

## کاربرد جداسازهای سربی - لاستیکی به عنوان میراگرهای برشی

حبیب سعیدمنیر\*<sup>۱</sup> و کیوان زینالی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> استادیار گروه عمران دانشکده فنی، دانشگاه ارومیه

<sup>۲</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد عمران - سازه دانشکده فنی، دانشگاه ارومیه

### چکیده

هدف اصلی از این تحقیق، بررسی و مطالعه رفتار دینامیکی جداساز سربی - لاستیکی به عنوان میراگر برشی در موقعیت بادبندی شورون سازه‌هاست. در این مقاله تحلیل‌های عددی و تست‌های آزمایشگاهی بر روی این دستگاه انجام گرفته است. این دستگاه از صفحات لاستیکی و فولادی و همچنین هسته سربی تشکیل شده است. لایه‌های لاستیکی در بین لایه‌های فولادی چسبانده شده‌اند. در ابتدا مدل اجزاء محدود سه بعدی دستگاه با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS ایجاد شده و مورد تحلیل قرار گرفت. در این مدل‌سازی، خواص Hyper-elastic برای لایه‌های لاستیکی مورد استفاده قرار گرفته است. با استفاده از این مدل، جزئیات فنی دستگاه به صورت مناسبی تنظیم و سپس این میراگر در آزمایشگاه زلزله دانشگاه ارومیه ساخته شد. آن‌گاه دستگاه بر روی یک سازه یک درجه آزادی مدل نصب گردیده و مجموعه تحت تحریک زلزله‌های مختلف شبیه‌سازی شده قرار گرفت. در ادامه تحقیق، مدل عددی سازه به همراه میراگر در نرم‌افزار SAP2000 ایجاد و با نتایج آزمایشگاهی مقایسه و کالیبره شد. آن‌گاه مدل‌های چند سازه چندین طبقه مجهز به میراگر در نرم‌افزار SAP2000 ایجاد و تأثیر دستگاه میراگر سربی - لاستیکی در بهبود پاسخ آن‌ها بررسی گردید. نتایج حاصل نشانگر تأثیر نصب میراگر سربی - لاستیکی در کاهش جابجایی نسبی سازه یک درجه آزادی می‌باشد. از دیگر مزایای این دستگاه می‌توان به سادگی ساخت و نصب آن در انواع سازه‌ها اشاره کرد.

**واژگان کلیدی:** جداساز سربی - لاستیکی، میراگر، کنترل غیرفعال، میز لرزه.

### ۱- مقدمه

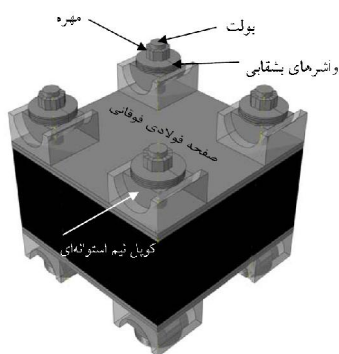
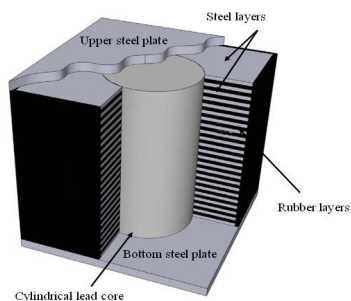
فرکانس‌های ارتعاشات زمین را فیلتر کرده و مانع عبور آن به سازه می‌شود. در نتیجه از ایجاد خرابی در ساختمان جلوگیری می‌شود. جداسازی پی‌ها، یک وسیله موثر برای کنترل لرزه‌ای سازه‌های کوتاه و متوسط می‌باشد زیرا این سازه‌ها معمولاً دارای فرکانس‌های طبیعی بزرگتری نسبت به سازه‌های بلند می‌باشند. کاربرد جداسازهای لرزه‌ای در سازه‌های واقعی، از دهه ۱۹۶۰ میلادی شروع شد. از زمانی که اولین ساختمان با پایه‌های جدا شده، Foothill Community Law and Justice Center، در ایالت کالیفرنیا آمریکا، احداث گردید. از آن تاریخ به بعد سیستم‌های جداساز لرزه‌ای در انواع مختلف و در ساختمان‌ها با سیستم‌های مهار جانبی متفاوت بکار گرفته شده‌اند.

عمده‌ترین سیستم بکار گرفته شده برای جداسازی پایه‌ها، سیستم جداساز لاستیکی می‌باشد که در آن لایه‌های لاستیکی با ورقه‌های فولادی تقویت شده‌اند. در این دستگاه از لاستیک‌هایی که توانایی تحمل فشار قائم زیاد را دارند استفاده می‌گردد ولی جهت پایدار ساختن این لایه‌های عایق‌ساز در برابر کماتش جانبی، ورق‌های فولادی مابین آن‌ها جایگذاری می‌گردد. در این شرایط، جداساز قابلیت تغییر شکل‌های جانبی بزرگی را پیدا می‌کند و در اثر تحریکات زلزله، ارتعاشات زیادی را از خود نشان می‌دهد. هرچند سازه در این حالت از تأثیر این تحریکات

اکثر سازه‌ها در معرض ارتعاشات بسیاری قرار دارند. این ارتعاشات می‌توانند ناشی از نیروهای باد، تحریک زلزله، ارتعاشات ماشین آلات یا بسیاری منابع دیگر باشند. در اغلب موارد، به ویژه زمانی که سازه‌ها تحت تحریک‌های قوی زلزله هستند، این ارتعاشات می‌توانند منجر به صدمه دیدن سازه و یا تخریب آن گردد. میراثی ذاتی بالا در سازه‌ها می‌تواند احتمال آسیب سازه را کاهش دهد. در سازه‌هایی که تحت اثر ارتعاشات قوی قرار می‌گیرند، میراثی خود سازه برای کاهش ارتعاشات کافی نیست. در این خصوص، مطالعات و تحقیقات تئوریک و آزمایشگاهی فراوانی انجام شده تا با افزایش میراثی در سازه، اثرات این تحریکات کاهش داده شوند. کنترل غیرفعال یکی از مؤثرترین روش‌ها در این خصوص می‌باشد که می‌تواند انرژی وارد شده به سازه را به روش‌های مختلف از آن خارج و مانع آسیب دیدگی آن گردد [۱-۳].

جداسازی پایه‌ها یکی دیگر از روش‌های کنترل لرزه‌ای سازه‌هاست. این سیستم باعث جداساز شدن کل سازه یا قسمتی از سازه از زمین شده و مانع رسیدن تأثیرات زمین لرزه به سازه اصلی می‌شود [۴]. سازه‌ای که بر روی مصالحی که دارای سختی جانبی کمی می‌باشند بنا می‌گردد، دارای یک پی انعطاف‌پذیر خواهد بود. این پی انعطاف‌پذیر در حین وقوع زلزله، برخی از

نیروی است که در حالت پس از باربرداری و بارگذاری مجدد و برگشتن به جابجایی صفر ایجاد می‌شود.

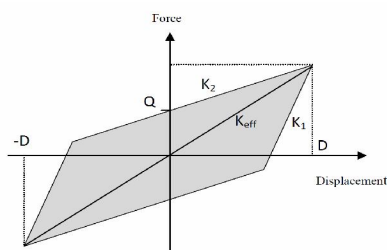


شکل ۱- تصویر شماتیک میراگر سربی - لاستیکی

این مورد در شکل (۲) نشان داده شده است. با توجه به عبارات  $K_2$ ،  $Q$  و  $D$  می‌توان سختی مؤثر دستگاه را طبق رابطه (۱) بدست آورد.

$$K_{eff} = k_2 + \frac{Q}{D}, \quad D \geq D_y \quad (1)$$

که در این رابطه،  $D$  جابجایی منجر به تسلیم سرب است. با توجه به رابطه فوق، میرایی مؤثر  $\beta_{eff}$  طبق رابطه (۲) تعیین می‌شود [۴ و ۵].



