

معرفی جفت غلتکهای متعامد بر بسترهای کاو با قوس دایره‌ای به عنوان جداساز لرزه‌ای: بررسیهای عددی و آزمایشگاهی

محمود حسینی، دانشیار، پژوهشکده مهندسی سازه، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله
امیرحسین سرور، فارغ‌التحصیل کارشناسی ارشد مهندسی زلزله، واحد علوم و تحقیقات دانشگاه آزاد اسلامی، تهران

چکیده

فولاد $(MO40)$ ساخته شده باشد، جداسازها می‌توانند به صورت کاملاً مؤثر در ساختمانهای تا ۱۴ طبقه مورد استفاده قرار گیرند.
کلیدواژه‌ها: جداساز لرزه‌ای، غلتکهای متعامد، مقاومت غلتشی، تحلیل اجزاء محدود با نرم‌افزار *ABAQUS*

۱- مقدمه

مفهوم جداسازی لرزه‌ای بسیار ساده است. سیستم جداساز، با سختی افقی پائینی که بین سازه و پی ایجاد می‌کند، ساختمان یا سازه را از مؤلفه‌های افقی حرکت زمین جدا می‌سازد. این عمل سیستمی را به وجود می‌آورد که فرکانس پایه آن بسیار پایین‌تر از فرکانس‌های غالب زمین‌لرزه و نیز فرکانس پایه همان ساختمان با اتصال گیردار می‌باشد. در نخستین مود دینامیکی سازه جداسازی شده، تغییرشکل فقط در سیستم جداساز به وجود می‌آید و روسازه تقریباً صلب رفتار می‌کند. مودهای بالاتر که می‌توانند باعث تغییرشکل در سازه شوند بر مود اول عمودند و در نتیجه در حرکت تأثیر چندانی ندارند و بالطبع انرژی زلزله در این مودهای بالا نمی‌تواند به سازه منتقل گردد. سیستم جداساز معمولاً انرژی زمین‌لرزه را جذب نمی‌کند، بلکه با استفاده از تغییر در ویژگی‌های رفتار دینامیکی سیستم از انتقال آن به سازه پیش‌گیری می‌نماید [۱].

۲- مروری بر مطالعات گذشته

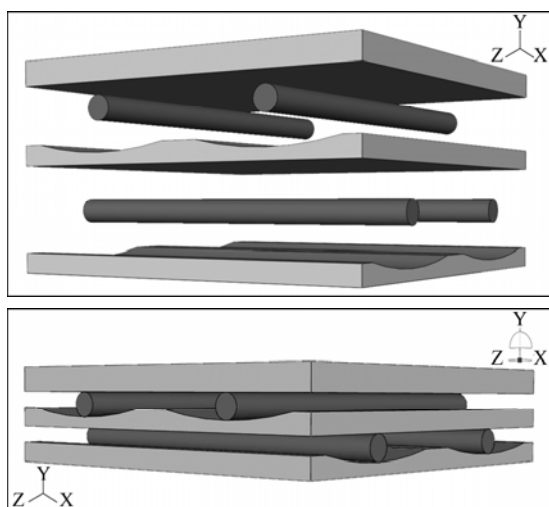
طی دهه‌های اخیر بررسی جداسازهای لرزه‌ای مختلف با توجه به رشد نیاز عملی به آنها گسترش یافته است، از میان انواع متداول‌تر می‌توان به جداسازهای الاستومری (*Lead-Rubber Bearing - LRB*)، جداسازهای الاستومری

جداسازی لرزه‌ای، یکی از فنون ارائه شده در مهندسی سازه با فلسفه کاهش یا حذف پتانسیل خسارت زمین‌لرزه است، که با ارائه سیستم‌های کارا و مؤثر در این زمینه می‌توان تلفات جانی و مالی حاصل از زلزله را به حداقل رساند. در این مقاله با تحلیل‌های عددی و آزمایشگاهی به بررسی یک نوع از جداسازهای غلتشی جهت استفاده در ساختمانهای کوتاه تا متوسط پرداخته شده که به صورت جفت غلتکهای متعامد واقع بر بسترهای کاو با قوس دایره‌ای می‌باشند و حرکت سازه در تمام امتدادهای افقی را مقدور می‌سازند. بستر قوسی کاو به سیستم جداساز توانایی بازگشتن به موقعیت اولیه و نیز سختی مؤثر فزاینده می‌دهد. از محاسن سیستم پیشنهادی در مقایسه با سایر سیستم‌های موجود نظیر جداسازهای الاستومر و اصطکاکی می‌توان به عدم احتیاج به تکنولوژی پیشرفته جهت تولید و نصب و همچنین اقتصادی بودن آن اشاره کرد. نتایج ارائه شده در این مقاله شامل خروجی‌های تحلیل‌های عددی با روش اجزاء محدود با استفاده از نرم‌افزار *ABAQUS* جهت به دست آوردن نمودارهای نیرو-جابجایی در راستای افقی تحت بارهای قائم مختلف می‌باشد که صحت آنها از طریق مطالعات آزمایشگاهی مورد تأیید قرار گرفته است. نمونه آزمایشی تا ۷۰ تن بار قائم، که تقریباً معادل با بار قائم متوسط وارد بر پی در یک ساختمان ۴ طبقه می‌باشد، به وسیله تحریک‌کننده‌های افقی و قائم بارگذاری شده است. پس از راستی سنجی انجام شده جهت اطمینان از مدل‌سازی عددی، با استفاده از نرم‌افزار *ABAQUS*، تسلیم نشدن غلتکها تحت اثر بار قائم با استفاده از معیار تسلیم *von Mises* بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهند، اگر کل قطعات سیستم جداساز از فولاد با مقاومت بالا (برای مثال

