

# جداساز الاستومری مسلح به حلقه‌های فلزی: مطالعه تئوری، عددی و آزمایشگاهی

## Elastomeric Isolators with Steel Rings: A Theoretical, Experimental and Numerical Study

حسن پورمحمد<sup>۱</sup>، منصور ضیائی فر<sup>۲</sup> و محسن غفوری آشتیانی<sup>۲</sup>

۱- دانشکده فنی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرج و واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران

۲- پژوهشکده مهندسی سازه، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران

Email: poormohammad72@yahoo.com

**چکیده:** جداساز مسلح به حلقه‌های فلزی یک جداساز الاستومری بر مبنای ایجاد فضای تنش هیدرواستاتیک داخلی می‌باشد. این جداسازها می‌توانند در جداسازی لرزه‌ای سازه‌های سبک (مانند جداسازی کف) مورد استفاده قرار گیرند. در این مقاله ضمن معرفی جداساز الاستومری مسلح به حلقه‌های فلزی، روش ساخت، انجام آزمایشها و رابطه‌ای برای محاسبه سختی قائم آنها ارائه شده و عملکرد این جداسازها با جداسازهای مسلح به صفحات فلزی مقایسه شده است. علاوه بر این به عنوان نمونه یکی از کاربردهای این جداسازها برای جداسازی لرزه‌ای کف طبقات ارائه شده است. نتایج عددی و آزمایشگاهی نشان داده که جداسازهای مسلح به حلقه‌های فلزی داخلی عملکرد مناسبی در جداسازی لرزه‌ای دارند. همچنین نتایج به دست آمده از رابطه تئوری پیشنهادی برای محاسبه سختی قائم این جداسازها با نتایج آزمایشگاهی و عددی مقایسه شده است.

**کلید واژه‌ها:** جداسازی لرزه‌ای، جداسازی کف، جداساز الاستومری مسلح به حلقه‌های فلزی، جداساز هیدرولیکی، ساخت جداساز، آزمایش جداساز

**Abstract:** The state of hydrostatic pressure inside of elastomeric isolators is the key point in providing the high ratio of vertical to horizontal stiffness in such devices. In this study the state of hydrostatic pressure is provided by steel rings instead of steel shims used in classical elastomeric isolators. In the theoretical part of the work, a formula for calculating vertical stiffness of the bearing was presented. Later this formula was verified through experimental studies. In the experimental phase of the study some prototype bearings were made and their performances were compared with classical isolators using test results. The numerical part of the work was based on studying the possible application of such bearings in floor isolation of buildings. The results of the numerical studies have shown the potential of these devices in reducing force and displacement responses of the building subjected to a series of earthquakes.

### ۱- مقدمه

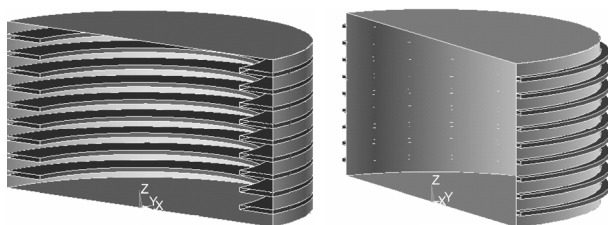
الاستومری به طور گسترده میسر نشده است. جهت بهره‌مندی از مزایای جداسازهای الاستومری در جداسازی لرزه‌ای، خصوصاً جداسازی سازه‌های سبک (مانند جداسازی کف) و گسترش استفاده از این سیستمها ناگزیر به یافتن راه‌حلهای ساده‌تر و در نتیجه کاهش قیمت آنها باید بود. یکی از راههای کاهش هزینه، استفاده از حلقه‌های فلزی به جای صفحات فلزی در جداسازهای الاستومری است که ایده آن برای اولین بار توسط ضیائی فر ارائه شده است [۵]. از آنجاییکه این جداسازها سختی افقی کمتری از جداسازهای معمولی دارند، می‌توان از آنها برای جداسازی اجرام کم وزن (مانند تجهیزات صنعتی) استفاده بعمل آورد [۶-۹]. تحقیقات دیگری نیز در این رابطه انجام شده، بعنوان مثال یعقوبیان [۱۰] از یک نوع جداساز گلوله‌ای فلزی در

بیشتر سیستمهای جداساز که امروزه به کار می‌روند از انواع الاستومری، لغزنده، ترکیب الاستومری و لغزنده، آونگی لغزنده، فنری، شمعه‌های غلافدار و گهواره‌ای می‌باشند [۱-۲] که در میان آنها استفاده از جداسازهای الاستومری یک روش مناسب و کارآمد محسوب می‌شود. جداساز الاستومری شامل دو جزء لاستیک و فلز می‌باشد که جزء لاستیکی آن از ترکیب مواد اولیه و افزودنیهای لازم با توجه به خواص مکانیکی و شیمیایی مورد نیاز ساخته می‌شود [۳]. اولین کاربرد ثبت شده لاستیک بعنوان جداساز الاستومری در سازه‌های مهندسی، در سال ۱۸۸۹ در پلی واقع در کشور استرالیا می‌باشد که بیشتر برای جذب ضربه و ارتعاشات محیطی بوده است [۴].

امروزه بدلیل مشکلات تولید و هزینه، استفاده از جداسازهای

## ۲- معرفی جداسازهای مسلح به حلقه‌های فلزی

مدل شماتیکی یک جداساز الاستومری مسلح به حلقه‌های فلزی داخلی<sup>۱</sup> و خارجی<sup>۲</sup> در شکل (۱) نشان داده شده است. حلقه‌های فلزی داخلی و خارجی به منظور بالا بردن سختی قائم نسبت به سختی افقی استفاده شده است. با توجه به محصور بودن لاستیک داخلی و تراکم ناپذیر<sup>۳</sup> بودن لاستیک، طبق قانون پاسکال فشار وارده در اثر بارگذاری قائم بر روی جداساز در نقاط مختلف لاستیک داخلی توزیع تقریباً یکسانی دارد. این بدان مفهوم می‌باشد که تقریباً یک فشار هیدرواستاتیک در لاستیک داخلی وجود دارد. بنابراین در جداسازهای الاستومری با حلقه‌های فلزی، در لاستیک مرکزی توزیع تنش بصورت هیدرواستاتیک می‌باشد. ( $\sigma_{11} = \sigma_{22} = \sigma_{33}$ )



شکل ۱- جداسازهای مسلح به حلقه‌های فلزی. (الف) با حلقه‌های فلزی خارجی (ب) با حلقه‌های فلزی داخلی

محدوده‌ای از لاستیک که تنش هیدرواستاتیک در آن حاکم می‌باشد همان محدوده لاستیک غیرمسلح می‌باشد. با توجه به فرض توزیع تنش هیدرواستاتیک در قسمت غیرمسلح لاستیک می‌توان نتیجه گرفت که مسلح کردن جداساز به فلز در قسمت میانی آن ضروری نمی‌باشد. این موضوع دلیل منطقی برای استفاده از حلقه‌های فلزی بجای صفحات فلزی است.