شکل ۲- منحنی هیستریزس عمومی جداسازهای سربی -

لاستیکی [۴]

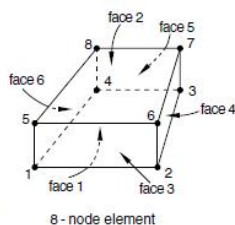
به دور می‌ماند ولی این ارتعاشات می‌بایستی به نحوی از سیستم جداساز خارج گردند. بنابراین، بکارگیری یک میراگر غیرفعال به همراه جداگرها اهمیت خود را نشان می‌دهد [۴]. میراگرهای بکار رفته می‌توانند از نوع میراگر غیر فعال لزجی، تسلیم فلزات، میراگر اصطکاکی و یا میراگر سربی بوده باشد. در این راستا، میراگر سربی توسط دکتر رابینسون در لایه‌های جداساز به نحو مؤثری بکار گرفته شد [۲]. فلذا جداساز سربی لاستیکی به عنوان یکی از مؤثرترین جداسازهای لرزه‌ای مطرح گردید و در سازه‌های زیادی مورد استفاده قرار گرفت.

با وجود این، با توجه به ابعاد بزرگ جداسازهای لرزه‌ای سربی لاستیکی و تکنولوژی بالای مورد نیاز برای ساخت آن‌ها، ساخت و اجرای چنین سیستم‌هایی بسیار پرهزینه می‌باشد. در مقاله حاضر، با توجه به مزایای جداسازهای سربی - لاستیکی، تغییرات و اصلاحاتی در این سیستم و محل نصب آن انجام شده است. به این صورت که جداساز از محل پی‌ها به موقعیت بادبندی شورون برده شده و ابعاد آن بسیار کوچک‌تر شده است. در این تحقیق عددی - آزمایشگاهی، ابتدا این میراگر با استفاده از نرم‌افزار اجزاء محدود ABAQUS مدل شده و تحت تحلیل غیر خطی قرار گرفت. آن‌گاه با استفاده از نتایج این تحلیل، یک نمونه کوچک میراگر سربی - لاستیکی، با مشخصاتی که قابل آزمایش با دستگاه میز لرزه آزمایشگاه بوده باشد، طراحی و ساخته شد. دستگاه حاضر از گروه دستگاه‌های کنترل غیر فعال بوده و تسلیم شدن قطعه سربی عامل اصلی پدیده جذب انرژی است.

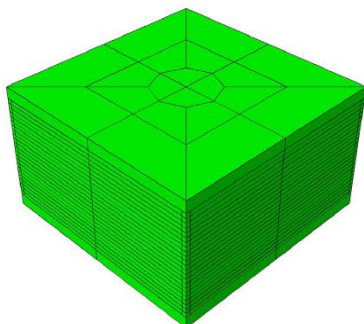
## ۲- خصوصیات مکانیکی دستگاه جداساز سربی - لاستیکی

دستگاه جداساز سربی - لاستیکی از یک هسته سربی استوانه‌ای و چندین لایه لاستیک و فولاد تشکیل شده است. لایه‌های لاستیکی بین لایه‌های فولادی چسبانده شده‌اند. دستگاه مذکور در شکل (۱) نشان داده شده است.

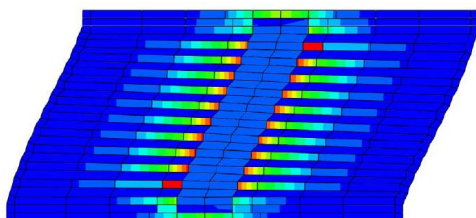
لایه‌های فولادی تحت تأثیر نیروهای خارجی بر روی یکدیگر حرکت می‌کنند ولی هسته سربی در برابر این جابجایی لایه‌های فولادی مقاومت کرده و دچار تغییر شکل پلاستیک می‌شود. در نتیجه انرژی وارده به سیستم، با این مکانیزم استهلاک انرژی جذب می‌شود. جداساز سربی - لاستیکی دارای یک حلقه هیستریزس نیرو- جابجایی بوده که مطابق شکل (۲) به صورت دو خطی قابل مدل‌سازی است. در این مدل  $K_1$ ،  $K_2$  و  $Q$  پارامترهای حلقه هیستریزس می‌باشند ولی چون تعیین و اندازه‌گیری سختی الاستیک  $K_1$  مشکل می‌باشد، در نتیجه در مدل‌سازی از  $K_2$  یا همان سختی فراتسلیم استفاده می‌شود.  $Q$



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۳- الف) شکل عضو C3D8R (ب) مدل مش بندی شده  
میراگر در ABAQUS (ج) مدل تغییر شکل یافته میراگر

این تابع، انرژی کرنشی ذخیره شده در یک ماده را برحسب حجم نشان می‌دهد. ارتباط تنش و کرنش در مواد Hyper-elastic را می‌توان با رابطه (۳) نشان داد:

$$\sigma_{ij} = \frac{\partial U(\epsilon)}{\partial \epsilon_{ij}} \quad (3)$$

که در این رابطه  $\sigma_{ij}$  و  $\epsilon_{ij}$  به ترتیب مؤلفه‌های تنش و کرنش می‌باشند. با توجه به این رابطه، فرم‌ها یا مدل‌های زیادی برای مدل‌سازی خواص Hyper-elastic لاستیک وجود دارند از قبیل Neo-Mooney-Rivlin, Vander Waals, Arrude-Boyce Reduced, Polynomial, Odgen, Hookean و Polynomial [۹] Yeoh.

Raos در سال ۱۹۹۲ [۱۰] چهار مدل Neo-Hookean, Mooney-Rivlin, Vander Waals و Odgen را مورد بررسی قرار داد و با توجه به این تحلیل‌ها مشاهده شد که مدل‌های Mooney-Rivlin و Neo-Hookean

$$\beta_{eff} = \frac{\text{area of hysteresis loop}}{2\pi k_{eff} D^2}, \quad D \geq D_y \quad (2)$$

### ۳- خصوصیات لاستیک و سرب

لاستیک قابلیت تغییر شکل الاستیک در محدوده بالایی را دارد و این قابلیت باعث می‌شود که پس از بارگذاری و باربرداری‌های متناوب و متوالی به حالت اولیه خود باز گردد. لاستیک به طور عمده‌ای برای محافظت لرزه‌ای سازه‌ها در میراگرهایی از قبیل میراگرهای ویسکوالاستیک و جداسازهای پایه‌ها استفاده شده است [۴ و ۶].

در دستگاه میراگر سربی-لاستیکی که در این مقاله مورد بررسی قرار گرفته است، لاستیک بین لایه‌های فولادی قرار گرفته و ورق‌های فولادی می‌توانند نسبت به هم حرکت کرده و مقاومت لازم را در برابر تحریک جانبی ایجاد کنند. هسته سربی که در دستگاه تعبیه شده، منجر به ایجاد حلقه هیستریزس الاستوپلاستیک می‌شود [۴].

یکی از خصوصیات مهم سرب، خاصیت کریستال شدن مجدد است [۷]. در این تحقیق، از یک نوع آلیاژ سربی به نام Sn<sub>63</sub>Pb<sub>37</sub> استفاده شده که دارای قابلیت‌های بسیار خوبی است. با توجه به این که هسته سربی دائماً تحت تأثیر نیروهای رفت و برگشتی گرم شده و به حالت نیمه جامد تبدیل می‌شود، لذا آلیاژی مورد نیاز است که به محض قطع نیروهای وارده، بتواند موقعیت خود را حفظ کرده و به سرعت خنک شده و به حالت کاملاً جامد برگردد. این آلیاژ همه این ویژگی‌ها را دارا می‌باشد [۸].