توسط لی و لیانگ در سال ۲۰۰۳ و نیز وو و همکاران در سال ۲۰۰۴ ارائه شد [۷-۸]، که در واقع این سطح شیبدار نقش مولد نیروی بازگرداننده را دارا می‌باشد. تسائی و همکاران در سال ۲۰۰۷ پاسخ لرزه‌ای یک پل در مقیاس ۷/۵ برابر کوچکتر و جداسازی شده با سیستم *RTB* را بررسی کردند [۹]. در این سیستم هنگامی که غلتش آغاز می‌شود یک نیروی افقی ثابت از طریق جداساز به پل منتقل می‌گردد و از آنجا که همیشه بر روی یک سطح مقاومت غلتشی کمتر از مقاومت لغزشی می‌باشد، نیروی منتقل شده در حالت غلتش کمتر از نیروی منتقل شده در حالت لغزش است. همچنین نیروی بازگرداننده از وزن روسازه که بر روی سطح شیبدار بالا می‌رود، تأمین می‌شود. نتایج آزمایش این پل نشان داد که سیستم *RTB* یک سیستم جداسازی لرزه‌ای مؤثر و کارا جهت کاهش پاسخهای لرزه‌ای می‌باشد.

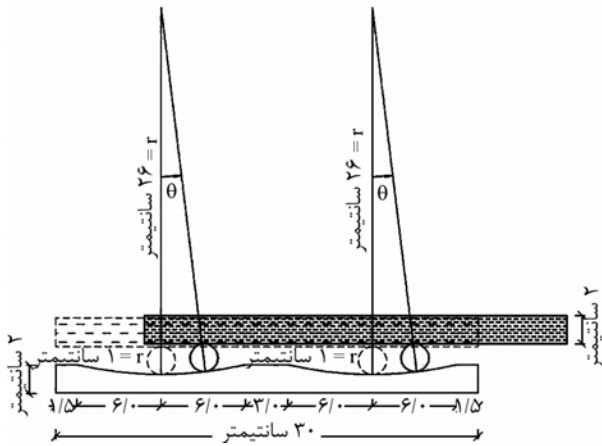
۳- معرفی سیستم جفت غلتکهای متعامد

در ادامه مطالعات انجام شده، کنگرلو [۱۰] در سال ۱۳۸۵ و کنگرلو و حسینی [۱۱] در سال ۱۳۸۶ و همچنین حسینی و کنگرلو در سال ۲۰۰۷ سیستم جفت غلتکهای متعامد واقع بر بسترهای مقعر (کاو) با قوس دایره‌ای را ارائه کردند [۱۲]، که طرح کلی آن در شکل (۱)، نمونه آزمایشگاهی آن در تصویر (۱)، خصوصیات هندسی آن در شکل (۲) و مشخصات آلیاژ استفاده شده جهت ساخت آن در استانداردهای مختلف به همراه ترکیبات شیمیایی آن و تنش تسلیم آلیاژ در جدول (۱) نشان داده شده است.

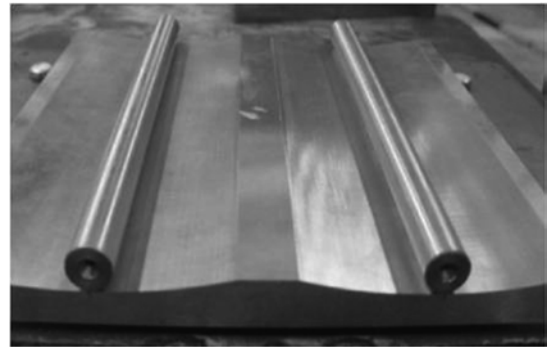
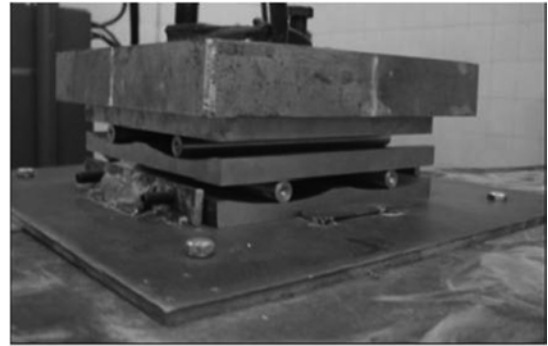


شکل (۱): شمای کلی سیستم جداساز پیشنهاد شده.