همانطور که در شکل (۲) جزئیات یک جداساز مسلح به حلقه‌های فلزی داخلی نشان داده شده است، سطح مقطع کل جداساز ( $A$ ) از دو قسمت الف) سطح مقطع لاستیک غیر مسلح ( $A_r$ ) و ب) سطح مقطع لاستیک مسلح ( $A_s$ ) تشکیل شده است.

$$\left( A = \frac{\pi D_s^2}{4} \right) = \left( A_r = \frac{\pi D_r^2}{4} \right) + \left( A_s = \frac{\pi (D_s^2 - D_r^2)}{4} \right) \quad (1)$$

با اعمال تنش  $\sigma_0$  (بار قائم) بر جداساز، سهم سطح  $A_r$  از این بار  $F_1$  و سهم سطح  $A_s$  از این بار  $F_2$  می‌شود. نیروهای  $F_1$  و  $F_2$  از روابط (۲) بدست می‌آیند.

$$F_1 = \frac{D_r^2}{D_s^2} F \quad F_2 = \frac{(D_s^2 - D_r^2)}{D_s^2} F \quad (2)$$

جداسازی کف یک موزه استفاده نموده است. همچنین احمدی و همکاران [۱۱] نیز یک نوع جداساز هیدرولیکی را به این منظور معرفی و آزمایش نموده‌اند. جداسازهای معرفی شده توسط یعقوبیان و یا احمدی و همکاران برای جداسازی وزنه‌های خیلی کم می‌باشد بنابراین در جداسازی کف ساختمانها تعداد زیادی از این نوع جداسازها مورد نیاز می‌باشد که توجه اقتصادی ندارد. همچنین جداسازهای گلوله‌ای فلزی نیاز به نگهداری و بازرسی مستمر دارد. جداساز معرفی شده توسط احمدی و همکاران در جهت قائم سختی مناسبی ندارد که این موضوع می‌تواند موجب تشدید اثرات قائم زلزله شود. ضیائی‌فر و صارم [۱۲] نیز یک نوع جداساز هیدرولیکی مسلح به الیاف نایلون و یا فولادی برای مصارف صنعتی معرفی نموده‌اند که در این رابطه رفتار مناسبتری دارد. مکانیسم عملکرد این جداسازها بر مبنای ایجاد فضای تنش هیدرواستاتیک داخلی است که به این علت از آنها تحت عنوان جداسازهای هیدرولیکی نیز نام برده می‌شود [۵]. ایجاد فضای هیدرواستاتیک در این جداسازها جهت تأمین نسبت مورد نظر سختی قائم به سختی برشی می‌باشد تا امکان بکارگیری آنها را به عنوان جداساز لرزه‌ای فراهم نماید. جداسازهای الاستومری مسلح به حلقه‌های فلزی مورد بحث این تحقیق نیز بر مبنای همین اصل عمل می‌کنند.

به منظور کنترل کیفیت ساخت جداسازهای الاستومری آزمایشهای مختلفی بر روی لاستیک از جمله ویژگیهای آن در فشار و کشش، چسبندگی لاستیک به فلز، خرابی و ترک خوردگی لاستیک، مقاومت در برابر ازن، هوازدگی، مقاومت در برابر پاره شدن، مشخصات لاستیک در فشار در دماهای پایین و طول عمر آن انجام می‌شود [۱۳]. پس از تهیه ماده خام لاستیکی، این ماده از طریق چسب مخصوص اتصال به فلز چسبانده شده و ساخت جداساز به اتمام می‌رسد. جهت تعیین خواص مکانیکی جداساز (سختی قائم، سختی برشی، نسبت میرایی و ...) آزمایش بارگذاری قائم و بارگذاری برشی و قائم بطور همزمان بر روی نمونه جداساز انجام می‌شود [۱۴-۱۵].

در این مقاله ابتدا اصول پایه و رابطه‌ای برای محاسبه سختی قائم این جداسازها ارائه شده، سپس با استفاده از روش اجزای محدود، عملکرد این جداسازها با جداسازهای مسلح به صفحات فلزی مقایسه شده است. نمونه‌های جداساز ساخته شده مورد مطالعه آزمایشگاهی قرار گرفته و در آخر یک نمونه کاربردی از این جداسازها در جداسازی کف طبقات ارائه شده است.

1- Elastomeric Isolators with Inner Steel Rings  
2- Elastomeric Isolators with Outer Steel Rings  
3- Incompressible

قائم جداساز مسلح به حلقه‌های فلزی داخلی را می‌توان بصورت زیر بازنویسی کرد.

$$K_V = \left( \frac{32(H-nh)^3}{5\pi D_s^2(D_s^2-D_r^2)(n+1)^2 G_r} + \frac{4H}{E_C \pi D_s^2} + \frac{16H^2}{\pi^2 E_s D_r (D_s^2 - D_r^2)} \right)^{-1} \quad (5)$$

در بخش ۴ این مقاله، نتایج رابطه پیشنهادی برای محاسبه سختی قائم جداساز مسلح به حلقه‌های فلزی داخلی با نتایج عددی و آزمایشگاهی مقایسه شده است.

### ۳- تحلیل عددی

در این بخش عملکرد جداسازهای پیشنهادی بصورت تحلیلی با استفاده از روش اجزای محدود بررسی شده است. ابتدا یک جداساز الاستومری مسلح به صفحات فلزی طراحی شده سپس برای مقایسه عملکرد جداسازهای مسلح به حلقه‌های فلزی، حلقه‌هایی با پهنای مختلف جایگزین صفحات شده است. مشخصات طراحی جداساز با صفحات فلزی برای وزن سبک (جداسازی کف) در جدول (۱) نشان داده شده است [۸]. سختی قائم و افقی مورد نیاز از روابط  $K_V = \frac{4\pi^2}{T_V^2} m$  و  $K_H = \frac{4\pi^2}{T_H^2} m$  می‌باشد. مدول برشی به دست آمده که نسبت آنها  $\frac{K_V}{K_H} = 225$  به دست آمده است. لاستیک از رابطه (۶) به دست آمده است.

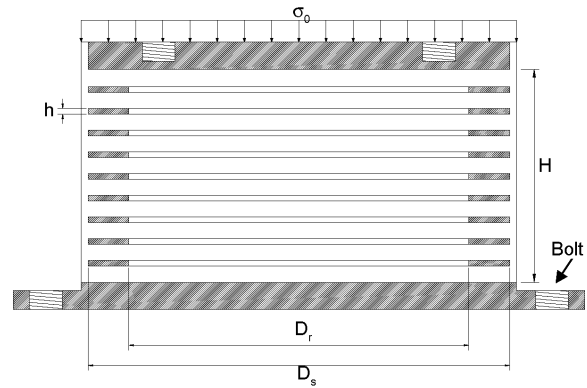
جدول ۱: مشخصات طراحی جداساز مسلح به صفحات فلزی.

