر خالص و فنر خالص به صورت سری تشکیل شده است و میرایی می‌تواند به صورت خطی و یا غیرخطی باشد.

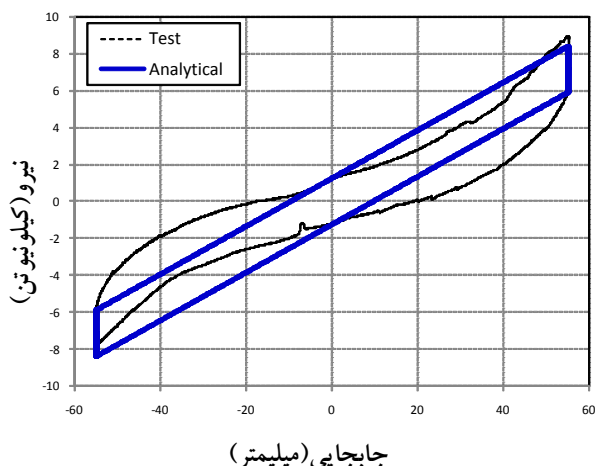


شکل (۸): مدل رفتاری کلوین

در مدل رفتاری کلوین جابجایی دو سر میراگر و فنر یکسان می‌باشد، می‌توان نیرویی میرایی  $F_d$  و نیروی فنر  $F_s$  را از رابطه (۲) بدست آورد.

$$\begin{cases} F_s = K \times u \\ F_d = C \times \dot{u}^\alpha \end{cases} \quad (۲)$$





نمودار (۳): مقایسه نتایج آزمایش و تحلیل، منحنی نیرو-تغییر مکان میراگر، فرکانس ۰/۰۱ هرتز- آزمایش اصطکاکی

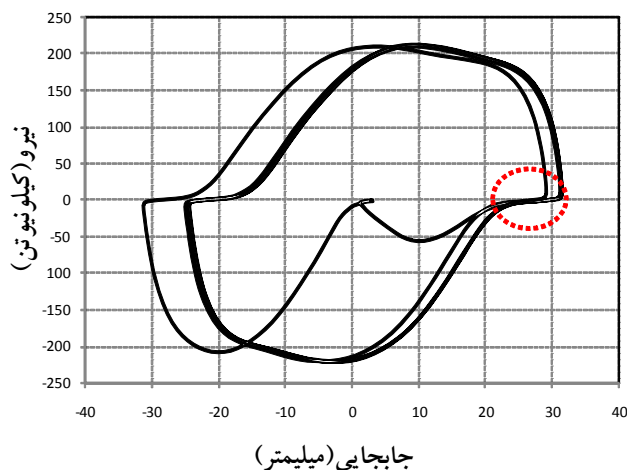
در نمودار (۲) بخشی از نمودار در حداکثر تغییر مکان توسط منحنی خطچینی مشخص شده است، بررسی‌ها نشان می‌دهد که وجود چنین بخشی دارای دو علت می‌باشد، اول، وجود مقدار عمده‌ای حباب هوا و دوم، تغییر حجم بلاوزها به علت افزایش فشار سیال. نحوه‌ی رخداد این تغییر حجم در شکل (۱۰) نمایش داده شده‌است. خطچین‌ها نمایانگر شکل بلاوز در فشار پایین و خطوط پیوسته نیز نمایانگر شکل بلاوز در فشارهای بالا می‌باشند.



شکل (۱۰): تغییر حجم بلاوز تحت اثر فشار سیال

برای مدل کردن این بخش منحنی در مدل کلونین، فرض می‌شود در هنگام تغییر جهت حرکت ابتدا فنری با سختی بسیار پایین درگیر می‌شود که پس از حدود ۱۰ میلیمتر تغییر مکان، فنر کاملاً بسته و یا باز می‌شود و در ادامه فنر و میراگر مدل کلونین بکار می‌افتند. در نهایت اجزای درگیر در رفتار میراگر نمونه در شکل (۱۱) نشان داده شده‌اند.