با میرایی بالا (*High-damping Rubber Bearing - HRB*) و جداسازهای اصطکاکی پاندولی (*Friction Pendulum System - FPS*) اشاره کرد، زیرا این جداسازها به خوبی سه معیار اصلی برای جداسازها که عبارتند از سادگی، قابلیت اعتماد و اقتصادی بودن را دارا می‌باشند [۲]. وجود یک سطح منحنی لغزشی در سیستم *FPS* با استفاده از وزن روسازه ایجاد یک نیروی ذخیره شونده در سیستم می‌نماید، هرچند که وجود نیروی اصطکاک لغزشی سبب انتقال نیروی افقی به روسازه می‌شود. یک راه حل مؤثر برای کاهش بیشتر این نیروی منتقل شده، استفاده از سیستم غلتشی به جای سیستم لغزشی است، زیرا مقدار مقاومت غلتشی معمولاً بسیار کمتر از مقاومت لغزشی است. با توجه به این موضوع لین و هون در ۱۹۹۳ یک سیستم جداساز لرزه‌ای در قالب میله‌های غلتان را بررسی کردند [۳]. همچنین لین و همکاران در سال ۱۹۹۵ یک قاب یک طبقه را با استفاده از جداسازهای غلتکی بر روی میز لرزان بررسی کردند [۴]. در مطالعات آنها میله‌های غلتان بدون نیروی بازگرداننده بودند که در نتیجه مقادیر زیاد جابه‌جایی ماندگار در روسازه به وجود می‌آمد. برای فائق آمدن بر این مشکل جنگید و لاندهی در سال ۱۹۹۸ به جای استفاده از غلتکهای دایره‌ای شکل، استفاده از غلتکهای بیضی شکل را پیشنهاد کردند [۵]. البته استفاده از غلتکهای بیضی شکل سبب ایجاد مقداری شتاب قائم در روسازه می‌شود. راهکار دیگر استفاده از قطعاتی می‌باشد که همراه با غلتکهای دایره‌ای شکل بتوانند برای محدود ساختن جابه‌جایی‌ها به سیستم نیروی بازگرداننده بدهند. جنگید در سال ۲۰۰۰ پاسخ لرزه‌ای ساختمانی نصب شده بر روی میله‌های غلتان همراه با قطعات بازگرداننده را تحت تحریکات نامانای زلزله بررسی کرد [۶]. او نشان داد که استفاده از میله‌های غلتان در کاهش پاسخهای لرزه‌ای کاملاً مؤثر می‌باشد و همچنین وجود یک نیروی بازگرداننده به صورت قابل توجهی جابه‌جایی‌ها را بدون انتقال شتاب اضافه به روسازه کاهش می‌دهد. در این راستا یک نوع جداساز غلتان روی سطح شیبدار (*Sloped Rolling-Type Bearing - RTB*) که به صورت میله‌های غلتان فولادی روی سطح *V* شکل می‌باشد



شکل (۲): خصوصیات هندسی نمونه آزمایشگاهی غلتکهای متعامد.



تصویر (۱): نمونه آزمایشگاهی غلتکهای متعامد بر بستر دایره‌ای شکل.

جهت افقی به صورت آزاد حرکت کند و بستر کاو دایره‌ای، نیروی بازگرداننده به سیستم دهد. در اولین مراحل انجام آزمایش مشاهده شد که موازی قرار دادن غلتکها در هنگام نصب برای آزمایش به آسانی مقدور نمی‌باشد [۱۱]، و حتی اگر آنها موازی قرار داده شوند نیز در حین انجام آزمایش این حالت توازی به دلیل شوکهای دینامیکی نمی‌تواند برقرار بماند. به عبارت دیگر امکان دارد یکی از غلتکها ساکن مانده، در حالی که غلتک بعدی به حرکت در آمده باشد و در این صورت غلتکها دیگر آن چنان که انتظار می‌رفت به صورت موازی و هم‌زمان حرکت کنند، عمل نخواهند نمود. امکان وقوع این پدیده به خصوص به دلیل حضور مؤلفه قائم هنگام

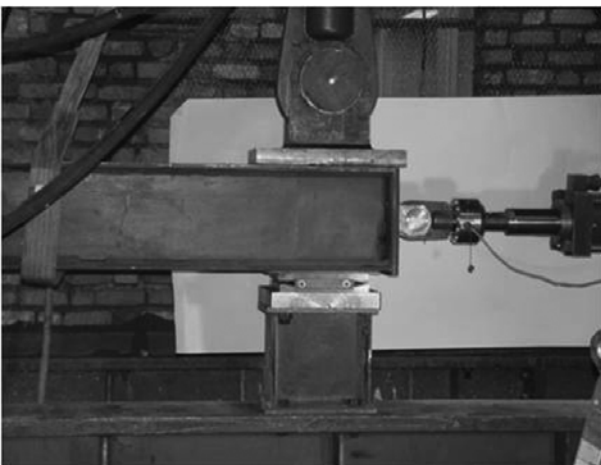
سیستم پیشنهاد شده به صورت کلی شامل دو جفت غلتک عمود بر هم می‌باشد، که همان گونه که در تصویر (۱) نشان داده شده، می‌توانند به صورت جداگانه روی بسترهای استوانه‌ای شکل حرکت کنند. همان طور که در شکل (۲) دیده می‌شود، استفاده از غلتکهای متعامد باعث می‌شود تا صفحه بالایی در هر

جدول (۱): نامگذاری آلیاژ استفاده شده جهت ساخت OPRCB در استانداردهای مختلف به همراه ترکیبات شیمیایی آن و تنش تسلیم آلیاژ استفاده شده.