مقدار	توضیحات
۴/۸ تن (مرده) ۱/۲ تن (زنده)	بار قائم (F)
۱/۵ ثانیه	پریود افقی (T <sub>H</sub> )
۰/۱ ثانیه	پریود قائم (T <sub>V</sub> )
۷ سانتیمتر	تغییر مکان افقی طراحی (D <sub>D</sub> )
۷/۸ سانتیمتر	ارتفاع خالص جداساز (بدون صفحات بالا و پایین) (H)

$$K_H = \frac{GA}{H} \Rightarrow G_r = \frac{K_H H}{A} = 0.42 \text{MPa} \quad (6)$$

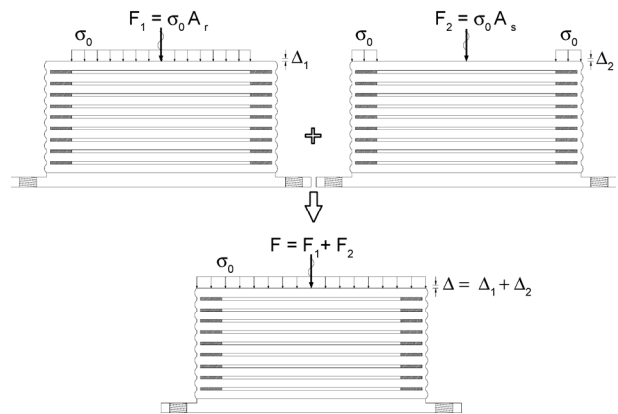
بنابراین مدول برشی لاستیک برای کرنش ۱۵۰٪ برابر ۰/۴ MPa و برای کرنش ۲۰٪ برابر ۰/۱ MPa در نظر گرفته شده است. ضریب شکل در جداساز با صفحات فلزی از رابطه (۷) به دست می‌آید که در این رابطه  $f_V$  و  $f_H$  به ترتیب فرکانس قائم و فرکانس افقی جداساز می‌باشند.

$$S = \frac{1}{\sqrt{6}} \frac{f_V}{f_H} \Rightarrow S = 6.2 \quad (7)$$



شکل ۲- جزئیات یک جداساز مسلح به حلقه‌های فلزی داخلی.

با توجه به رابطه  $F = \sigma_0 A$ ، سختی قائم را می‌توان از معکوس کردن تغییرمکان قائم به ازای نیروی قائم واحد به دست آورد. تغییرمکان قائم تحت نیروی کل F شامل دو قسمت می‌باشد. الف) تغییرمکان ناشی از نیروی  $F_1 (\Delta_1)$  ب) تغییرمکان ناشی از نیروی  $F_2 (\Delta_2)$  که در نهایت می‌توان با استفاده از اصل رویهم گذاری مقدار  $\Delta_1 + \Delta_2$  را به دست آورد (شکل ۳).



شکل ۳- تغییر شکل جداساز تحت نیروی قائم.

تغییر شکل قائم جداساز، از جمع تغییرشکل‌های دو مرحله حاصل خواهد شد [۸]:

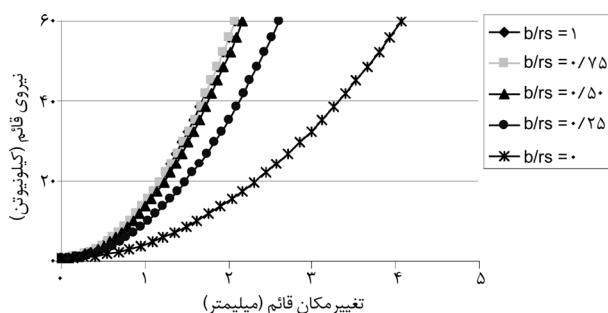
$$\Delta = \left( \frac{32(H-nh)^3}{5\pi D_s^2(D_s^2-D_r^2)(n+1)^2 G_r} + \frac{4H}{E_C \pi D_s^2} \right) F \quad (3)$$

که در آن  $n$ ،  $d$ ،  $G_r$  و  $E_c$  به ترتیب تعداد حلقه‌ها، ضخامت لایه لاستیک بین حلقه‌ها، مدول برشی لاستیک و مدول فشاری آنی لایه مرکب لاستیک-فلز می‌باشند. سختی قائم جداساز مسلح به حلقه‌های فلزی داخلی با قرار دادن نیروی واحد و معکوس کردن تغییرمکان قائم از رابطه (۴) به دست می‌آید.

$$K_V = \left( \frac{32(H-nh)^3}{5\pi D_s^2(D_s^2-D_r^2)(n+1)^2 G_r} + \frac{4H}{E_C \pi D_s^2} \right)^{-1} \quad (4)$$

سختی حلقه‌های فلزی سهم ناچیزی در سختی قائم دارد در صورتیکه این سختی نیز به رابطه (۴) اضافه شود [۸] سختی

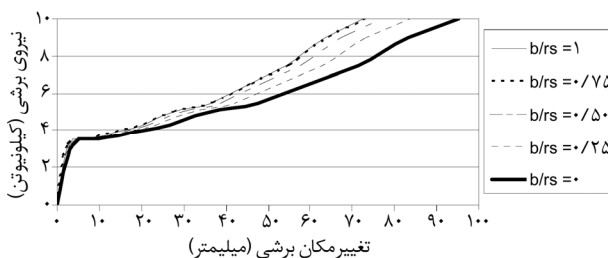
رفتار مدل‌های مورد مطالعه برای بار فشاری ۶ تن که بر روی کل سطح جداسازها بطور یکسان و طی ۳۰ مرحله بتدریج اعمال شده، مورد بررسی قرار گرفته است. در شکل (۵) نمودار نیروی قائم- تغییر شکل قائم جداسازهای مورد مطالعه نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود تغییرمکان قائم جداساز با صفحات فلزی کمتر از تغییرمکان قائم جداسازها با حلقه‌های فلزی می‌باشد بنابراین سختی قائم جداسازها با حلقه‌های فلزی کمتر از جداساز با صفحات فلزی می‌باشد. این کاهش سختی با کم شدن پهنای حلقه‌های فلزی بیشتر شده است.



شکل ۵- منحنی نیروی قائم-تغییرشکل قائم جداسازهای مورد مطالعه.

سختی قائم جداسازها با حلقه‌های فلزی خارجی به طور قابل توجهی کمتر از جداساز با صفحات فلزی می‌باشد. بنابراین استفاده از حلقه‌های داخلی در جداسازها در مقایسه با جداسازها با صفحات فلزی تأثیر چندانی بر سختی قائم جداسازها ندارد و می‌توان به عنوان جداسازهای لرزه‌ای مورد استفاده قرار گیرد. سختی قائم جداساز با حلقه‌های خارجی در مقایسه با جداسازها با صفحات فلزی تقریباً نصف شده است.