### ۴- تحلیل اجزاء محدود

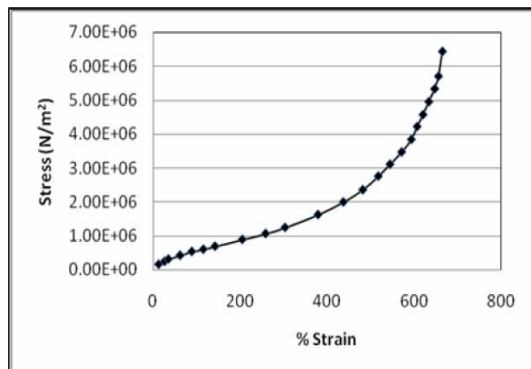
در این تحقیق، برای تحلیل اجزاء محدود میراگر سربی لاستیکی، از نرم افزار ABAQUS استفاده شده است. برای مدل‌سازی بلوک لاستیکی و فولادی و هسته سربی از اعضای سه بعدی C3D8R استفاده شده که اعضای ۸ گرهی بوده و انتگرال‌گیری کاهش یافته را استفاده می‌کنند. همچنین خواص Hyper-elastic به اعضای لایه‌های لاستیکی اعمال شده است. برای تحلیل نیز مدول Explicit نرم‌افزار ABAQUS بکار گرفته شده است. شکل (۳) مدل مش‌بندی شده میراگر را در این نرم‌افزار نشان می‌دهد [۹].

در این مقاله برای تعریف رفتار Hyper-elastic مواد لاستیکی، از تابع U یا همان تابع انرژی ذخیره شده کرنشی استفاده شده است.

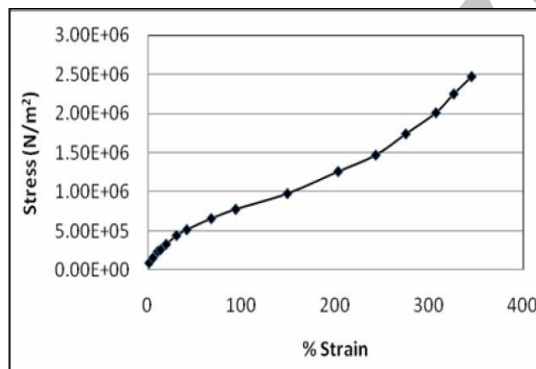
شده روی لاستیک مورد نیاز است. Yoshida تست‌های تک محوری و دو محوری را بر روی انواع لاستیک‌ها انجام داد که نمودارهای مربوط به این آزمایش‌ها در شکل (۴) نشان داده شده است [۱۱].

یکی از فواید مدل‌سازی در ABAQUS، قابلیت مدل‌سازی رفتار غیرالاستیک المان‌ها است. برای مدل کردن خواص پلاستیک مواد در ABAQUS، باید از تنش واقعی و کرنش واقعی به جای تنش و کرنش مهندسی استفاده کرد. کرنش مهندسی بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$\varepsilon_{nom} = \frac{l-l_0}{l_0} = \frac{l}{l_0} - 1 \quad (10)$$



(الف)



(ب)

شکل ۴- الف) نمودار تست‌های تک محوری

ب) نمودار تست‌های دو محوری

که در رابطه فوق  $l$ ، طول تغییر یافته و  $l_0$  طول اولیه نمونه و  $\varepsilon_{nom}$  کرنش مهندسی می‌باشد. کرنش واقعی می‌تواند از رابطه (۱۱) بدست آید:

$$\varepsilon = Ln \frac{l}{l_0} = Ln(1 + \varepsilon_{nom}) \quad (11)$$

منطبق بر آزمایش‌های فشاری و کششی متوسط می‌باشند و دریافت که تنها مدل‌های VanderWaals و Odgen در تمامی محدوده‌ها می‌توانند منطبق بر نتایج آزمایشگاهی باشند. در این بخش، با توجه به این که مدل Odgen در مدل‌سازی لاستیک استفاده شده است، تنها مدل Odgen مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. تابع انرژی کرنشی Odgen به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$U = \sum_{i=1}^w \frac{2\mu_i}{\alpha_i^2} (\bar{\lambda}_1^{\alpha_i} + \bar{\lambda}_2^{\alpha_i} + \bar{\lambda}_3^{\alpha_i} - 3) + \sum_{i=1}^w \frac{1}{D_i} (j^{el} - 1)^{2i} \quad (4)$$

که  $\mu_i$  و  $\alpha_i$  و  $D_i$  پارامترهای وابسته به حرارت و دما بوده و مقاومت کششی اصلی است که از رابطه (۵) بدست می‌آید.

$$\bar{\lambda}_i = J^{\frac{1}{3}} \lambda_i \quad (5)$$

و  $J$  نیز نسبت حجم کلی است که طبق رابطه زیر بدست می‌آید:

$$J = \frac{\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3}{V_0} \quad (6)$$

که  $V_0$  حجم اولیه بلوک لاستیکی و  $j^{el}$  نسبت حجم الاستیک می‌باشد که عبارتست از:

$$j^{el} = \frac{J}{J^{th}} \quad (7)$$

و  $J^{th}$  نسبت حجم حرارتی است که از رابطه (۸) بدست می‌آید:

$$J^{th} = (1 + \varepsilon^{th})^3 \quad (8)$$

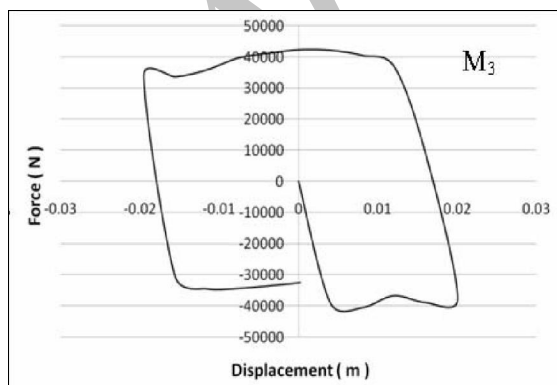
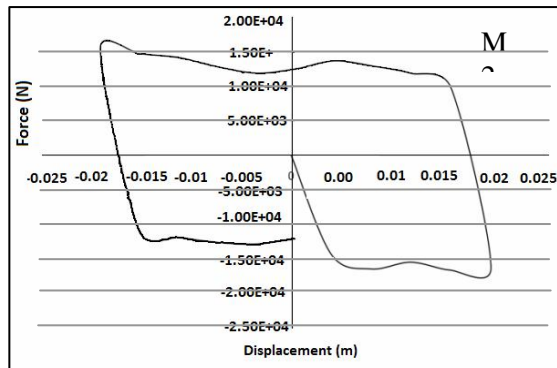
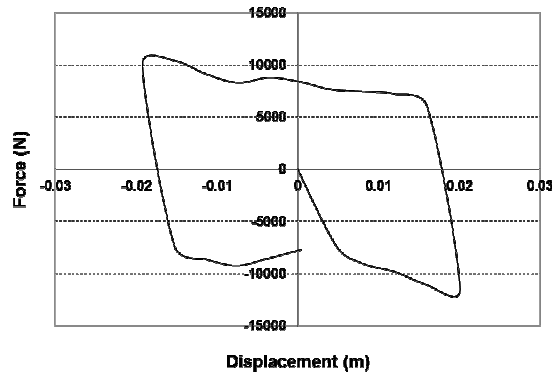
و  $\varepsilon^{th}$  کرنش حرارتی خطی است. با توجه به اینکه مصالح لاستیک مورد استفاده در این مقاله ایزوترمال بوده و همچنین غیر قابل فشردگی است در نتیجه طرف دوم رابطه (۴) برابر صفر خواهد شد و می‌توان نوشت:

$$U = \sum_{i=1}^w \frac{2\mu_i}{\alpha_i^2} (\bar{\lambda}_1^{\alpha_i} + \bar{\lambda}_2^{\alpha_i} + \bar{\lambda}_3^{\alpha_i} - 3) \quad (9)$$

برای مدل‌سازی رفتار Hyper-elastic لاستیک در ABAQUS نتایج آزمایش‌های تک محوری و دو محوری انجام

جدول ۱- مدل‌های مورد استفاده برای تحلیل اجزاء محدود

| Model          | $t_s$ (m) | $t_R$ (m) | $n_S$ | $n_R$ | $D_L$ (m) |
|----------------|-----------|-----------|-------|-------|-----------|
| M <sub>1</sub> | 0.002     | 0.002     | 12    | 11    | 0.014     |
| M <sub>2</sub> | 0.002     | 0.002     | 12    | 11    | 0.03      |
| M <sub>3</sub> | 0.002     | 0.002     | 23    | 22    | 0.03      |
| M <sub>4</sub> | 0.002     | 0.002     | 12    | 11    | 0.04      |
| M <sub>5</sub> | 0.002     | 0.002     | 23    | 22    | 0.04      |
| M <sub>6</sub> | 0.002     | 0.002     | 12    | 11    | 0.05      |



شکل ۶- منحنی‌های هیستریزیس برای سه مدل منتخب

همچنین تنش واقعی از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\sigma = \sigma_{nom} (1 + \varepsilon_{nom}) \quad (12)$$

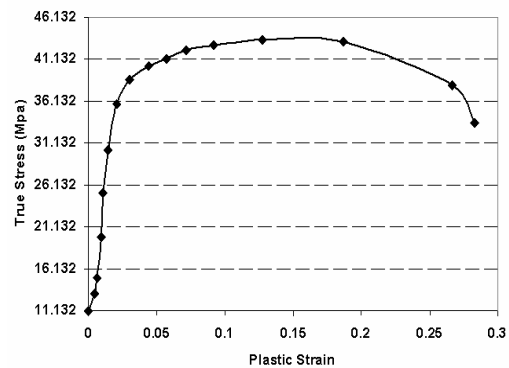
در رابطه فوق  $\sigma$  تنش واقعی و  $\sigma_{nom}$  نشانگر تنش مهندسی است.

کرنش پلاستیک نیز می‌تواند از رابطه (۱۳) بدست آید.

$$\varepsilon_{pl} = \varepsilon_t - \varepsilon_{el} = \varepsilon_t - \frac{\sigma}{E} \quad (13)$$

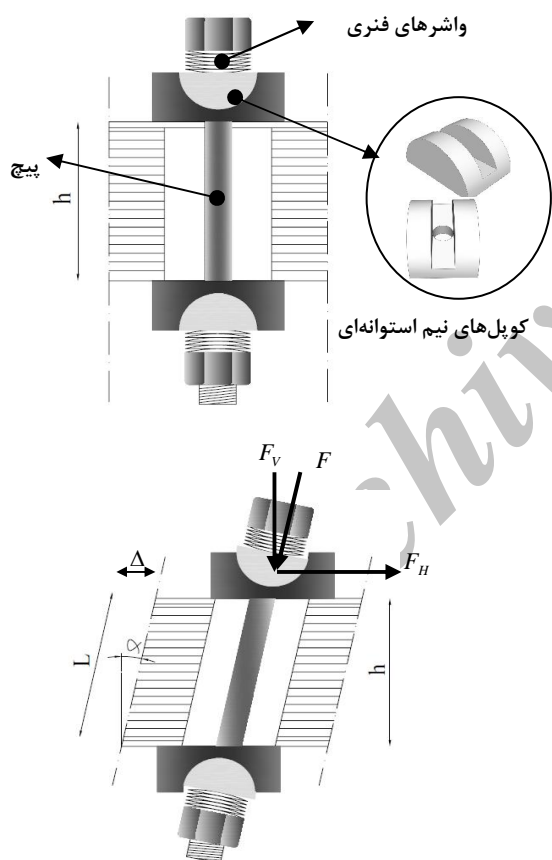
که در رابطه فوق  $\varepsilon_{pl}$  کرنش پلاستیک واقعی و  $\varepsilon_t$  کرنش کلی واقعی  $\sigma$  تنش واقعی و  $E$  مدول الاستیسیته سرب می‌باشد. منحنی استفاده شده برای تنش حقیقی- کرنش پلاستیک مدل‌های ABAQUS این تحقیق در شکل (۵) نشان داده شده است. پس از مدل‌سازی مصالح و مشخصات آن‌ها و مدل‌سازی میراگر، این مدل تحت تحلیل دینامیکی قرار گرفت. برخی از مدل‌هایی که برای تحلیل مورد استفاده قرار گرفته‌اند در جدول (۱) نشان داده شده‌اند. در جدول (۱)  $t_s$ ،  $t_R$ ،  $n_S$  و  $n_R$  و  $D_L$  به ترتیب بیانگر ضخامت لایه‌های فولادی، ضخامت لایه‌های لاستیک، تعداد لایه‌های فولادی، تعداد لایه‌های لاستیکی و قطر هسته سربی می‌باشند. منحنی‌های هیستریزیس (نیرو-جابجایی) سه مدل منتخب، حاصل از تحلیل انجام گرفته در ABAQUS در شکل (۶) نشان داده شده‌اند.

با توجه به تحلیل‌های اجزاء محدود، نمودارهای بدست آمده و ظرفیت اعمال بار میز لرزه و همچنین قابل مشاهده بودن رفتار میراگر در آزمایشگاه، مدل برای  $M_1$  ساخت و تست‌های آزمایشگاهی انتخاب شده است.



شکل ۵- نمودارهای تنش حقیقی- کرنش پلاستیک سرب

از عواملی که می‌تواند منجر به این پدیده شود سرد شدن سریع، منقبض شدن قطعه سربی و وجود حباب‌های هوا در زمان قالب‌گیری است. عوامل مذکور باعث کاهش قدرت جذب انرژی سرب و میراگر می‌شوند برای رفع این مشکل هسته سربی در داخل دستگاه با استفاده از جک هیدرولیکی پیش تنیده می‌شود. پس از ساخت، میراگر سربی-لاستیکی در سازه فولادی یک درجه آزادی نصب شده و پاسخ سازه به همراه میراگر، تحت چندین زلزله شبیه‌سازی شده مورد مطالعه قرار می‌گیرد. همان‌گونه که در شکل (۱) و (۹) مشاهده می‌شود برای اعمال نیروی فشاری قائم از ۴ عدد پیچ فولادی و واشرهای بشقابی استفاده شده و برای توزیع مناسب و بدون مشکل این نیروی قائم، از کوپل‌های نیم استوانه‌ای استفاده شده است.



شکل ۹- جزئیات نصب پیچ‌های فولادی به میراگر

۲-۵- آزمایش میز لرزه سازه با و بدون میراگر سربی-لاستیکی

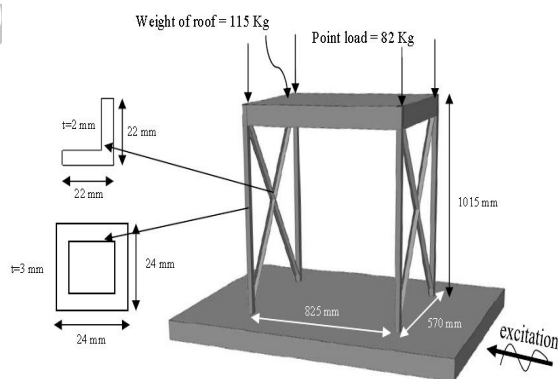
سازه فولادی یک درجه آزادی، بدون میراگر تحت سه تحریک زلزله که در جدول (۲) نشان داده شده، قرار داده

## ۵- بررسی‌های آزمایشگاهی

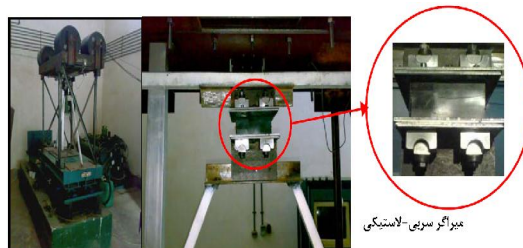
### ۱-۵- میز لرزه، روسازه فولادی یک درجه آزادی و ساخت میراگر سربی-لاستیکی

شکل (۷) جزئیات میز لرزه یک درجه آزادی موجود در آزمایشگاه زلزله دانشگاه ارومیه را نشان می‌دهد. وزن کل سقف سازه به همراه وزنه‌های موجود در گوشه‌ها، ۴۴۳ کیلوگرم می‌باشد که در شکل‌های (۷) و (۸) نشان داده شده‌اند. ابعاد این سازه یک درجه آزادی، با توجه به ابعاد و حداکثر نیروی جک هیدرولیکی میز لرزه طراحی شده است. شتاب افقی میز لرزه توسط دو شتاب‌سنج در قسمت تحتانی و فوقانی اندازه‌گیری می‌شود. همچنین جابجایی نسبی سقف سازه نسبت به کف آن توسط یک دستگاه جابجایی سنج (LVDT) اندازه‌گیری می‌شود.