گروه فولاد		نامگذاری بر اساس استانداردهای مختلف							کاربرد				
فولادهای قابل عملیات حرارتی (آلیاژهای با کیفیت بالا)	مارک فولاد آلیاژی اصفهان IASC MARK	مشخصه فولاد SYMBOL DIN	آلمان DIN	زارشتال (روشلیتگ) SARSTAHL ROCHLING	بریتانیا B.S.	سوئد SWEDEN	آمریکا A.I.S.I. SAE/ASTM	چرخ‌های دنده دارف پنیونها، شاتونها، غلتکهای صنایع سیمان و فولاد، پیچ‌های مقاوم، میله‌های اتصال					
	IASCV۲۲۵	۴۲ CrMo۴	۱/۷۲۲۵	MO۴۰	۷۰۸M۴۰	۴۲CrMo۴	۴۱۴۰(SAE)						
Si		S		P		Mo		Mn		Cr		C	
از		از		از		از		از		از		از	
۶/۰		۰/۰۱۵		۰/۰۲		۰/۳		۱		۱/۲		۰/۴۵	
تنش تسلیم بر اساس کتاب فولاد (Key to Steel ۱۹۹۵) برابر با ۹۰۰ نیوتن بر میلیمتر مربع (MPa) می‌باشد.													

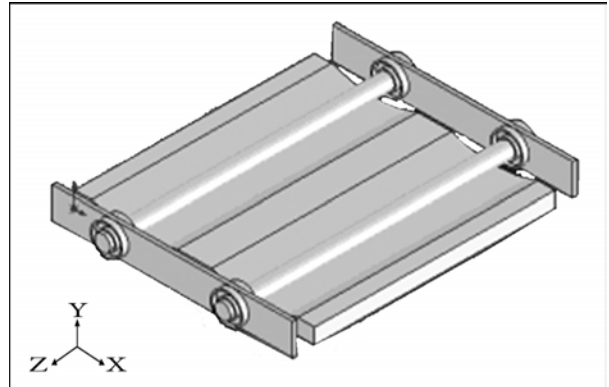
نشان داده شده است، تحت اثر توأم بارهای قائم و افقی تحریک شد. به این ترتیب که در هر آزمایش بار ثابت مشخصی به صورت قائم به سیستم اعمال شد و به ازای هر کدام از این مقادیر، نیروی افقی لازم برای حرکت به صورت رفت و برگشتی تا دامنه‌ای مشخص اندازه‌گیری شد. حداکثر بار قائم اعمال شده به سیستم ۷۰ تن بود که حدوداً معادل با بار قائم وارد شده از ستون بر پی در یک ساختمان چهار طبقه جداسازی شده می‌باشد. همان گونه که انتظار می‌رفت، رفتار سخت شونده غلتکها در نتایج آزمایشگاهی مشهود بود.

منحنی‌های هیستریزس جداساز پیشنهادی تحت بارهای قائم مختلف توسط کنگرلو و حسینی [۱۱] به دست آمده‌اند که سه نمونه از آنها تحت بار قائم ۴۵۰، ۵۰۰ و ۶۰۰ کیلونیوتن همراه با جابه‌جایی افقی حداکثر ۳ یا ۴ سانتیمتر در اشکال (۴) تا (۶) نشان داده شده‌اند.



تصویر (۲): یک جفت غلتک متعامد در آزمایش شبه دینامیکی تحت بار قائم ثابت و جابه‌جایی افقی متغیر.

زلزله افزایش می‌یابد. در نتیجه برای این که غلتکها حرکت مناسبی داشته باشد همچنان که در شکل (۳) مشاهده می‌شود، انتهای غلتکها به وسیله دو صفحه انتهایی همراه با اتصال بالبرینگ به یکدیگر متصل شده‌اند.



شکل (۳): استفاده از صفحات انتهایی همراه با اتصال بالبرینگ (ball bearing) برای حفظ متوازی بودن حرکت غلتکها.

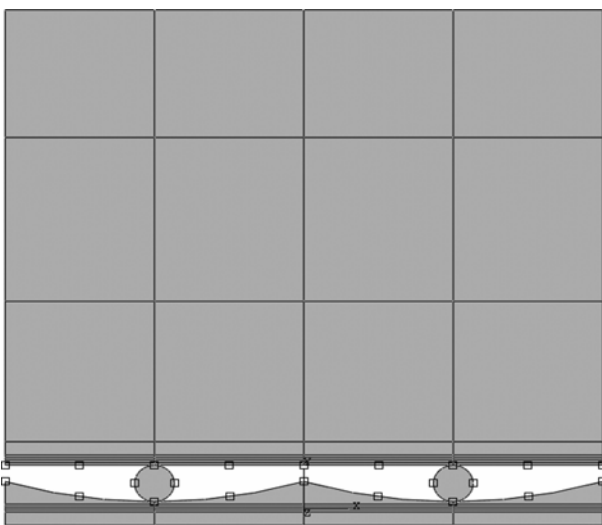
۴- مطالعات آزمایشگاهی غلتکهای متعامد

جهت بررسی عملکرد سیستم جداساز پیشنهادی در جهات مختلف، مدل آزمایشگاهی دارای ابعاد نشان داده شده در تصویر (۱) تهیه و به صورت ۴۵ درجه بر روی میز لرزان نصب شد و دو شتاب‌سنج در دو راستای افقی متعامد به صفحه فوقانی آن متصل گردید. به میز لرزان نوسانات سینوسی با فرکانس‌های ۰/۲۵، ۰/۵۰، ۱/۰، ۳/۰ و ۵/۰ هرتز و همچنین زلزله ال‌سنتر و وارد گردید، و از سربارهای ۵۰، ۱۱۰ و ۴۰۰ کیلوگرم بر روی جداساز استفاده شد. در هر حالت، مؤلفه‌های شتاب صفحه فوقانی در دو جهت X و Y ثبت و توسط برنامه *SeismoSignal* رسم شدند [۱۲]. نتایج کامل آزمایش‌های میز لرزان در مرجع [۹] موجود می‌باشد. پاسخهای به دست آمده از آزمایشهای میز لرزان حاکی از تجزیه شدن کامل حرکت افقی بر روی غلتکهای متعامد می‌باشد. این مطلب بیانگر توانایی آزادی حرکت در تمام جهات در صفحه افقی است.