در حالیکه بار فشاری به میزان ۶/۴ تن بر روی هر یک از جداسازها ثابت نگه داشته شده، بار برشی ۱ تن بتدرج در طی ۳۰ مرحله به هر یک از جداسازها وارد شده است. در شکل (۶) نمودار نیروی برشی- تغییرمکان برشی جداسازهای مورد مطالعه نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود تغییرمکان افقی جداساز با صفحات فلزی کمتر از تغییرمکان افقی جداسازها با حلقه‌های فلزی می‌باشد؛ بنابراین سختی افقی جداسازها با



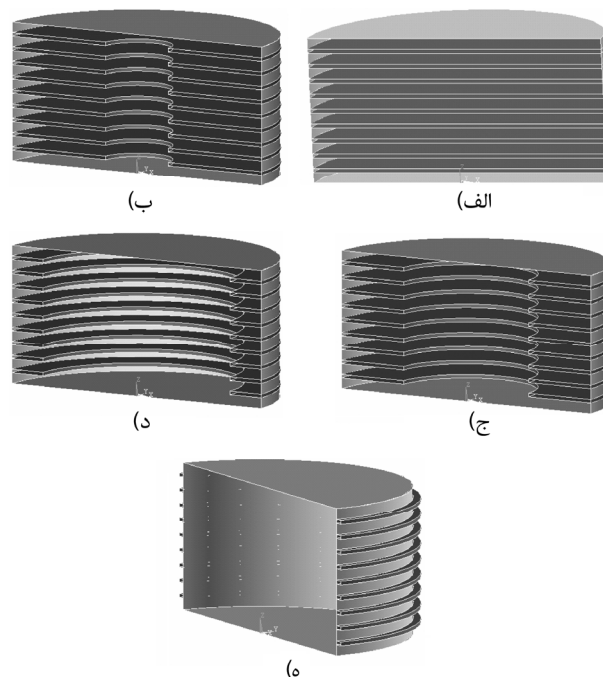
شکل ۶- منحنی نیروی برشی- تغییرمکان برشی در بارگذاری قائم و برشی.

بنابراین ضخامت لایه‌ها در جداساز با صفحات فلزی برابر می‌شود با:

$$d = \frac{D_s}{4S} \Rightarrow d = 6.5mm \quad (8)$$

برای جداسازهای مورد مطالعه در تحلیل اجزای محدود ضخامت لایه‌ها برابر ۶ میلیمتر فرض شده است. در این مطالعه پنج نوع جداساز با نسبت‌های پهنای حلقه داخل لاستیک ( $b$ ) به شعاع جداساز ( $r_s$ ) مطابق شکل (۴) در نظر گرفته شده است. حالتی که نسبت پهنای حلقه داخل لاستیک ( $b$ ) به شعاع

جداساز ( $r_s$ ) برابر یک ( $\frac{b}{r_s} = 1$ ) می‌باشد (شکل ۴- الف)، همان جداساز با صفحات فلزی وجود می‌آید و حالتی که نسبت پهنای حلقه داخل لاستیک به شعاع جداساز برابر صفر ( $\frac{b}{r_s} = 0$ ) در نظر گرفته می‌شود (شکل ۴- ه) جداساز با حلقه‌های فلزی خارجی بوجود می‌آید. شکل‌های (ب)، (ج)، (د) و (ه) معرف جداسازهایی با حلقه‌های فلزی داخلی با پهنای مختلف بین حالت جداساز با صفحات فلزی و جداساز با حلقه‌های فلزی خارجی می‌باشند. تحلیل اجزای محدود مدل‌های معرفی شده به کمک نرم‌افزار *Ansys5.4* انجام شده است [۱۶]. در مدل المان محدود، المان *Hyperelastic58* برای مدل‌سازی لاستیک با ضریب پواسون برابر با  $\nu_r = 0.4999$  در نظر گرفته شده است و برای مدل‌سازی حلقه‌های فلزی از المان *SOLID45* و فلز از جنس *ST 37* استفاده شده است.

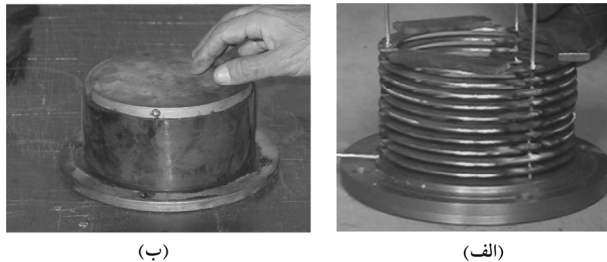


شکل ۴- جداسازهای مورد مطالعه در حالت‌های الف)  $\frac{b}{r_s} = 1$  (ب)  $\frac{b}{r_s} = 0.75$

$$\text{ج) } \frac{b}{r_s} = 0.50 \quad \text{د) } \frac{b}{r_s} = 0.25 \quad \text{ه) } \frac{b}{r_s} = 0$$

#### ۴- فرایند ساخت و ارزیابی آزمایشگاهی عملکرد جداساز

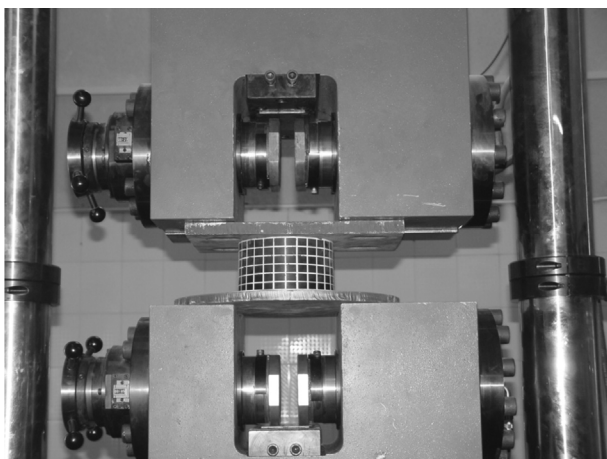
مراحل ساخت جداساز مسلح به حلقه‌های فلزی شامل تهیه قالب، آماده‌سازی حلقه‌ها و آماده‌سازی لاستیک و ترکیب آن با فولاد می‌باشد. ابتدا حلقه‌های فلزی که از فولاد با مقاومت بالا تهیه شده با استفاده از میله‌های مسی توخالی، توسط جوشکاری با فاصله‌های مساوی از همدیگر قرار می‌گیرند (شکل ۹-الف). حلقه‌های مونتاژ شده و تصویر نمونه جداساز پس از مرحله ساخت در شکل (۹) نشان داده شده است.



شکل ۹- ساخت جداساز انتخابی (الف) حلقه‌های مونتاژ شده (ب) نمونه جداساز کامل شده.

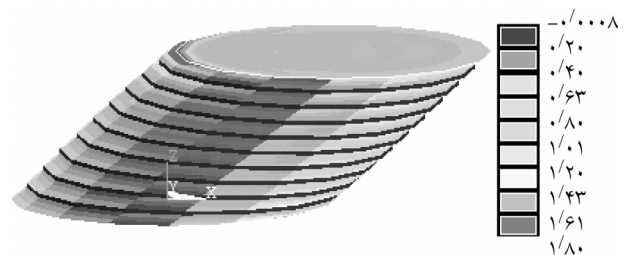
در این تحقیق دو سری آزمایش بر روی جداسازهای ساخته شده انجام شده است. سری اول آزمایشها، بارگذاری قائم نمونه‌ها و سری دوم بارگذاری برشی همزمان با بارگذاری قائم می‌باشد. در این آزمایشها از چیدمان شماره ۱ (شکل ۱۰) برای بارگذاری قائم نمونه‌ها و بررسی عملکرد جداسازها در بارگذاری قائم استفاده شده است.