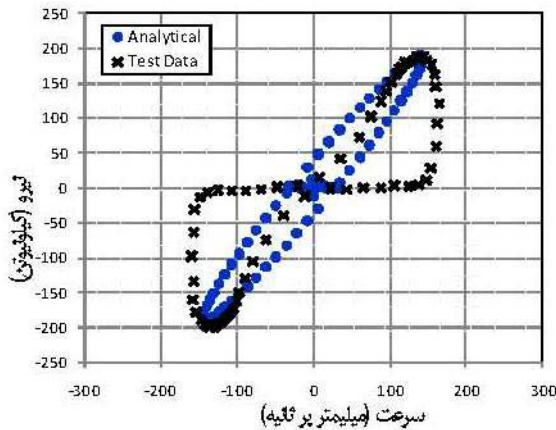
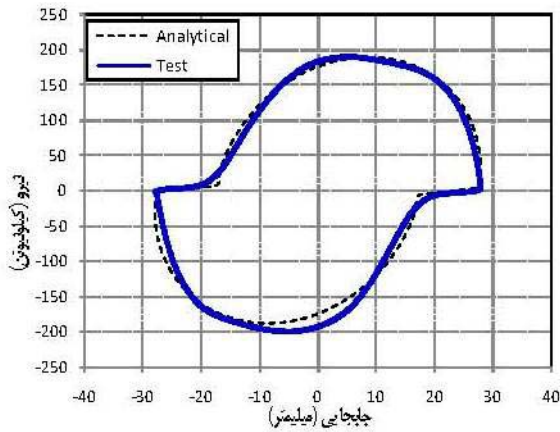
اعمال شده است. بنابراین، برای بررسی آزمایش‌ها فقط از چرخه‌ی میانی بهره گرفته می‌شود.



نمودار (۲): منحنی نیرو-جابجایی حاصل از آزمایش در فرکانس ۱/۱۱۱ هرتز

نخستین گام، آزمایش اصطکاکی بود که چرخه‌ی بارگذاری سینوسی طی یکصد ثانیه طی شده است و به علت آنکه سرعت بارگذاری بسیار پایین می‌باشد، نباید رفتار ناشی از ویسکوزیته در میراگر دیده شود. در این حالت، در صورت وجود اصطکاک در سیستم، مشاهده خواهد شد.

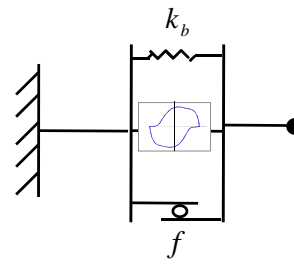
منحنی رفتاری در نمودار (۳) ارایه شده است و همانگونه که مشخص است، در منحنی دو نوع رفتار دیده می‌شود، رفتار اصطکاکی که باعث می‌شود منحنی رفت و منحنی برگشت با یکدیگر اختلاف داشته باشند، همچنین نیرویی هم‌فاز با تغییر مکان وجود دارد که ناشی از فنریت بلاوزها می‌باشد. مقدار نیرو در تغییر مکان صفر، در کشش و فشار در چرخه‌های مختلف به طور متوسط برابر ۱/۲۵ کیلونیوتن می‌باشد. رفتار فنری به صورت غیرخطی می‌باشد که برای ساده‌سازی، ضریب فنریتی خطی و ثابت در نظر گرفته می‌شود. با استفاده از مقدار ضریب ۰/۱۳ کیلونیوتن بر میلیمتر، منحنی رفتاری مدل‌سازی شده حاصل از اصطکاک و فنریت بلاوز نیز در نمودار رسم شده است.



نمودار (۴): نمودار نیرو-جابجایی و نمودار نیرو-سرعت، آزمایش ۱ هرتز

جدول (۲): نتایج مدلسازی با استفاده از مدل کلونین

ردیف	مدل کلونین				
	D (mm)	f (cycle/sec)	$\alpha$	C (N.sec/mm)	K(N/mm)
۱	۵۰/۶۷	۰/۳۳۳	۰/۹۳	۱۹۲۰	۲۵۰
۲	۴۲/۵۲	۰/۵	۰/۹۳	۱۸۸۰	۵۰۰
۳	۳۱/۰۶	۰/۸	۰/۹۳	۱۸۳۰	۱۰۰۰
۴	۳۰/۲۵	۱/۰۰	۰/۹۳	۱۸۰۰	۱۴۰۰
۵	۲۷/۶۲	۱/۱۱۱۱	۰/۹۳	۱۸۰۵	۱۶۰۰
۶	۲۴/۱۱	۱/۳۳۳	۰/۹۳	۱۸۰۰	۲۰۵۰



شکل (۱۱): مدلسازی میراگر نمونه و اجزای آن

سختی بلاوزها و  $f$  نیروی اصطکاک بین قطعات می باشد که قبل تر محاسبه شده اند. سختی بلاوز به صورت موازی با هسته می راکر قرار دارد، چرا که تغییر مکان آن با تغییر مکان هسته می راکر یکسان می باشد.

با در نظر گرفتن این توضیحات آزمایش ها توسط مدل کلونین مدلسازی شده اند و نمونه ای از نتایج این مدلسازی در نمودار (۴) برای فرکانس ۱ هرتز ارائه شده اند و نتایج حاصل برای تمامی آزمایش ها در جدول (۲) ذکر شده اند. برای تمامی آزمایش ها در سرعت در تابع نیروی میرایی میراگر خالص برابر  $۰/۹۳$  انتخاب شده است که با توجه به لزوم همخوانی نمودار تحلیلی و نمودار حاصل از آزمایش نزدیک ترین مقدار می باشد.

همانگونه که در نمودار (۴) مشخص است، منحنی تحلیلی و منحنی حاصل از آزمایش اختلاف دارند، این اختلاف مرتبط به تغییر حجم رخ داده در بلاوزها است که بوسیله فزنی با سختی پایین مدل گردید.

همانگونه که در جدول (۲) مشخص است، مقادیر مشخصه در آزمایش های مختلف متفاوت می باشد، بنابراین در نمودار (۵) نیز مقادیر ضریب سختی و ضریب میرایی مدل کلونین در برابر فرکانس بارگذاری ترسیم شده اند و مشاهده می شود که میرایی با افزایش فرکانس بارگذاری کاهش و در مقابل ضریب سختی افزایش می یابد. مشابه این نتیجه در مطالعات محققین مختلفی [۱۱-۱۳] نیز بیان شده است.



## ۸- نتیجه گیری

نمونه میراگر ساخته شده، در طی آزمایش‌ها به حداکثر نیروی ۲۲۴ کیلونیوتن رسید که مقداری قابل توجه و کاربردی برای میراگرهای ویسکوز می‌باشد و همچنین رفتار غیرخطی نیز در آن تا حدودی بدست آمده است.

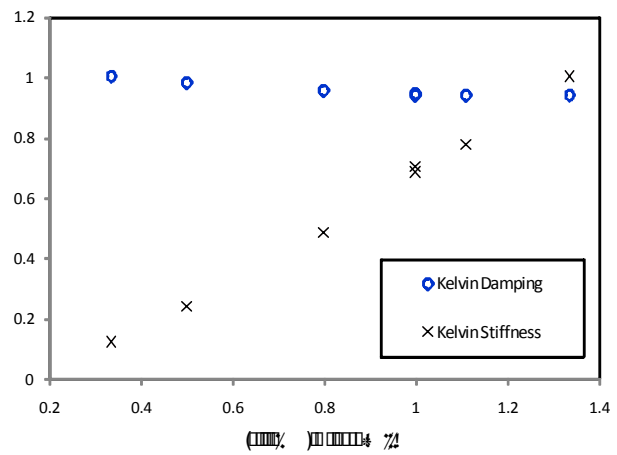
همچنین با توجه به نحوه طراحی آن، نیاز به ساخت قطعات با دقت بسیار بالا نمی‌باشد و همچنین در عمل در صورتیکه سیال درون میراگر به مرور زمان دچار تغییر نشود، نیاز به انجام بازرسی‌های دوره‌ای از بین می‌رود چرا که قطعه‌ای پلاستیکی و رزینی وجود ندارد و آببندی مخازن آن بوسیله جوش بین قطعات حاصل شده است.

در بررسی‌ها نشان داده شد که مشخصه‌های رفتاری میراگر در برابر فرکانس بارگذاری تغییر می‌کنند و در نهایت مقداری متوسط ارایه گردید. چنین به نظر می‌رسد که به جای استفاده از مقدار میانگین به عنوان نماینده‌ی رفتار میراگر در تمامی حالات، مشخصه‌های رفتاری نزدیک به فرکانسی که میراگر در عمل بکار می‌رود، مورد استفاده قرار گیرند و یا اینکه برای آن فرکانس بارگذاری، آزمایش خاصی انجام شود و مشخصه‌های رفتاری تعیین شده، مورد استفاده قرار گیرند.

طی این مطالعه میراگری غیرخطی به صوت نمونه‌ای کاربردی ساخته شده و امید آن است که با توسعه‌ی این میراگر، بخشی از نیازهای کاربردی جامعه‌ی مهندسی کشور به تجهیزات اتلاف انرژی مرتفع گردد.

## تشکر و قدردانی

موفین کمال تشکر و قدردانی خود را از شرکت ارتعاش میلاد بابت ساخت نمونه میراگر و همچنین از مجموعه‌ی آزمایشگاه سازه پژوهشگاه زلزله شناسی و مهندسی زلزله که در مراحل مختلف آزمایش یاری‌رسان بوده‌اند، ابراز می‌دارند.