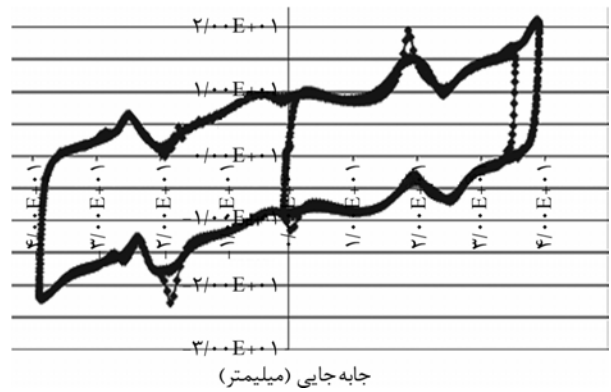
همان طور که انتظار می‌رفت، با تغییرات وزن سربار تغییری در پیروید طبیعی سیستم مشاهده نشد. به عنوان مرحله دوم آزمایش صفحه بالایی نمونه به وسیله تحریک کننده‌ها (*Actuators*)، همان طور که در تصویر (۲)

حداکثر باری که می‌توان بر این سیستم اعمال کرد، به تحلیل عددی سیستم با استفاده از نرم‌افزار *ABAQUS* پرداخته شد. با توجه به این که هر حرکتی که به سیستم جداساز اعمال شود به دو مؤلفه متعامد تجزیه می‌گردد، فقط یک جفت از غلتکهای متعامد به صورت دو بعدی در نرم‌افزار مدل شدند. البته مطالعه کامل رفتار غلتکها در حالتی که ساختمان دارای رفتار پیچشی باشد باید به صورت سه بعدی صورت گیرد. در مدول *Part* نرم‌افزار *ABAQUS* چهار قطعه شامل صفحات بالا و پایین و غلتکهای بین این دو صفحه تعریف شدند. در مدول *Interaction* به معرفی اندرکنش افقی سطوح خارجی این قطعات با یکدیگر، با استفاده از معادله اصطکاکی *Penalty* با ضریب اصطکاک 0.35 و همچنین اندرکنش قائم بین سطوح پرداخته شد، به نحوی که سطح صفحات بالا و پایینی به عنوان *Master* و سطح غلتکها به عنوان *Slave* انتخاب شدند. با توجه به این که در آزمایشگاه یک تیرآهن با نمره بالا واسطه اعمال جابه‌جایی افقی به صفحه فوقانی بود، در مدلسازی همان گونه که در شکل (۷) مشاهده می‌شود، ضخامتی معادل با ارتفاع آن تیرآهن در نظر گرفته شد. ابعاد مدل در نرم‌افزار تطابق کامل با نمونه آزمایشگاهی دارد.

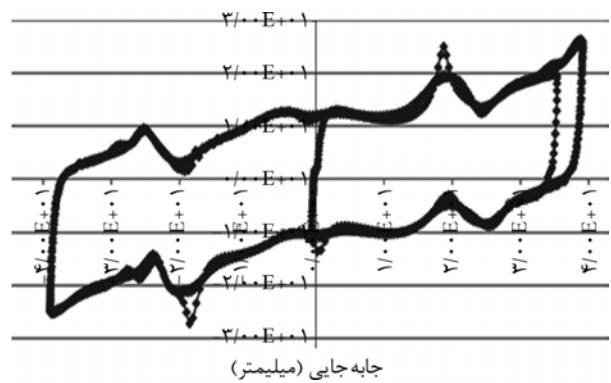
رفتار ماده متشکله جداساز و اجزای آن به صورت کاملاً کشسان و خطی با مدول الاستیسیته 2100000 کیلوگرم بر سانتیمتر مربع و ضریب پواسون 0.3 در نظر گرفته شد.



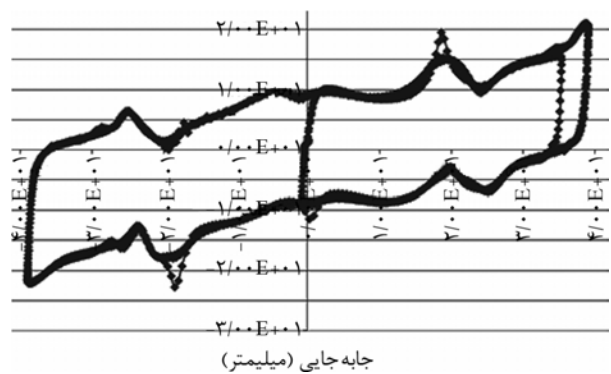
شکل (۷): جداساز مدل شده در *ABAQUS*.



شکل (۴): منحنی رفتار نمونه آزمایشگاهی تحت بار قائم 450 کیلونیوتن و جابه‌جایی افقی حداکثر 4 سانتیمتر.