چیدمان شماره ۲ (شکل ۱۱) به منظور اعمال بارگذاری برشی همزمان با بارگذاری قائم بر نمونه جداساز استفاده شده است [۸]. از جمله مزایای چیدمان شماره ۲، می‌توان به حذف دوران صفحات بالایی و پایینی جداساز اشاره نمود. جزئیات چیدمان شماره ۲ به شرح زیر می‌باشد که در شکل (۱۱) نشان داده شده است.



شکل ۱۰- تصویر چیدمان شماره ۱ [۸].

حلقه‌های فلزی کمتر از سختی افقی جداساز با صفحات فلزی است. این کاهش سختی با کم شدن پهنای حلقه‌های فلزی بیشتر شده است. به دلیل نزدیک بودن تغییرمکان قائم و برشی جداساز با حلقه‌های داخلی در حالت  $\frac{b}{r_s} = 0.25$  به جداساز با صفحات فلزی و ساده بودن روش ساخت آن (داشتن توجیه اقتصادی) نسبت به جداساز با صفحات فلزی این جداساز به عنوان نمونه‌ای از جداسازهای مسلح به حلقه‌های فلزی انتخاب شده است. توزیع کرنش برشی جداساز انتخابی پس از پایان بارگذاری قائم و برشی در شکل (۷) نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود کرنش برشی تحت بار قائم و برشی همزمان در محدوده تماس حلقه‌ها و لاستیک بیشتر از سایر نقاط می‌باشد که حداکثر میزان آن در محل تماس لاستیک به صفحات فوقانی و تحتانی بوجود آمده است. با توجه به اینکه لاستیک قابلیت تحمل کرنشهای زیاد (بیش از ۴۰۰ درصد) را دارد؛ بنابراین مشاهده می‌شود که کرنشهای بوجود آمده در لاستیک در محدوده مناسب می‌باشند.

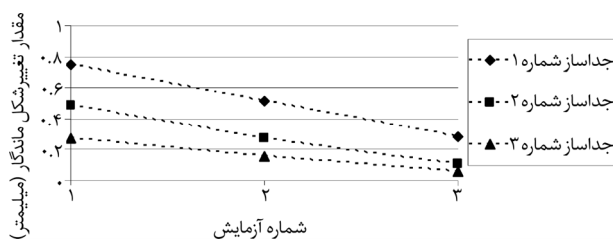


شکل ۷- توزیع کرنش برشی پس از پایان بارگذاری قائم و برشی برای جداساز در حالت  $\frac{b}{r_s} = 0.25$ .

توزیع تنشهای ون میسز برای حلقه‌های فلزی جداسازهای مورد مطالعه پس از پایان بارگذاری قائم و برشی در شکل (۸) نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود تنشها تحت بار قائم و برشی همزمان برای جداسازهای مسلح به حلقه‌های فلزی داخلی و صفحات فلزی برای فلز ST37 در محدوده الاستیک قرار دارد. در صورتیکه در مدل واقعی مقادیر تنش بیش از مدل عددی شود بدلیل موضعی بودن تنش تأثیر چندانی در عملکرد جداساز ندارد.



شکل ۸- توزیع تنش ون میسز پس از پایان بارگذاری قائم و برشی برای جداساز در حالت  $\frac{b}{r_s} = 0.25$

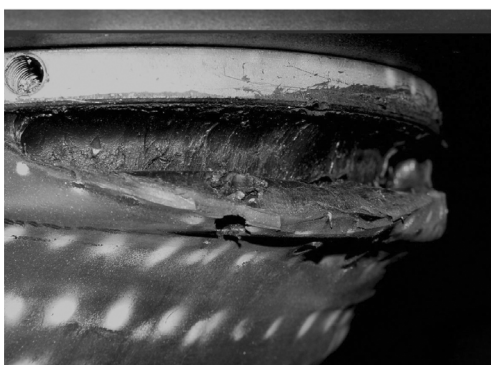


شکل ۱۲- میزان تغییر شکل ماندگار جداسازهای شماره ۱، ۲ و ۳ بعد از باربرداری‌های قائم ۱، ۲ و ۳.

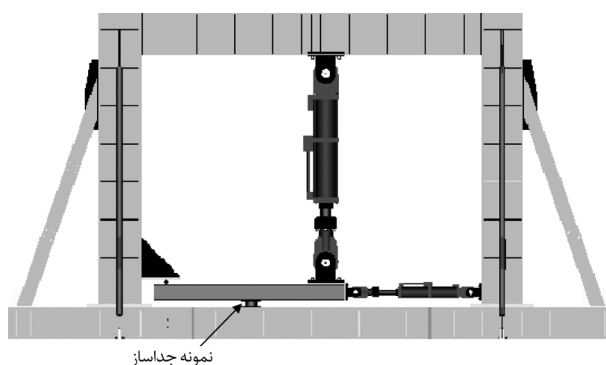
جداسازهای ۱، ۲ و ۳ طبق ضوابط دستورالعمل بهسازی لرزه‌ای ساختمانهای موجود [۱۵] در بحرانی‌ترین حالت بارگذاری قائم یعنی  $1.2DL + 0.5LL$  تحت تغییر مکانهای برشی ۱۰، ۲۰، ...، ۸۰ میلیمتر (آزمایشهای ۱ تا ۸) در ۳ چرخه بارگذاری برای هر دامنه تغییر مکان برشی قرار گرفته‌اند. جداساز شماره ۱ در تغییر شکل برشی بزرگ (آزمایش شماره ۸) از صفحه پایینی جداساز (در منطقه‌ای که کرنشهای بزرگ وجود دارد) جدا شده که این موضوع به دلیل عدم کیفیت چسبهای مصرفی برای چسباندن لاستیک به فلز بوده است (شکل ۱۳). جداساز شماره ۲ نیز در تغییر شکل برشی بزرگ (آزمایش شماره ۸) دچار پارگی در ناحیه نزدیک به صفحه بالایی (در منطقه‌ای که کرنشهای بزرگ وجود دارد) شده که این موضوع به دلیل عدم کنترل دقیق دما در هنگام پخت جداساز می‌باشد (شکل ۱۴).



شکل ۱۳- تصویر جدا شدن لاستیک از صفحه پایینی جداساز شماره ۱ در انتهای بارگذاری شماره ۸.



شکل ۱۴- تصویر بریده شدن لاستیک در ناحیه نزدیک به صفحه بالایی جداساز ۲ در انتهای بارگذاری شماره ۸.



شکل ۱۱- چیدمان شماره ۲ [۸].

۱- یک قاب اصلی که به آن جک افقی برای اعمال بار جانبی (برشی)، جکی برای اعمال بار قائم به نمونه و تیر افقی که به منظور انتقال بار برشی به نمونه جداساز متصل شده است.

۲- جک قائم برای اعمال بارگذاری قائم

۳- جک افقی برای اعمال بارگذاری برشی

۴- تیر افقی که به منظور انتقال بار برشی به نمونه جداساز متصل شده است بصورت اهرمی عمل می‌کند. قسمت انتهایی تیر یک اتصال غلطکی می‌باشد که تکیه‌گاه اهرم است. نمونه جداساز در قسمت میانی آن بصورت تکیه‌گاه دیگر اهرم قرار داده می‌شود. نیروی قائم در انتهای دیگر تیر وارد می‌شود و بدین ترتیب نیروی قائم وارده به نمونه جداساز برآیند نیروی جک قائم و عکس‌العمل تکیه‌گاه انتهایی خواهد بود.