رفتار دینامیکی سازه فولادی با استفاده از این سنسورها و Data Logger ثبت می‌شود. همان‌گونه که اشاره شد، در ساخت میراگر از آلیاژ سرب  $Sn_{63}Pb_{37}$  استفاده شده است. پس از ذوب و قالب‌گیری سرب، به هنگام منجمد شدن، پدیده افت در آن رخ می‌دهد.



شکل ۷- شکل شماتیک میز لرزه و سازه یک درجه آزادی و جزئیات آن



شکل ۸- تصویر میز لرزه و میراگر سربی-لاستیکی متصل به آن



روی میز لرزه انجام گرفته و در این نرم افزار مدل شده است. برای مدل سازی میراگر در نرم افزار SAP2000 از اعضای Link با خاصیت Multi Linear Plastic استفاده شده است. در شکل (۱۳) نمودار جابجایی- زمان سقف میز لرزه در دو حالت مدل عددی و آزمایشگاهی مقایسه شده با توجه به روابط (۱۴) و (۱۵) می توان دریافت که رفتار مدل نرم افزاری میز لرزه بسیار مشابه رفتار واقعی آن در آزمایشگاه می باشد.

$$R_{rmse} = \sqrt{\frac{\left(\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (u_i^e - u_i^{ap})^2\right)}{\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (u_i^e)^2\right)}} \quad (14)$$

$$R_{Square} = 1 - \frac{\left(\sum_{i=1}^n (u_i^e - u_i^{ap})^2\right)}{\left(\sum_{i=1}^n (u_i^e - \bar{u})^2\right)} \quad (15)$$

در روابط فوق  $u_i^e$  مقادیر موج دقیق و  $u_i^{ap}$  مقادیر موج تقریبی و  $\bar{u}$  مقدار میانگین موج دقیق می باشند. محاسبه روابط فوق برای نتایج شکل (۱۳- الف)، مقادیر ۱/۱۷ برای رابطه (۱۴) و ۰/۳۴- را برای رابطه (۱۵) نتیجه می دهد. محاسبه این دو رابطه برای شکل (۱۳- ب) نیز به ترتیب برابر با ۱/۱۷ و ۰/۳۵- می باشد که حاکی از تطابق خوب نتایج عددی و آزمایشگاهی می باشد.

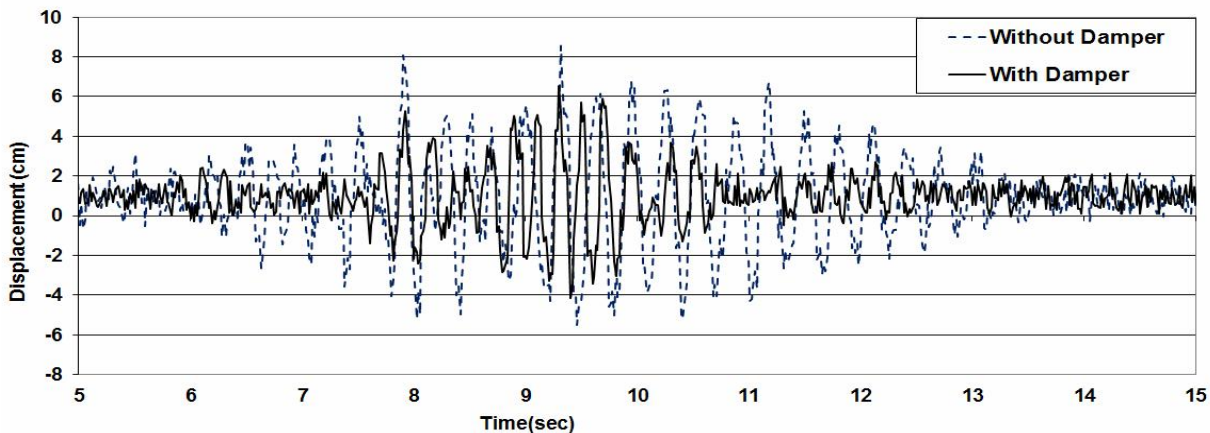
می شود. سپس این سازه به میراگر سربی- لاستیکی مجهز شده و تحت همان تحریکات زلزله قرار می گیرد. شکل (۸) تصویر سازه مجهز شده به میراگر را نشان می دهد. نتایج تست میز لرزه در دو حالت فوق در شکل های (۱۰) تا (۱۲) نشان داده شده است. تأثیر میراگر بر روی سازه، تحت تحریک زلزله های مقیاس شده ال سنترو، کوبه و طیس در جدول (۳) به طور خلاصه آورده شده است. در این جدول جابجایی های نسبی حداکثر سازه یک درجه آزادی به همراه میراگر و بدون میراگر مقایسه شده است. با توجه به جدول (۳) و شکل های (۱۰) تا (۱۲) مشاهده می شود که میراگر تأثیر بسزایی در کاهش جابجایی های نسبی سازه دارد. طبق این نتایج، میزان کاهش برای زلزله ال سنترو بیش از ۵۱٪، برای زلزله کوبه بیش از ۶۷٪ و برای زلزله طیس بیش از ۵۷٪ بوده است که رقم کاهش قابل توجهی می باشد.

جدول ۲- مشخصات زلزله های مورد استفاده

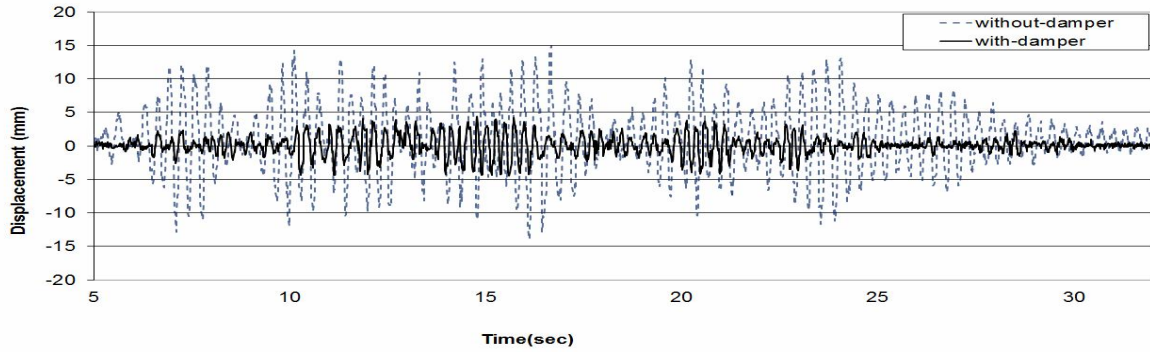
| Row | Earthquake                  | Station            | Magnitue | Latitude | Longitude |
|-----|-----------------------------|--------------------|----------|----------|-----------|
| 1   | Tabas (1978-9-16)           | Iran 9101 Tabas    | 7.35     | 33.5800  | 56.9200   |
| 2   | Imperial Valley (1940-5-19) | Array#9, El Centro | 6.95     | 32.7940  | -115.549  |
| 3   | Kobe, Japan (1995-1-16)     | 99999 TOT          | 6.90     | 35.4850  | 134.2400  |