شکل (۵): منحنی رفتار نمونه آزمایشگاهی تحت بار قائم 500 کیلونیوتن و جابه‌جایی افقی حداکثر 4 سانتیمتر.



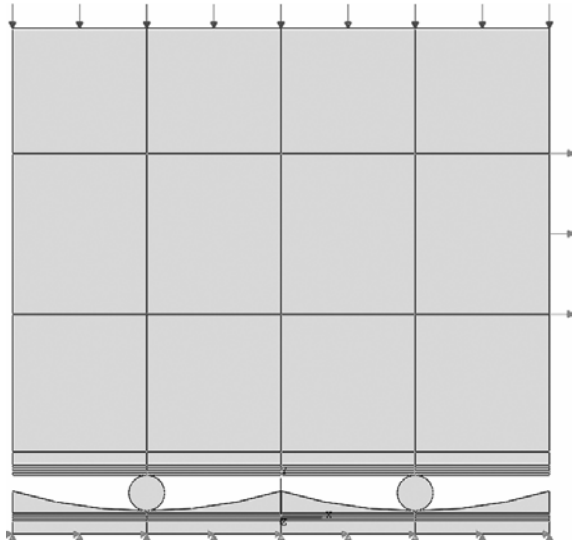
شکل (۶): منحنی رفتار نمونه آزمایشگاهی تحت بار قائم 600 کیلونیوتن و جابه‌جایی افقی حداکثر 3 سانتیمتر.

در اشکال (۴) تا (۶) محور افقی نشان دهنده جابه‌جایی بر حسب میلی‌متر و محور قائم نشان دهنده نیروی لازم جهت به دست آوردن این جابه‌جایی بر حسب کیلونیوتن می‌باشد.

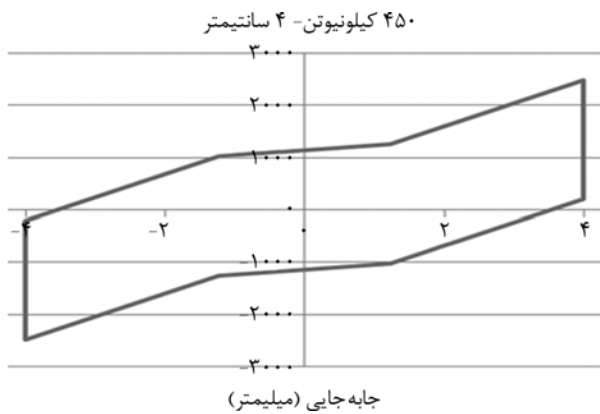
۵- مدلسازی در نرم‌افزار *ABAQUS*

جهت بررسی دقیق‌تر سیستم جداساز و به دست آوردن

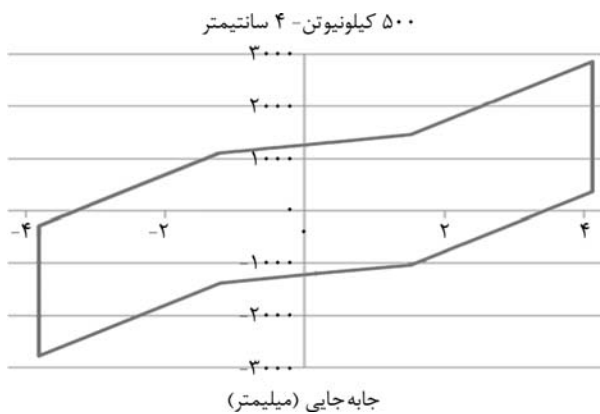
شده‌اند. همان گونه که در اشکال دیده می‌شود، تطابق خوبی بین نتایج آزمایشگاهی و نتایج به دست آمده از تحلیل اجزاء محدود سیستم وجود دارد.



شکل (۹): قیدها و طریقه بارگذاری سیستم در نرم‌افزار ABAQUS.

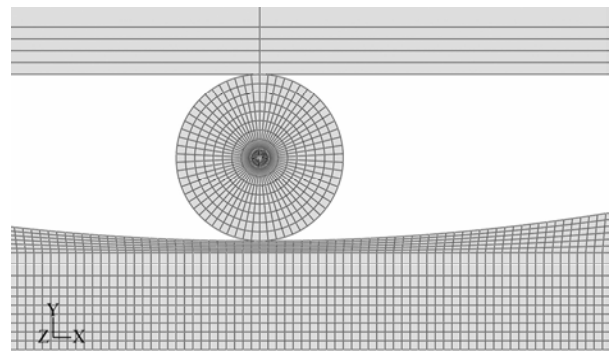


شکل (۱۰): منحنی رفتار نمونه مدل شده در ABAQUS تحت بار قائم ۴۵۰ کیلو نیوتن و جاب‌جایی افقی حداکثر ۴ سانتیمتر.



شکل (۱۱): منحنی رفتار نمونه مدل شده در ABAQUS تحت بار قائم ۵۰۰ کیلو نیوتن و جاب‌جایی افقی حداکثر ۴ سانتیمتر.

تحلیل تنشها بر اساس مقایسه مقادیر به دست آمده با مقادیر تنشهای *von Mises* صورت گرفت. در تحلیل به روش اجزاء محدود، رفتار غیرخطی هندسی سیستم در محاسبات منظور گردید. قطعات متشکله به صورت بلوکهایی *SOLID* تعریف شدند که دربرگیرنده المانهای خطی چهار گرهی به نام *CPS4R* می‌باشند و به صورت تنش مسطح تحلیل شدند. در این المان در هر گره دو درجه آزادی از نوع جابه‌جایی در نظر گرفته می‌شود. صفحه بالایی در ابعاد ۷/۵ سانتیمتر در جهت افقی و غلتکها و صفحه پایین در ابعاد ۰/۱ در ۰/۱ سانتیمتر مش بندی شدند، شکل (۸).

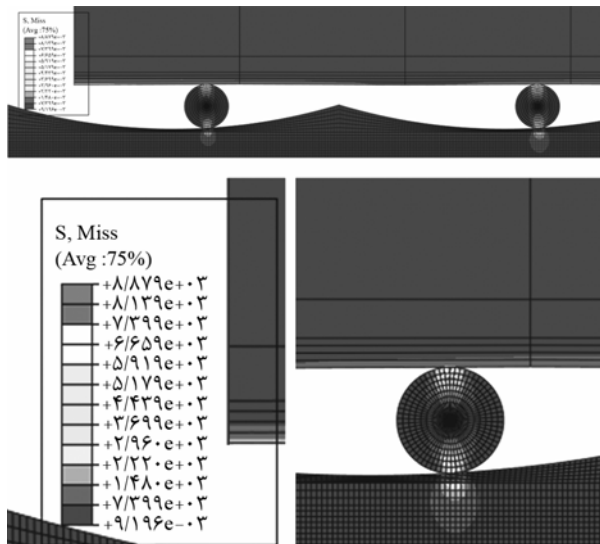


شکل (۸): مش بندی سیستم جداساز جهت تحلیل اجزاء محدود در نرم‌افزار ABAQUS

جهت بارگذاری سیستم در مرحله اول دو درجه آزادی افقی و قائم تمام گره‌های زیر صفحه پایینی بسته شد. در مرحله دوم بار قائم به صورت تنش بر روی صفحه بالایی توزیع گردید، که نرم‌افزار آن را به صورت نیروی متمرکز به گره‌ها انتقال می‌داد. در مرحله سوم، کنشی از جنس جابه‌جایی به گره‌های سمت راست سیستم، همان طور که در شکل (۹) نشان داده شده، اعمال شد.

بارگذاری و تحلیل سیستم به صورت *General Static* با در نظر گرفتن جابه‌جایی‌های بزرگ بود. در پایان هر مرحله تحلیل مقدار عکس‌العمل در گره‌های سمت راست صفحه بالایی با یکدیگر جمع شده و در مقابل جابه‌جایی متوسط این گره‌ها به عنوان منحنی رفتار سیستم ترسیم شدند.

در اشکال (۱۰) تا (۱۲)، منحنی‌های رفتاری به دست آمده برای بارهای قائم ۴۵۰ و ۵۰۰ کیلو نیوتن به ازای جابه‌جایی ۴ سانتیمتر و برای بار قائم ۶۰۰ کیلو نیوتن (تقریباً معادل با ۶۱ تن) به ازای جابه‌جایی ۳ سانتیمتر رسم



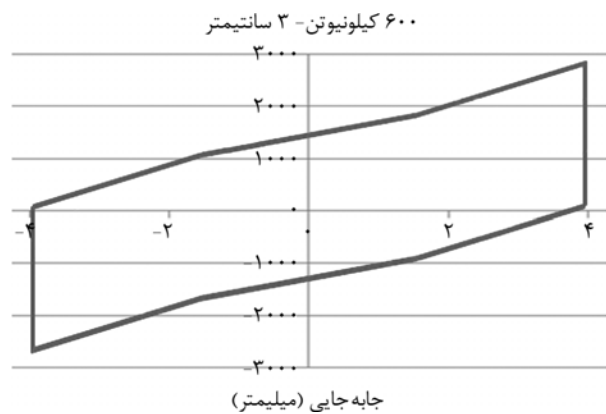
شکل (۱۳): حداکثر تنش *von Mises* در غلتک سمت راست تحت بارگذاری معادل با یک ساختمان ۱۴ طبقه.

با توجه به تحلیل‌های انجام شده می‌توان از غلتکهای متعامد با قطر ۲ سانتیمتر روی بستری به ابعاد ۸۳ در ۸۳ سانتیمتر برای یک ساختمان ۱۴ طبقه استفاده نمود. تحلیل‌های عددی انجام شده بر روی مدل ساختمانهای منظم دارای تعداد طبقات از ۳ تا ۱۴، که توسط این سیستم جداسازی شده‌اند، نشان داده است که کاربرد آن می‌تواند به کاهش چشم‌گیر در تغییر مکان نسبی و نیز شتاب مطلق طبقات ساختمانها منجر گردد [۱۳].

۶- نتایج

بر اساس مطالعات انجام شده در این پژوهش، در مورد جفت غلتکهای متعامد بر بستر کاو، می‌توان به نتایج زیر دست یافت:

- ۱- با به کار بردن غلتکهایی به قطر ۲ سانتیمتر روی بستری مربعی به ابعاد حداکثر ۸۳ سانتیمتر، ساخته شده از فولاد *MO40*، می‌توان از جداساز پیشنهادی برای ساختمانهای تا ۱۴ طبقه استفاده نمود. البته در صورت استفاده از غلتکهایی با قطر بیشتر و آلیاژ قویتر می‌توان از ابعاد بستر کاست.
- ۲- جابه‌جایی جانبی لازم برای عملکرد سیستم در مورد زلزله‌های حوزه نزدیک که دارای پالس بلند دامنه هستند ممکن است تا چند ده سانتیمتر برسد. این



شکل (۱۴): منحنی رفتار نمونه مدل شده در *ABAQUS* تحت بار قائم ۶۰۰ کیلو نیوتن و جابه‌جایی افقی حداکثر ۳ سانتیمتر.