در ابتدا عملکرد نمونه‌ها تحت بارگذاری قائم و سپس عملکرد آنها با چیدمان شماره ۲ تحت بارگذاری قائم و برشی همزمان مورد بررسی قرار گرفته است. نمونه‌های جداسازهای شماره ۱ تا ۳ با چیدمان شماره ۱ تحت بارگذاری قائم در ۳ حالت زیر قرار گرفته‌اند.

۱- تحت بارگذاری قائم بصورت استاتیکی در زمان ۶۰ ثانیه به مقدار ۲ میلیمتر فشار اعمال گردید و پس از گذشت مدت زمان کوتاهی باربرداری شده است.

۲- تحت بارگذاری قائم بصورت استاتیکی در زمان ۶۰ ثانیه به مقدار ۳ میلیمتر فشار اعمال گردید و پس از گذشت مدت زمان کوتاهی باربرداری شده است.

۳- تکرار بارگذاری حالت ۲.

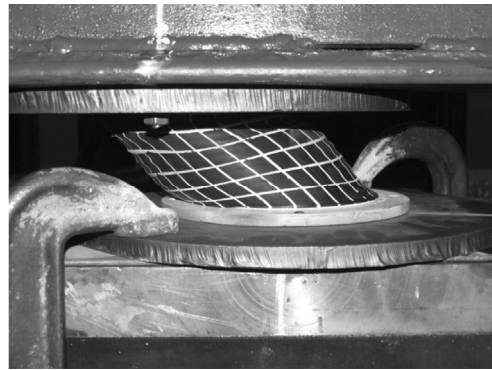
میزان تغییر شکل ماندگار جداسازهای ۱، ۲ و ۳ بعد از پایان بارگذاریهای شماره ۱، ۲ و ۳ در شکل (۱۲) نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود جداساز شماره ۳ میزان افت کمتری نسبت به جداساز شماره ۱ و ۲ داشته که نشان‌دهنده کیفیت خوب این جداساز است.

که در این رابطه  $F^+$  و  $F^-$  نیرو در سیستم جداساز متناظر با تغییرمکانهای نظیر  $\Delta^+$  و  $\Delta^-$  می‌باشند. میرایی مؤثر جداساز ( $\beta_{eff}$ ) برای هر چرخه تغییرشکل از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$\beta_{eff} = \frac{2}{\pi} \left[ \frac{E_{loop}}{K_{eff} (|\Delta^+| + |\Delta^-|)^2} \right] \quad (10)$$

$E_{loop}$

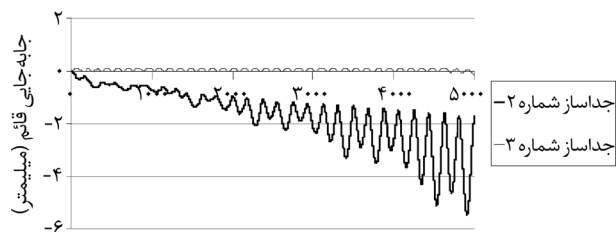
( )



شکل ۱۵- تصویر تغییرشکل جداساز شماره ۳ در انتهای بارگذاری شماره ۸.

بنابراین جداسازهای ۱ و ۲ تحت بارگذاری قائم و برشی همزمان عملکرد مناسبی نداشته که میزان افت جداسازها در بارگذاری قائم نیز مؤید کیفیت نامناسب جداسازهای ۱ و ۲ نسبت به جداساز شماره ۳ می‌باشد. تصویر تغییرشکل جداساز شماره ۳ تحت بارگذاری قائم و برشی شماره ۸ در شکل (۱۵) نشان داده شده که هیچگونه آسیب ناشی از عدم کیفیت ساخت در جداساز تغییر شکل یافته دیده نمی‌شود.

یکی از معیارهایی که بوسیله آن می‌توان عملکرد جداسازها را مورد ارزیابی قرار داد، تفسیر نمودار تغییرمکان قائم جداساز در بارگذاری قائم و برشی همزمان می‌باشد. نمودار تغییرمکان قائم در بارگذاری قائم و برشی همزمان برای جداسازهای ۲ و ۳ در شکل (۱۶) نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود تغییرمکان قائم جداساز شماره ۳ در بارگذاری قائم و برشی همزمان، خیلی کمتر از تغییرمکان قائم جداساز ۲ بوده که نشان‌دهنده رفتار پایدار جداساز شماره ۳ در بارگذاری قائم و برشی همزمان می‌باشد.



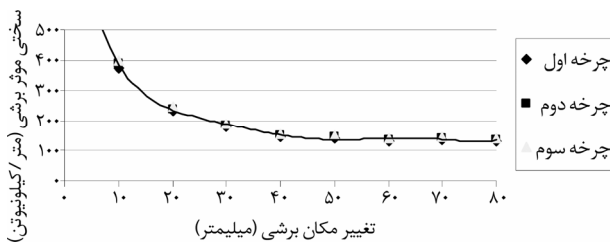
شکل ۱۶- نمودار تغییرمکان قائم در بارگذاری قائم و برشی همزمان جداسازهای شماره ۲ و ۳.

خواص فیزیکی جداساز شماره ۳ به عنوان یک نمونه مناسب محاسبه شده و با نتایج تئوری و عددی با هم مقایسه شده‌اند. سختی مؤثر جداساز ( $K_{eff}$ ) در هر چرخه تغییرشکل برابر است با [۱۵]:

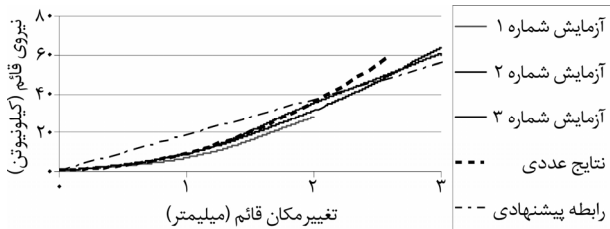
$$K_{eff} = \frac{|F^+| + |F^-|}{|\Delta^+| + |\Delta^-|} \quad (9)$$

( ) ( )

( ) ( )

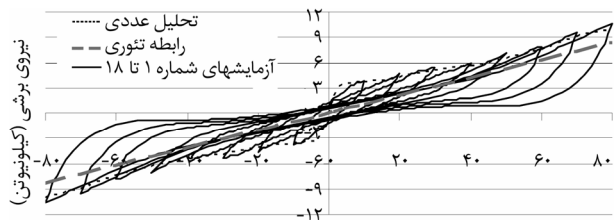


شکل ۱۷- سختی مؤثر برشی جداساز شماره ۳ در سه چرخه آزمایش.