نمودار (۵): ضریب سختی و میرایی مدل کلونین در برابر فرکانس

جدول (۳): نتایج مدل‌سازی با استفاده از میرایی معادل

ردیف	آزمایش		میرایی معادل	
	D (mm)	f (cycle/sec)	$W_D$ (kN.mm)	$C_{eq}$ (N.sec/mm)
۱	۵۰/۶۷	۰/۳۳۳	۱۸۸۷۸	۱۱۱۸
۲	۴۲/۵۲	۰/۵	۱۹۴۲۹	۱۰۸۹
۳	۳۱/۰۶	۰/۸	۱۳۹۴۸	۹۱۶
۴	۳۰/۲۵	۱/۰۰	۱۵۷۱۲	۸۷۰
۵	۲۷/۶۲	۱/۱۱۱۱	۱۴۱۱۶	۸۴۳
۶	۲۴/۱۱	۱/۳۳۳	۱۲۱۸۷	۷۹۷

در جدول (۳) مقادیر ضریب میرایی معادل محاسبه شده برای آزمایش‌های مختلف ارایه شده است. نتایج این معادل‌سازی نیز نشان‌دهنده‌ی تغییر مقادیر میرایی در برابر فرکانس بارگذاری می‌باشد.

میانگین نتایج مدل‌سازی توسط این دو روش در جدول (۴) ذکر شده‌اند. باید دقت داشت که در استفاده از مدل کلونین باید فنر اولیه را جداگانه مد نظر قرار داد ولی در استفاده از میرایی معادل نیازی به اینکار نیست.

جدول (۴): میانگین نتایج مدل‌سازی

مدل کلونین	میرایی معادل	
	C (N.sec/mm)	k(N/mm)
	۱۸۳۵/۰	۱۱۷۸/۶
۰/۹۳	۹۲۶/۳	

10. Craig, Jr., R.R., Kurdila, A.J., 'Fundamentals of Structural Dynamics', John Wiley & Sons; [2006]

11. Constantinou, M.C., Symans, M.D., 'Experimental and Analytical Investigation of Seismic Response of Structures with Supplemental Fluid Viscous Damper', Technical Report NCEER-92-0032; [1992]

12. Sleemah, A.A., Constantinou, M.C., 'Investigation of Seismic Response of Buildings with Linear and Nonlinear Fluid Viscous Dampers', Technical Report NCEER-97-0004; [1997]

13. Yun, H.-B., Tasbighoo, F., Masri, S.F., Caffrey, J.P., Wolfe, R.W., Makris, N., Black, C., 'Comparison of Modeling Approaches for Full-scale Nonlinear Viscous Dampers', Journal of Vibration and Control, Vol.14, No.1-2, pp.51-67; [2008]

1. Skinner, R.I., Robinson, W.H., McVerry, G.H. "An Introduction to Seismic Isolation", J.Wiley & Sons, London.; [1993]

2. Soong, T.T. and Dargush, G.F. "Passive Energy Dissipation Systems in Structural Engineering", J. Wiley & Sons, London; [1997]

3. Burton, S.A., Konstantopoulos, I.K., Makris, N., Antsaklis, P.J., 'Modeling the Response of a Fluid Damper: Constitutive Model and Neural Networks', in: Proceedings of 3<sup>rd</sup> IEEE Mediterranean Symposium on New Directions in Control and Automation, Vol.2, pp.375-379; [1995]

۴. پزشکی، ح.، "مطالعات آزمایشگاهی بر روی یک میراگر ویسکوز غیرخطی کنترل‌پذیر برای سازه‌های جداسازی شده پایه در حوزه‌ی نزدیک"، پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد، پژوهشگاه زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله؛ [۱۳۸۸]

۵. فروغی‌کیا، ب.، "پیشنهاد، ساخت و آزمایش یک میراگر ویسکوز کنترل‌پذیر با مشخصه‌های نوین"، پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد، پژوهشگاه زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله؛ [۱۳۸۵]

6. Taylor, D.P., Constantinou, M.C., 'Test Methodology and Procedures for Fluid Viscous Dampers Used in Structures to Dissipate Seismic Energy', Technical Report, Taylor Devices; [1994]

7. Housner, G.W., Bergman, L.A., Caughey, T.K., Chasssiakos, A.G., Claus, R.O., Masri, S.F., Skelton, R.E., Soong, T.T., Spencer, B.F., Yao, J.T.P., 'Structural Control: Past, Present, and Future', Journal of Engineering Mechanics, Vol.123, No.9, pp. 897-971; [1997]

8. Symans, M.D., Charney, F.A., Whittaker, A.S., Constantinou, M.C., Kircher, C.A., Johnson, M.W., McNamara, R.J., 'Energy Dissipation Systems for Seismic Applications: Current Practice and Recent Developments', Journal of Structural Engineering, Vol.134, No.1, pp.3-21; [2008]

9. Terenzi, G., 'Dynamics of SDOF Systems with Nonlinear Viscous Damping', Journal of Engineering Mechanics, Vol.125, No.8, pp.956-963; [1999]