پس از اطمینان از صحت مدلسازی و پاسخهای محاسبه شده به روش اجزاء محدود، با در نظر گرفتن ساختمانی ۱۴ طبقه که حداکثر بار وارد به هر ستون در هر طبقه آن تقریباً معادل با ۱۲ تن باشد، تحلیل تنش بار دیگر انجام شد. باید دقت کرد که بار وارد شده بر جداساز در ساختمان ۱۴ طبقه در حالت جداسازی شده در واقع معادل با بار ساختمانی ۱۵ طبقه در حالت جداسازی نشده می‌باشد، چرا که طبقه روی جداساز نیز به عنوان یک طبقه ساختمانی لحاظ می‌شود. به عبارت دیگر، به هر جداساز در زیر ساختمانی ۱۴ طبقه، نیروی معادل با $12 \times 15 = 180$ تن وارد می‌شود. نمونه مدل شده در نرم‌افزار تحت این نیروی قائم قرار داده شد. در شکل (۱۳) مقدار حداکثر تنش *von Mises* در سیستم جداساز تحت بارگذاری معادل با یک ساختمان ۱۴ طبقه جداسازی شده نشان داده شده است. این تنش با توجه به حرکت سیستم به سمت راست و نزدیک شدن مرکز جرم سیستم به غلتک سمت راستی، در همین غلتک رخ داده است.

همان‌طور که در شکل (۱۳) مشاهده می‌شود، تحت بارگذاری یک ساختمان ۱۴ طبقه بر روی جداساز، حداکثر تنش *von Mises* برابر با ۸۹۴۵ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع می‌باشد. با توجه به در نظر گرفتن معیار گسیختگی *von Mises* این مقدار باید با تنش تسلیم آلیاژ فولاد به کار رفته در جداساز مقایسه شود که با توجه به جدول (۱) این مقدار برابر با ۹۰۰۰ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع می‌باشد.

measurement, *Proceedings of the 19th US-Japan Bridge Engineering Workshop*, 27-29.

8. Wu, S-Y., Lee, S-N., Tsai, M-H., and Chang, K.C. (2004). Seismic isolation tests of a bridge model using rolling type seismic isolation bearings, *Proceeding of the 17th KKCNN Symposium on Civil Engineering*.
9. Tsai, M-H., Wu, S-Y., Chang, K-C., and Lee, G.C. (2007). Shaking table tests of a scaled bridge model with rolling-type seismic isolation bearings, *Engineering Structures*, **29**, 694-702.

۱۰. کنگرلو، کامبیز (۱۳۸۵). بررسی جداسازهای لرزه‌ای به صورت غلتکهای متعامد، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران جنوب، دانشکده تحصیلات تکمیلی.
۱۱. کنگرلو، کامبیز و حسینی، محمود (۱۳۸۶). بررسی جداساز لرزه‌ای به صورت غلتکهای متعامد، مجموعه مقالات پنجمین کنفرانس بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله (SEE5)، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله و مهندسی زلزله، تهران.

12. Hosseini, M. and Kangarloo, K. (2007). Introducing orthogonal rollers pairs as an effective isolating system for low rise buildings, *Proceedings of the 6th Int'l Conference on Earthquake Resistant Engineering Structures (ERES 2007)*, Bologna, Italy.

۱۳. سرور، امیرحسین (۱۳۸۸). بررسی تحلیلی کارایی سیستم جداساز لرزه‌ای به صورت غلتکهای متعامد در ساختمان فلزی منظم دارای قاب خمشی با ارتفاع متوسط، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم تحقیقات.

نکته باید در بکارگیری این سیستم‌ها مد نظر قرار گیرد.

۳- با توجه به هزینه کم و فناوری نسبتاً ساده سیستم جداساز پیشنهادی در مقایسه با سایر جداسازهای موجود استفاده از آن به صورت عملی در کشورمان توصیه می‌شود.

۷- مراجع

1. Naeim, F. and Kelly, J.M. (1999). *Design of seismic isolated structures: from theory to practice*, New York, John Wiley & Sons Inc, Introduction.
۲. غفوری‌آشتیانی، محسن و همایون‌شاد، فرهاد (۱۳۸۱). طراحی ساختمانها با جداسازهای لرزه‌ای، از تئوری تا عمل، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، ترجمه.
3. Lin, T. and Hone, C. (1993). Base isolation by free rolling rods under basement, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **22**, 261-273.
4. Lin, T.W., Chern, C.C., and Hone, C.C. (1995). Experimental study of base isolation by free rolling rods, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **24**, 1645-1650.
5. Jangid, R.S. and Londhe, Y.B. (1998). Effectiveness of elliptical rolling rods for base isolation, *Journal of Structural Engineering, ASCE*, **124**, 469-72.
6. Jangid R.S. (2000). Stochastic seismic response of structures isolated by rolling rods, *Engineering Structures*, **22**, 937-946.
7. Lee, G.C. and Liang, Z.A. (2003). Sloping surface roller bearing and its lateral stiffness