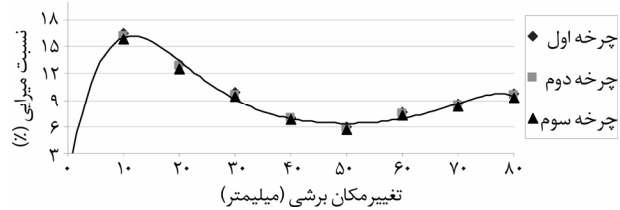
شکل ۱۸- منحنی نیروی قائم- تغییرمکان قائم جداساز شماره ۳ در حالت‌های آزمایش، تئوری و عددی.

همانطور که مشاهده می‌شود نتایج تئوری به نتایج آزمایش بسیار نزدیک است و می‌توان فرمول تئوری پیشنهادی را در طراحی جداسازهای مورد نظر استفاده کرد. همچنین منحنی نیروی برشی- تغییرمکان برشی جداساز در حالت‌های آزمایش، تئوری (مدل برشی) و تحلیلی (مدل عددی) در شکل (۱۹) نشان داده شده است. همانطور که در این شکل نیز مشاهده می‌شود نتایج تحلیلی و آزمایشگاهی انطباق نسبتاً مناسبی با یکدیگر دارند اما نتایج تئوری نشان‌دهنده سختی کمتری نسبت به نتایج آزمایشگاهی و عددی می‌باشد. دلیل این امر صرفنظر از اثر حلقه‌ها در رابطه تئوری ( $K_H = G_r A/H$ ) می‌باشد. با توجه به رابطه (۱۰) نسبت میرایی مؤثر جداساز شماره ۳ در شکل (۲۰) نشان داده شده است.

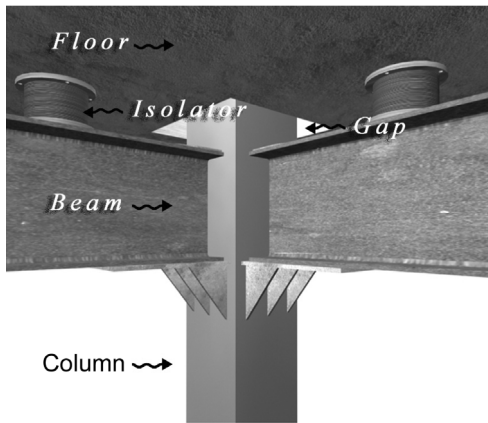


تغییر مکان برشی (میلیمتر)

شکل ۱۹- منحنی نیروی برشی تغییر مکان برشی جداساز شماره ۳ در حالت‌های آزمایش، تئوری و عددی.



شکل ۲۰- نسبت میرایی مؤثر جداساز شماره ۳.



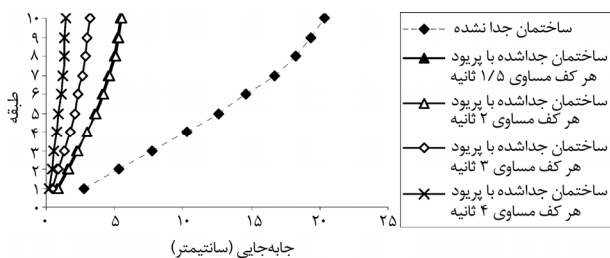
شکل ۲۱- جزئیات پیشنهادی ساختمانها با سیستم جدا شده کف طبقات [۸].

همانطور که مشاهده می‌شود مقدار نسبت میرایی در تغییر شکلهای برشی کوچک مقدار قابل توجهی می‌باشد (حدود ۱۶٪). که دلیل آن وجود میله‌های مسی مونتاژکننده است اما در تغییر شکلهای بزرگ اثر این میله‌ها عملاً از سیستم خارج می‌شوند. البته در تغییرشکلهای خیلی بزرگ مقدار میرایی (حدود ۹/۵٪) نسبتاً قابل توجه است که این موضوع می‌تواند به علت جذب انرژی حلقه‌های فولادی در تغییر شکلهای بزرگ باشد.

### ۵- کاربرد جداساز در جداسازی کف طبقات

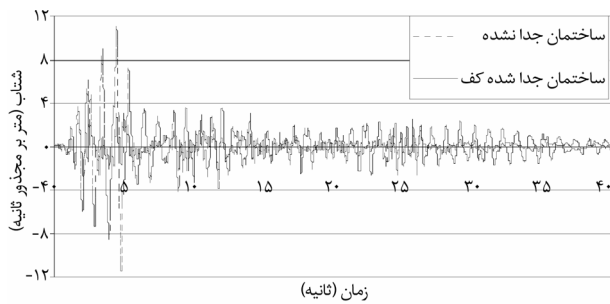
جرم منشأ اصلی تولید نیروهای لرزهای می‌باشد و قسمت عمده جرم ساختمانها در کف طبقات قرار گرفته و قسمت کمتری از آن در اسکلت ساختمان متمرکز می‌باشد، بنابراین با جدا کردن کف طبقات از اسکلت ساختمان و قرار دادن سیستم جداساز مناسب بین کف و اسکلت می‌توان نیروهای لرزهای را در سازه کاهش داد. روش ساخت این ساختمانها بدین صورت می‌باشد که ابتدا سازه اصلی (تیرها و ستونها) اجرا می‌شود، سپس جداسازها بر روی تیرهای اصلی قرار می‌گیرند و در آخر کفها بر روی جداسازها اجرا می‌شوند. جزئیات اتصال سقف به تیرها و موقعیت جداسازها در این ساختمانها در شکل (۲۱) نشان داده شده است [برای جزئیات بیشتر به مرجع ۸ رجوع شود].

ACI

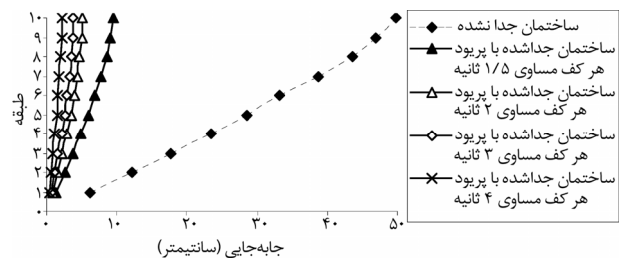


شکل ۲۲- حداکثر جابه‌جایی سازه اصلی با نسبت میرایی هر کف مساوی ۰/۱۰ تحت زلزله ال سنترو.





شکل ۲۶- تاریخچه شتاب کف طبقه آخر تحت زلزله ال سنترو.



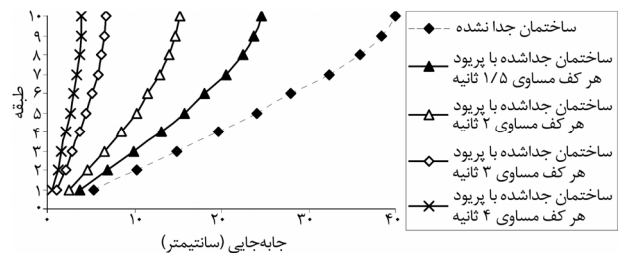
شکل ۲۳- حداکثر جابه‌جایی سازه اصلی با نسبت میرایی هر کف مساوی ۰/۱۰ تحت زلزله کوبه.