#### ۶- مدل عددی میز لرزه

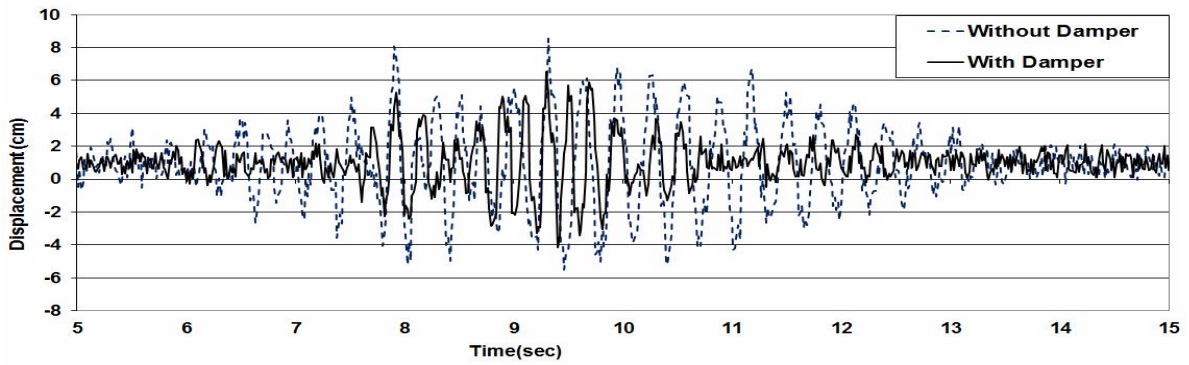
برای پیش بینی و بررسی رفتار میراگر به صورت عددی مدل میز لرزه در نرم افزار SAP2000 ایجاد شده و برای کالیبره کردن رفتار و شبیه سازی مناسب آن، تست های متعددی بر



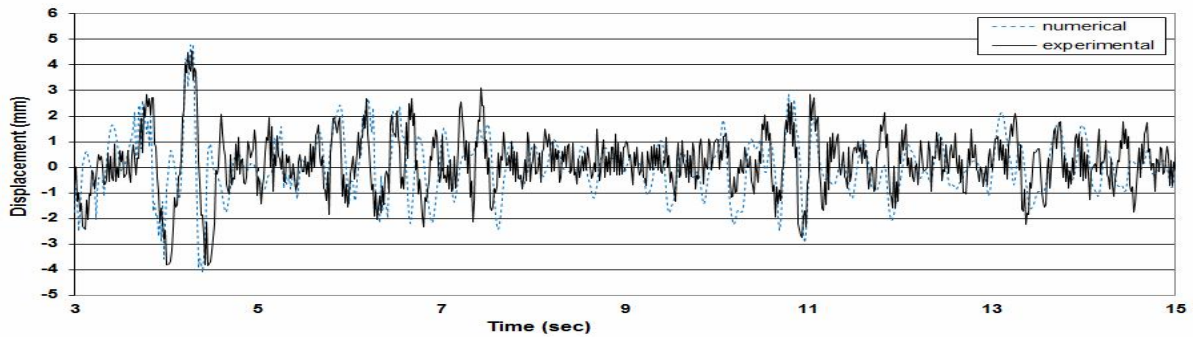
شکل ۱۰- جابجایی نسبی سقف سازه یک درجه آزادی تحت تحریک زلزله ال سنترو با شتاب ماکزیمم 0.9g



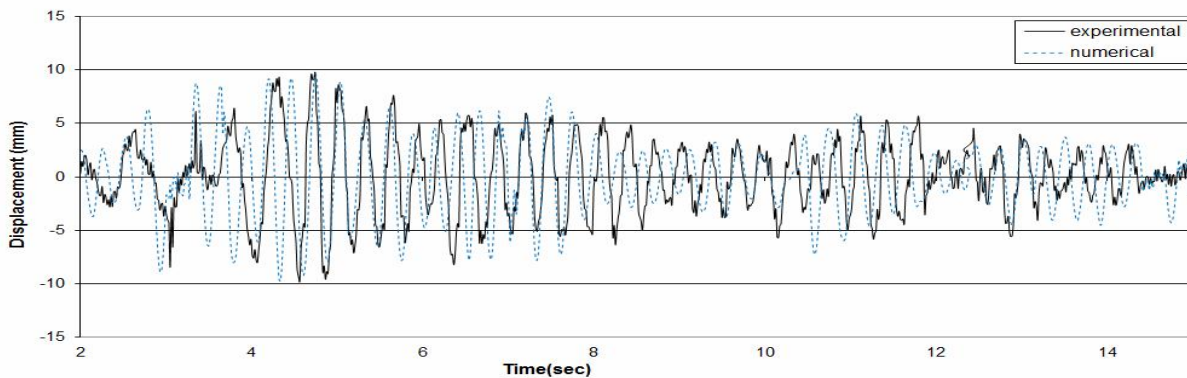
شکل ۱۱- جابجایی نسبی سقف سازه یک درجه آزادی تحت تحریک زلزله Tabas با شتاب ماکزیمم 1.0g



شکل ۱۲- جابجایی نسبی سقف سازه یک درجه آزادی تحت تحریک زلزله Kobe با شتاب ماکزیمم 0.9g



(الف) با میراگر



(ب) بدون میراگر

شکل ۱۳- مقایسه جابجایی نسبی سقف سازه یک درجه آزادی تحت تحریک زلزله در دو حالت الف) با میراگر ب) بدون میراگر



جدول ۳- جابجائی نسبی سازه یک درجه آزادی تحت زلزله‌های مختلف

| Earthquake                            | Peak earthquake (g) | Displacement response |                  |                              |
|---------------------------------------|---------------------|-----------------------|------------------|------------------------------|
|                                       |                     | Bare structure (mm)   | With damper (mm) | Reduction rate of damper (%) |
| Elcentro, Imperial Valley (1940-5-19) | 0.77                | 12.51                 | 6.071            | 50.67                        |
|                                       | 0.9                 | 13.95                 | 6.58             | 52.83                        |
| Kobe, Japan (1978-09-16)              | 0.62                | 14.87                 | 4.73             | 68.19                        |
|                                       | 0.88                | 16.47                 | 5.6              | 67                           |
| Tabas, Iran (1978-09-16)              | 0.95                | 14.32                 | 6.09             | 57.47                        |
|                                       | 1.0                 | 14.98                 | 6.29             | 58.01                        |

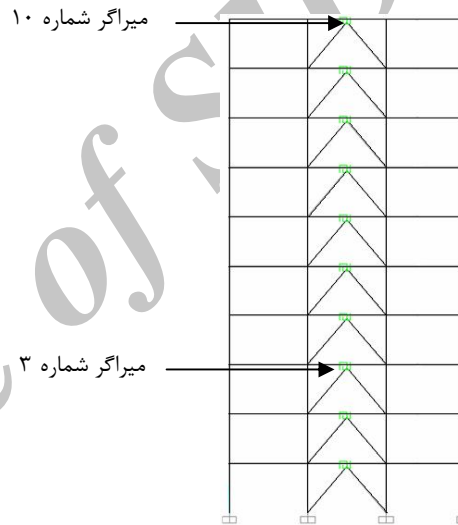
در شکل‌های (۱۵) و (۱۶) نشان داده شده‌است. جدول شماره (۴) مشخصات زلزله‌هایی که برای تحلیل این سازه مورد استفاده قرار گرفته را نشان می‌دهد.

جدول ۴- مشخصات زلزله‌های مورد استفاده در تحلیل سازه ۱۰

| طبقه                  |                             |           |                |       |
|-----------------------|-----------------------------|-----------|----------------|-------|
| Earth quake           | Station                     | Magnitude | Duration (sec) | Scale |
| Landers, 1992         | Joshun Trec-FireStation-90° | 7.4       | 79.98          | 2.519 |
| Imperial Valley, 1940 | Elcentro-270°               | 6.95      | 53.74          | 1.74  |
| Northridge, 1994      | Sylmar County Hospital-90°  | 6.7       | 35.48          | 0.78  |

در شکل‌های (۱۸) و (۱۹) رفتار دو نمونه از میراگرهای نصب شده در طبقه سوم و دهم سازه تحت تأثیر زلزله ال‌سنترو، به صورت منحنی‌های نیرو-جابجایی نشان داده شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود این میراگرها تحت تأثیر زلزله ال‌سنترو رفتاری کاملاً ثابت و یکنواخت دارند.

با توجه به نمودارهای حداکثر جابجائی‌های طبقات و نتایج تحلیل مشاهده می‌شود که کاهش جابجایی طبقات تحت تحریک زلزله‌های اعمال شده به طور متوسط ۱۴ تا ۵۰ درصد می‌باشد. همچنین دریفت پسماند در هر رکورد زلزله، کاهش می‌شود. در حدود ۶۲ تا ۷۷ درصد داشته و برش پایه نیز در حدود ۳۱ تا ۵۸ درصد کاهش را نشان می‌دهد. مشخصات زلزله‌های اعمال شده در جدول (۴) نشان داده شده است.

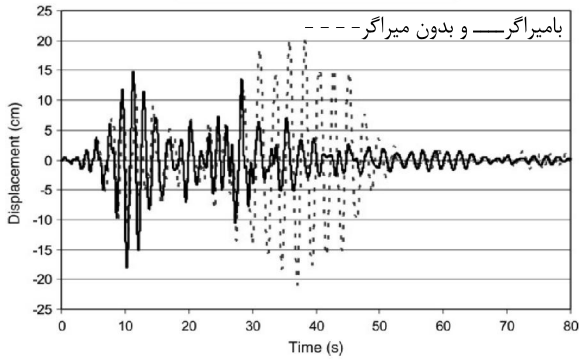


شکل ۱۴- تصویر یک قاب از سازه مجهز به میراگر

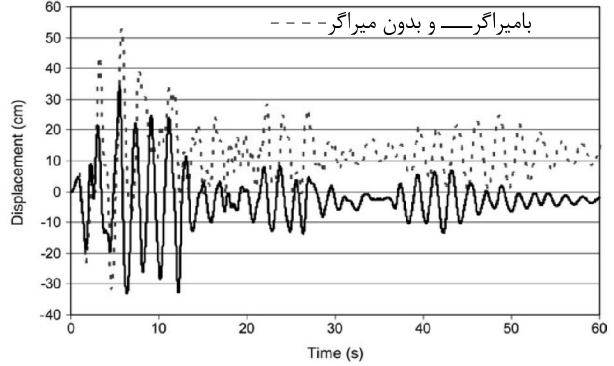
#### ۷- مدل سازی میراگر در سازه ۱۰ طبقه فولادی

برای بررسی رفتار میراگر در سازه و همچنین رفتار سازه چندین طبقه به همراه میراگر، دستگاه مذکور با استفاده از اعضای Link با خاصیت Multi Linear Plastic در نرم‌افزار SAP2000 مدل شده است. سختی این اعضا در دو جهت  $U_1$  و  $U_2$  اعمال شده است. در شکل (۱۴) نمایی از یک قاب از این سازه مجهز به میراگر نشان داده شده است.

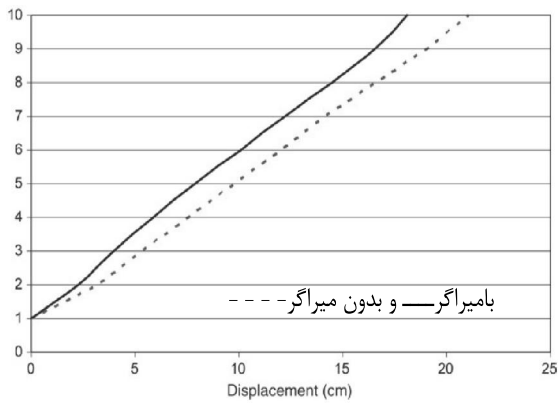
با توجه به تحلیل‌های انجام گرفته بر روی سازه، پیروید ارتعاشی چهار مد اول به ترتیب برابر با ۰/۲۵۱، ۰/۸۴۷، ۰/۴۹۲ و ۰/۳۲۸ ثانیه می‌باشد. پیروید ارتعاشی چهار مد اول سازه با میراگر نیز به ترتیب برابر با ۰/۱۸۹۵، ۰/۶۸۷، ۰/۴۰۶ و ۰/۲۸۰ ثانیه بوده و نسبت‌های میرایی این مودها به همراه میراگر تقریباً برابر با ۸، ۱۴/۴، ۲۰/۹ و ۲۴/۸ درصد می‌باشند. البته لازم به ذکر است که میرایی ذاتی سازه برای ۵ مود اول ۳ درصد در نظر گرفته شده است. نتایج تحلیل تاریخچه زمانی سازه با میراگر و بدون میراگر



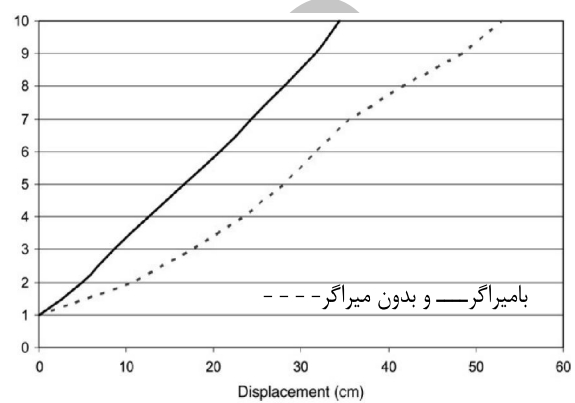
(الف)



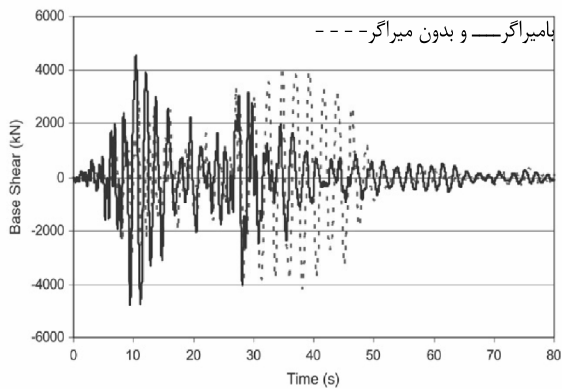
(الف)



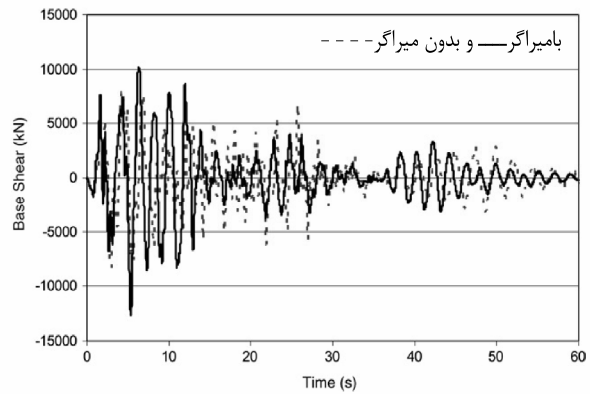
(ب)



(ب)



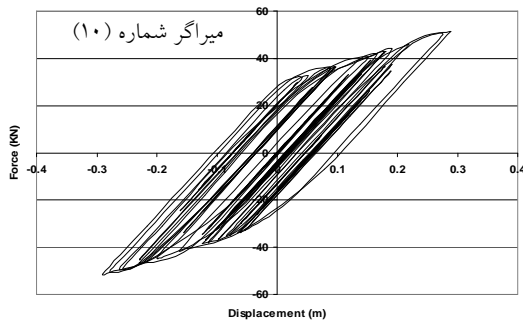
(ج)



(ج)

شکل ۱۶- نمودارهای جابجایی- زمان الف) در بام (ب) جابجایی حداکثر طبقات (ج) برش پایه تحت زلزله لاندروز

شکل ۱۵- نمودارهای جابجایی- زمان الف) در بام (ب) جابجایی حداکثر طبقات (ج) برش پایه تحت زلزله ال سنترو



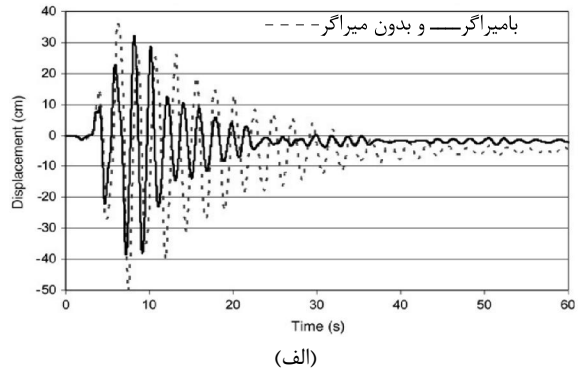
شکل ۱۰- منحنی هیستریزس میراگر شماره ۱۰ تحت تأثیر زلزله ال سنترو

### ۸- نتیجه گیری

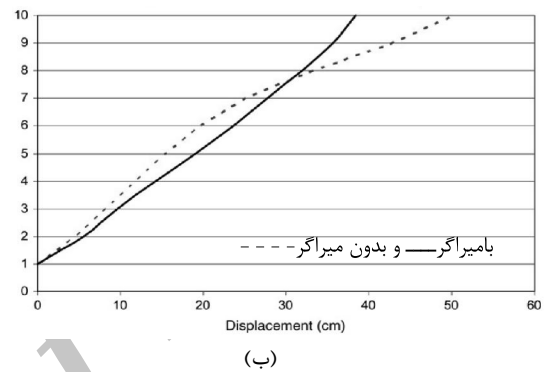
در این پژوهش، جداسازهای سربی-لاستیکی در موقعیت بادبندی شورون برای محافظت لرزه‌ای ساختمان‌ها مورد استفاده قرار گرفته است. این دستگاه از چندین لایه فولادی و لاستیکی و هسته سربی تشکیل شده است. در این مقاله مدل اجزاء محدود میراگر تحلیل شده است. در مدل‌سازی دستگاه خواص Hyper-elastic مواد ویسکو الاستیک و رفتار غیرخطی قطعه سربی مطرح شده است. این میراگر در محل آزمایشگاه زلزله دانشکده فنی دانشگاه ارومیه ساخته شده و در یک سازه یک درجه آزادی تحت تحریک چندین زلزله شبیه‌سازی شده قرار گرفته است. همچنین میراگر مذکور با اختصاص خواص هیستریزس به اعضای Link در نرم‌افزار SAP2000 بر روی سازه‌ای ۱۰ طبقه مدل شده و رفتار سازه مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به نتایج تحلیل‌ها و تست‌های آزمایشگاهی می‌توان مشاهده کرد که دستگاه میراگر سربی-لاستیکی زمانی که در محل بادبندی شورون نصب می‌شود، می‌تواند پاسخ سازه یک درجه آزادی را به طور قابل توجهی تا حدود ۵۰٪ کاهش دهد. به علاوه مشاهده شد که میراگر پاسخ سازه ۱۰ طبقه را نیز بین ۱۴٪ الی ۵۰٪ کاهش داده و رفتار آن را بهبود بخشیده است. لازم به ذکر است که در این موقعیت، دستگاه قابل دسترس‌تر بوده و می‌تواند به راحتی نصب و یا تعویض گردد و این درحالی است که در موقعیت زیر پی و ستون‌ها موارد مذکور به راحتی قابل اعمال نیستند.

### ۹- مراجع

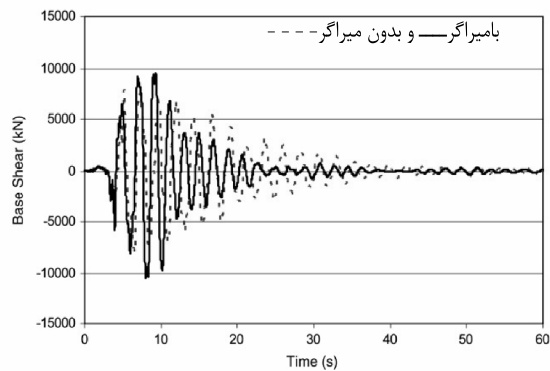
- [1] Martinez-Romero. E., "Experiences on the Use of Supplemental Energy Dissipators on Building Structures", Earthquake Spectra, 1993, 9 (3), 581-624.
- [2] Soong, T. T., Dargush G. F., "Passive Energy Dissipation Systems in Structural Engineering", John Wiley & Sons, 1997.



(الف)

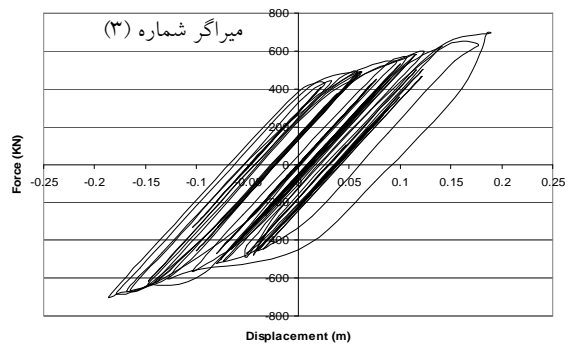


(ب)



(ج)

شکل ۱۱- نمودارهای جابجایی- زمان (الف) در بام (ب) جابجایی حداکثر طبقات (ج) برش پایه تحت زلزله نورتریج



شکل ۱۲- منحنی هیستریزس میراگر شماره ۳ تحت تأثیر زلزله ال سنترو

- [8] Ioannis, V., Kalpakidis, M., Constantinou, C., "Effects of Heating on the Behavior of Lead-Rubber Bearings. II: Verification of Theory", *Journal of Structural Engineering*, 2009, 135 (12), 1450-1461.
- [9] Hibbitt, Karlsson, Sorensen, "ABAQUS/Standard User's Manual", Pawtucket (RI), 2002.
- [10] Raos, P., "Modeling of Elastic Behavior of Rubber and its Applications in FEA. Plastics, Rubber and Composites", *Processing and Applications*, 1993, 19 (5), 293-303.
- [11] Yoshida, J., Abe, M., Fujino, Y., "Constitutive Model of High-Damping Rubber". *Journal of Engineering Mechanics*, 2004, 130 (2), 129-141.
- [3] Tehranizadeh, M., "Passive Energy Dissipation Device for Typical Steel Frame Building in Iran", *Engineering Structures*, 2001, 23 (6), 643-55.
- [4] Naeim, F., Kelly, J., "Design of Seismic Isolated Structures", John Wiley and Sons, New York, 1999.
- [5] Tarics, A. G., Way, D., Kelly, J., "The Implementation of Base Isolation for the Foothill Communities Law and Justice Center", Technical report no. RTA-84, San Francisco (CA), 1984.
- [6] Derham, C. J., Kelly, J. M., Thomas, A. G., "Nonlinear Natural Rubber Bearings for Seismic Isolation", *Nuclear Engineering Design*, 1985, 84 (3), 417-428.
- [7] Parulekar, Y. M., Reddy G. R., Vaze, K. K., Kushwaha, H. S., "Lead Extrusion Dampers for Reducing Seismic Response of Coolant Channel Assembly", *Nuclear Engineering and Design*, 2004, 227, 175-183.

Archive of SID