## ۶- نتیجه‌گیری

مطابق اصول پایه در جداسازهای الاستومری قسمت میانی جداساز دارای یک تنش غالب هیدرواستاتیک است. بنابراین مسلح کردن قسمت میانی جداسازهای الاستومری با استفاده از فلز ضروری نیست که بر این اساس در این تحقیق استفاده از حلقه‌های فلزی به جای صفحات فلزی پیشنهاد شده است. همچنین در این مقاله رابطه‌ای جهت محاسبه سختی قائم جداسازهای پیشنهادی ارائه شده که با توجه به نزدیک بودن نتایج رابطه تئوری به نتایج عددی و آزمایشگاهی به عنوان رابطه‌ای جهت مقاصد طراحی می‌توان از آن استفاده کرد. بررسی عددی و آزمایشگاهی جداسازهای پیشنهادی نشان دهنده آن است که عملکرد جداسازهای مسلح به حلقه‌های فلزی نزدیک به عملکرد جداسازها با صفحات فلزی است. در نتیجه می‌توان گفت که این جداسازها برای جداسازی لرزه‌ای براحتی قابل استفاده خواهند بود. همچنین پیشنهاد می‌شود که میزان تغییر شکل ماندگار جداسازها در بارگذاری قائم و بارگذاری برشی و قائم به عنوان معیار کنترل کیفیت در آیین‌نامه‌های مربوط به جداسازها در نظر گرفته شود. از این جداسازها به عنوان نمونه کاربردی در جداسازی کف طبقات استفاده شده است و نتایج نشان داده‌اند که ساختمانهای جدا شده کف طبقات را می‌توان به عنوان یکی از روشهای کنترل سازه‌ها در برابر تحریکات لرزه‌ای در نظر گرفت. با توجه به عملکرد مناسب و داشتن توجیه اقتصادی این جداسازها می‌توان ایده استفاده از سیستمهای جدا شده کف طبقات را با استفاده از این جداسازها عملی نمود.

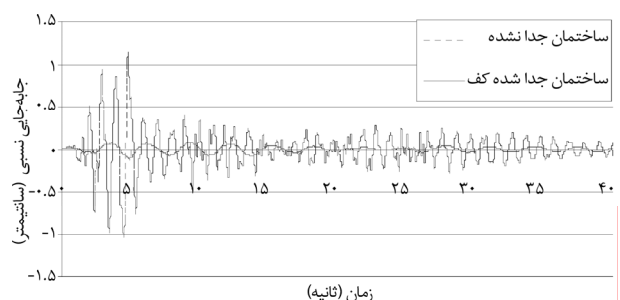
## مراجع

1. Skinner, R.I., Robinson, W.H., and McVerry, G.H. (1993). "An Introduction to Seismic Isolation", John Wiley and Sons, New York.
2. Naeim, F. and Kelly, J.M. (1999). "Design of Seismic Isolated Structure, from Theory to Practice", John Wiley and Sons, New York.



شکل ۲۴- حداکثر جابه‌جایی سازه اصلی با نسبت میرایی هر کف مساوی ۰/۱۰ تحت زلزله بم.

جابه‌جایی نسبی و شتاب طبقات از معیارهای مهم طراحی سازه‌ها در برابر زلزله مخصوصاً طراحی سازه‌های بلند می‌باشند. بعنوان نمونه تاریخچه جابه‌جایی نسبی سازه اصلی (اسکلت) طبقه آخر و تاریخچه شتاب کف طبقه آخر برای ساختمان جدا شده و ساختمان جدا شده کف طبقات با نسبت میرایی هر کف مساوی ۱۰ درصد و پرود هر کف مساوی ۳ ثانیه در زلزله ال سنترو در شکل‌های (۲۵) و (۲۶) نشان داده شده است. شکل‌های (۲۵) و (۲۶) نشان دهنده نرم‌تر شدن حرکت سازه و کاهش شتاب کف ساختمان جدا شده کف نسبت به ساختمان جدا شده کف می‌باشد که موجب ایمنی و آسایش بیشتر ساکنین و محافظت بیشتر اعضای غیرسازه‌ای می‌شود.



شکل ۲۵- تاریخچه جابه‌جایی نسبی طبقه آخر سازه اصلی تحت زلزله ال سنترو.

10. Yaghoubian, J. (1991). "Isolation Building Contents from Earthquake Induced Floor Motions", *Earthquake Spectra*, **7**, 127-143,
11. Ahmadi, H., Fuller, K., and Goodchild, I. (2004). "Novel Devices for the Isolation of Floors Against Earthquakes and Ambient Vibration", *13<sup>th</sup> World Conf. on Earthquake Engineering*, No. 2216, Vancouver.
12. Ziyaeifar, M. and Sarem, M.J. (2003). "Hydraulic Isolators for Industrial Applications", *8<sup>th</sup> World Seminar on Seismic Isolation, Energy Dissipation and Active Vibration Control of Structures*, Yerevan, Armenia.
13. ASTM (1996). "Annual Book of ASTM Standards", American Society for Testing and Materials: Washington, Dc, 1996.
14. FEMA 274 (1998). "Seismic Rehabilitation Commentary", Chapter 9: Seismic Isolation and Energy Dissipation, Federal Emergency Management: Washington, DC.
۱۵. "دستورالعمل بهسازی لرزه‌ای ساختمانهای موجود" (۱۳۸۱). پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله.
16. ANSYS (VER, 5.4), Reference Manuals (Theory, Element, Analysis Guide, and Omments), SAS IP Inc.
۱۷. آیین‌نامه طراحی ساختمانها در برابر زلزله استاندارد ۲۸۰۰ ویرایش دوم (۱۳۷۸). مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن.
3. Gerspacher, M., Ofarrel, C.P., and Yang, H.H., (1996). "Role of Carbon Black Distribution/ Distribution on Rubber Compound Properties", *International Rubber Conference*, Manchester, UK.
4. Derham, C.J. (1985). "Vibration Isolation and Earthquake Protection of Buildings", *Progress Rubber and Plastics Technology*, **1**(3).
5. Ziyaeifar, M. (2001). "Current R and D on Passive Energy Dissipation and Seismic Isolation Techniques in Iran", *7<sup>th</sup> International Seminar on Seismic Isolation, Passive Energy Dissipation and Active Vibration Control of Structures*, Assisi, Italy.
6. Pourmohammad, H., Ziyaeifar, M., and Ghafory-Ashtiany, M. (2004). "Analytic Study of Floor Isolation System", *13<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering*, No. 3372, Vancouver.
7. Pourmohammad, H., Ziyaeifar, M., and Ghafory-Ashtiany, M. (2004). "Floor Isolation System (FIS)", *Earthquake Preparedness: Colloquium on Seismic Isolation, Seminar on Seismic Isolation*, Tehran.
۸. پورمحمد، ح. (۱۳۸۴). "مطالعه تحلیلی و آزمایشگاهی جداسازی کف طبقات در طراحی لرزه‌ای سازه‌ها"، پایان‌نامه دکتر، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات.
۹. پورمحمد، ح.، ضیائی‌فر، م.، و غفوری-آشتیانی م. (۱۳۸۲). "بررسی عملکرد جداسازی کف طبقات"، چهارمین کنفرانس بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران.