

## شبیه سازی پاسخ لرزه ای و ارزیابی پایداری لغزشی جداگرهای مسلح به الیاف در کاربری غیر متصل

بهرنگ احسانی

دانشجوی کارشناسی ارشد زلزله دانشگاه رازی کرمانشاه ایران

[b.ehsani@razi.ac.ir](mailto:b.ehsani@razi.ac.ir)

حمید توپچی نژاد

استادیار گروه مهندسی عمران دانشگاه رازی کرمانشاه ایران

[h.toopchinezhad@razi.ac.ir](mailto:h.toopchinezhad@razi.ac.ir)

کلید واژه‌ها: جداگر الاستومری مسلح به الیاف، کاربری غیر متصل، تغییر شکل شبه غلتان، پایداری لغزشی، تحلیل تاریخیچه زمانی.

### چکیده

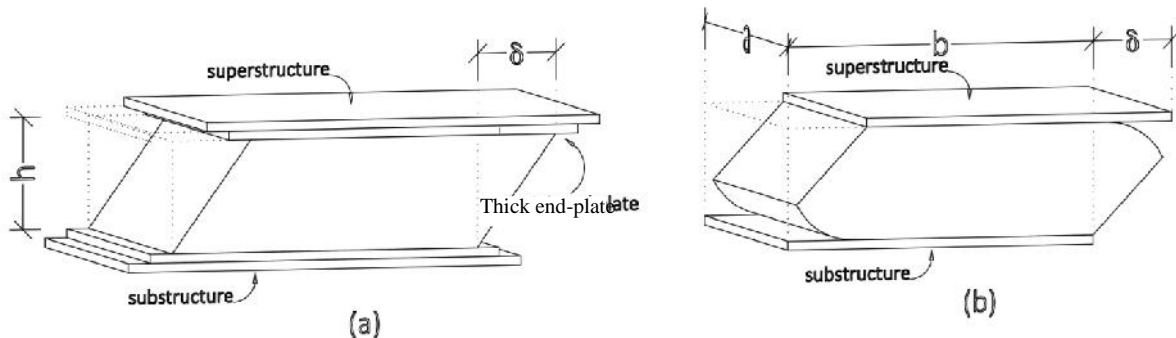
جداگرهای الیافی غیرمتصل گونه نسبتاً جدیدی از جداگرهای الاستومری هستند که شامل لایه‌های متناوب الاستومر و ورقه‌های الیاف مسلح کننده بوده و بدون هیچ‌گونه پیوستگی و یا اتصال مکانیکی خاصی مابین زیرسازه و روسازه قرار می‌گیرند. با توجه به کاربری غیرمتصل و همچنین عدم وجود سختی خمشی در لایه‌های الیاف، سطح تماس مؤثر بین جداگر و تکیه‌گاه‌های فوقانی و تحتانی آن (زیرسازه و روسازه) کاهش یافته و جداگر دچار تغییر شکل جانبی شبه غلتان می‌گردد. این امر سبب کاهش سختی جانبی و افزایش راندمان جداگر می‌گردد. بهنگام حرکات رفت و برگشتی زمین، نیروهای برشی بین یک جداگر غیرمتصل و تکیه‌گاه‌های آن صرفاً با اتکا به اصطکاک موجود در سطوح تماس فوقانی و تحتانی جداگر ردوبدل می‌شوند؛ بنابراین، لازمه عملکرد مناسب جداگر، تأمین مقاومت اصطکاکی کافی جهت ممانعت از بروز لغزش نسبی در سطح تماس است. بر اساس مطالعات آزمایشگاهی پیشین عدم لغزش جداگر منوط به وجود حداقلی از تنش فشاری در سطح تماس جداگر می‌باشد. هدف از این مقاله ارائه الگوریتمی است که بر اساس آن سطح تماس مؤثر جداگر و ناپایداری لغزشی آن در هر گام زمانی تحلیل قابل محاسبه و ارزیابی باشد.

### مقدمه

فلسفه غالب در طرح سازه‌های مقاوم در برابر زلزله آن است که سازه در برابر زلزله‌های خفیف (سطح بهره‌برداری) هیچ‌گونه آسیب سازه‌ای و غیر سازه‌ای ندیده و در زلزله‌های شدید (سطح مبنای طرح) دچار فروریزش نگردد. چنانچه اعضای سازه‌ای قابلیت اتلاف انرژی مناسبی داشته باشند، تغییرشکل‌های ناشی از زلزله علی‌رغم رفتار غیرارتجاعی سازه، کمتر از ظرفیت شکل‌پذیری آن شده و هدف طراحی که ممانعت از فروریزش سازه است محقق می‌گردد؛ بنابراین چ شکل‌پذیری و اتلاف انرژی دو ویژگی ضروری در سازه‌هایی است که هنگام زلزله، تغییرشکل‌های خمیری (غیرارتجاعی) را تجربه می‌نمایند. در صورت کاربرد جداساز لرزه‌ای پایه، بازتاب دینامیکی سازه کاهش یافته و رفتار آن در محدوده ارتجاعی باقی می‌ماند. دو شاخصه اصلی هر سیستم جداساز لرزه‌ای، انعطاف‌پذیری جانبی و قابلیت اتلاف انرژی می‌باشند. انعطاف‌پذیری سیستم جداسازی سبب افزایش دوره تناوب اصلی سازه جداسازی شده گشته و موجب تقلیل قابل توجه انرژی ورودی زلزله می‌گردد. افزایش قابلیت اتلاف انرژی (میرایی) در سیستم جداساز سبب کاهش جابجایی‌های جانبی آن بهنگام زلزله شده و همچنین در تقلیل بیشتر شتاب ورودی به سازه مؤثر می‌باشد. جداگرهای الاستومری مسلح به صفحات فلزی (SREI) یکی از متداول‌ترین انواع جداگرها می‌باشند. در جداگرهای مذکور صفحات فلزی و ورقه‌های الاستومر به صورت متناوب به یکدیگر متصل (bond) شده‌اند. صفحات تسلیح فولادی با محدود کردن کرنش جانبی لایه‌های الاستومر تحت اثر بارهای فشاری قائم موجب کاهش تغییر شکل‌های قائم جداگر و در نتیجه تأمین سختی لازم در آن می‌گردند. اثر این صفحات بر سختی جانبی ناچیز بوده و مدول برشی الاستومر عمدتاً تعیین‌کننده سختی جانبی جداگر می‌باشد. سختی قائم جداگرهای الاستومری معمولاً چند صد برابر بزرگ‌تر از سختی جانبی آنهاست (Naeim and Kelly, 1999). جداگرهای الاستومری مسلح به الیاف (FREI) گونه جدیدی از جداگرهای الاستومری هستند که در آن‌ها بجای صفحات فلزی، از لایه‌های الیاف پلیمری FRP - دارای مدول کششی بالا و قابل قیاس با فولاد - جهت مهار کرنش جانبی لایه‌های الاستومر و تأمین سختی لازم در امتداد قائم استفاده می‌شود.

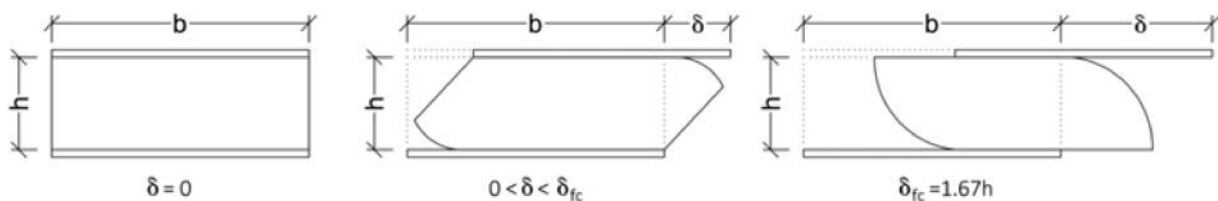


به منظور اتصال جداگر به زیر سازه و روسازه معمولاً از صفحات ضخیم فلزی انتهایی که به بالا و پایین جداگر متصل می‌شوند استفاده به عمل می‌آید که چنین کاربردی را اصطلاحاً کاربری متصل (Bonded Application) می‌نامند (شکل ۱-ا). در صورت حذف صفحات اتصال ذکر شده، کاربرد جداگر را غیرمتصل (Unbonded) گویند (Toopchi-Nezhad et al., 2011). جداگرهای ایافی غیرمتصل آن دسته از جداگرهای الاستومری مسلح به ایافی هستند که در کاربرد غیرمتصل بکار گرفته می‌شوند (شکل ۱-ب).



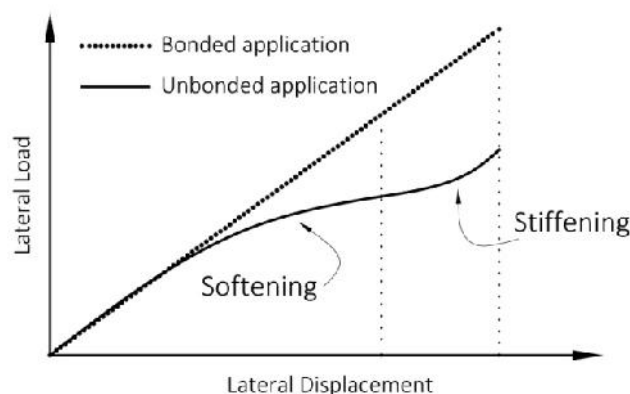
شکل ۱: تغییر شکل جانبی در جداگرهای الاستومری مسلح به ایافی، (a) کاربرد متصل، (b) کاربرد غیرمتصل

جایگزینی صفحات تسلیم فلزی میانی با لایه‌های تسلیم ایافی و همچنین حذف صفحات ضخیم فلزی انتهایی قابلیت‌های مثبتی از جمله کاهش هزینه تولید، کاهش وزن و هزینه‌های حمل‌ونقل و نصب را در پی خواهد داشت. به دلیل شرایط مرزی غیرمتصل جداگر و همچنین سختی خمشی ناچیز لایه‌های تسلیم ایافی، در اثر نیروهای برشی وارده، وجوه فوقانی و تحتانی جداگر مانند شکل ۲ از سطوح تکیه‌گاه به طور موضعی بلند می‌شوند و یا به عبارتی تغییر شکل شبه غلتان در جداگر رخ می‌دهد. این جابجایی می‌تواند تا آنجا پیش رود که وجوه قائم اولیه جداگر در تماس کامل با سطوح تکیه‌گاه‌های فوقانی و تحتانی آن قرار گیرند. این حد از جابجایی را حداقل حد ایمن تغییر شکل شبه غلتان پایدار یا اصطلاحاً جابجایی نظیر تماس کامل  $\delta_{fc}$  می‌نامند (Toopchi-Nezhad, 2014).



شکل ۲: جداگرهای الاستومری در کاربرد غیرمتصل تحت اثر جابجایی‌های مختلف .

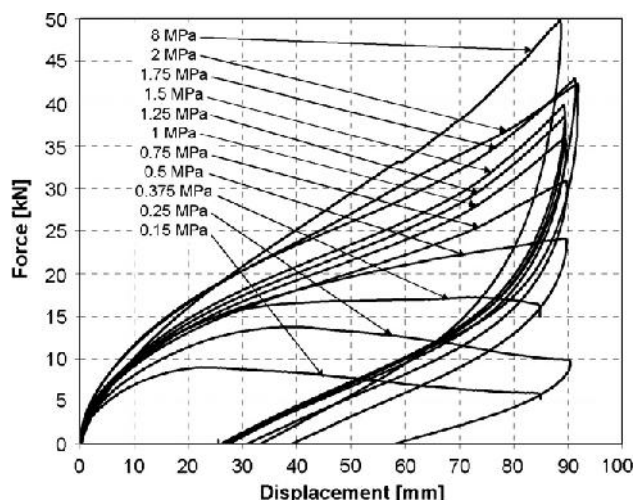
تغییر شکل شبه غلتان، به عنوان یک پدیده مثبت، سبب کاهش سختی جانبی مؤثر جداساز با افزایش مکان جانبی آن می‌شود (شکل ۳) که در نتیجه این امر دوره تناوب جداساز افزایش بیشتری یافته و کارایی آن به عنوان یک جداساز لرزه‌ای ارتقاء می‌یابد (Naeim and Kelly, 1999).



شکل ۳: نمودار نیرو-جابجایی جانبی در جداگرهای ایافی متصل و غیرمتصل

با توجه به شکل ۳، رفتار غیرخطی جداساز غیرمتصل در قیاس با رفتار خطی جداساز الیافی متصل به معنای انتقال نیروی برشی کمتر به روسازه (کارایی بهتر) به ازای یک تغییر مکان جانبی ثابت است. بر اساس مطالعات انجام شده چنانچه نسبت طول به ارتفاع (aspect ratio) در یک جداگر الیافی غیرمتصل حداقل 2.5 انتخاب شود حلقه‌های پسماند نیرو-تغییر شکل جانبی حاصل پایدار می‌ماند (Toopchi-Nezhad, 2014). به عبارتی دیگر به ازای هر نمو جابجایی-افزایش مقاومت جانبی (نمو نیروی برشی) در حلقه‌های پسماند جداگر ملاحظه می‌گردد. در این شرایط با حذف نیروی جانبی، تغییر شکل جانبی برگشت پذیر بوده و جداگر به موقعیت قبل از تغییر شکلش بازمی‌گردد.

در جداگرهای الیافی غیرمتصل نیروهای جانبی از طریق اصطکاک در سطوح تماس جداگر ردوبدل می‌شوند. عدم اتصال مکانیکی جداگر به روسازه و زیرسازه، باعث می‌شود که در صورت عدم وجود مقاومت اصطکاکی کافی، لغزش در سطوح تماس جداگر بهنگام حرکات رفت و برگشتی زمین رخ دهد. وقوع لغزش در هر یک از جداگرهای موجود در یک سیستم لرزه جداسازی موجب حذف جداگر مذکور از سیستم مقاوم جانبی در برابر زلزله شده و عملاً برش پایه در سایر جداگرهای فعال توزیع می‌گردد. عملکرد مناسب یک جداگر الیافی غیرمتصل وابسته به آن است که لغزش قابل توجهی در سطوح تماس جداگر با تکیه‌گاه‌های فوقانی و تحتانی آن رخ ندهد و مقاومت اصطکاکی کافی در سطوح تماس جداگر وجود داشته باشد تا پایداری لغزشی آن تأمین گردد. مقاومت اصطکاکی به عواملی مانند تنش فشاری نرمال، نوع الاستومر، زبری سطح تماس جداگر و سرعت بارگذاری وابسته است. یکی از بهترین راه‌های تحقیق میزان مقاومت اصطکاکی مطالعه آزمایشگاهی لغزش جداگر می‌باشد. به‌عنوان مثال مطالعات آزمایشگاهی نشان می‌دهند در صورت کاربرد الاستومری با مدول برشی 0.9 MPa، در صورت تأمین تنش فشاری حداقل 0.5 MPa در سطوح تماس جداگر با زیرسازه و روسازه، هنگامی که میانگین نرخ جابجایی‌های جانبی اعمالی حدود 0.4 mm/s باشد حلقه‌های پسماند نیرو تغییر شکل جانبی پایدار مانده و لغزش نسبی اتفاق نخواهد افتاد (شکل ۴). همچنین افزایش نرخ جابجایی موجب بهبود پایداری لغزشی جداگر می‌گردد (Russo and Pauletta, 2012).



شکل ۴: منحنی‌های جابجایی  $\Delta$  نیرو به دست آمده بر روی نمونه معرفی شده تحت تنش‌های فشاری متفاوت و نرخ 0.4 mm/s سرعت جابجایی جانبی (Russo and Pauletta, 2012).

بدیهی است که از حاصل تقسیم نیروی قائم وارده بر جداگر بر سطح تماس آن می‌توان تنش فشاری قائم وارد بر آن را محاسبه نمود؛ اما در صورتی که جداگر الاستومری در کاربرد غیرمتصل بکار برده شود عدم وجود صفحات اتصال انتهایی باعث می‌شود که در اثر تغییر شکل شبه غلطانج سطح تماس مؤثر نیز تغییر کند. توپچی نژاد (Toopchi-Nezhad, 2014) نشان داد در صورتی که یک جداگر الاستومری غیرمتصل با ابعاد  $a \times b \times h$  تحت جابجایی جانبی در راستای  $b$  قرار گیرد سطح تماس مؤثر جداگر را با دقت مناسب می‌توان از رابطه ۱ محاسبه نمود.

$$A_{eff} = a \left( b - \frac{3}{4} u_i \right) \quad (1)$$

سختی افقی مؤثر (سختی سکانتی) جداگر را نیز می‌توان از رابطه ۲ محاسبه نمود (Toopchi-Nezhad, 2014) که در آن  $G$  مدول برشی لایه‌های الاستومر و  $t_r$  مجموع ضخامت لایه‌های الاستومر موجود در جداگر است.

$$K_{H_{eff}} = \frac{GA_{eff}}{t_r} \quad (2)$$

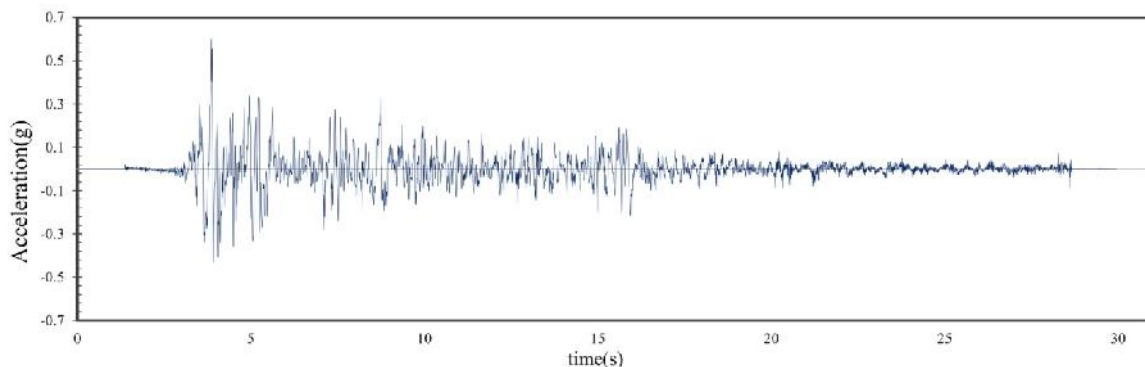
این رابطه تا زمانی که جابجایی جداگر کمتر از حداقل حد ایمن تغییر شکل شبه غلتان پایدار (یعنی  $f_c$ ) باشد از دقت مناسبی برخوردار خواهد بود (Toopchi-Nezhad, 2014).

در ادامه به منظور شبیه‌سازی کامپیوتری جداگرهای الاستومری مسلح به الیاف در کاربرد غیرمتصل از نرم‌افزار OpenSees استفاده می‌شود تا علاوه بر در نظر گرفتن سختی متغیر جداگر در هر گام زمانی، پایداری لغزشی آن نیز با رصد کردن تنش فشاری مؤثر وارد بر جداگر کنترل شود. به منظور صحت سنجی مدل کامپیوتری، پاسخ دینامیکی یک قاب فلزی دوطبقه که توسط توپچی نژاد و همکاران (Toopchi-Nezhad et al., 2009) در مقیاس ۱:۴ تحت زلزله ال سنترو مورد آزمایش قرار گرفته است مدل‌سازی می‌گردد تا با مقایسه نتایج به دست آمده از مدل کامپیوتری با نتایج آزمایشگاهی میزان دقت مدل ارزیابی گردد.

## مدل آزمایشگاهی

آزمایش میز لرزه در مقیاس ۱:۴ بر روی یک قاب خمشی فولادی دوطبقه با ابعاد 1400\*1500 mm در پلان و ارتفاع کلی 1628 mm انجام گردید (Toopchi-Nezhad et al., 2009). در قاب مورد مطالعه مقطع ستون‌ها مربعی توخالی به ابعاد 64\*64 mm با ضخامت 6.4 mm است که توسط تیرهایی با مقطع مستطیل توخالی به ابعاد 51\*76 mm و به ضخامت 6.4 mm به وسیله جوش به طور کاملاً صلب به یکدیگر متصل شده‌اند. سه دال بتنی پیش‌ساخته به منظور فراهم آوردن شرایط دیافراگم صلب در تراز طبقات قرار گرفته است. همچنین ۴ صفحه ضخیم فلزی به عنوان جرم‌های اضافه به منظور تأمین شرایط شبیه‌سازی دینامیکی به دیافراگم صلب هر طبقه متصل شده است (Harris and Sabnis, 1999). وزن کلی قاب 31.1 کیلو نیوتن می‌باشد. بهنگام آزمایش میز لرزه قاب مورد نظر بر روی ۴ جداگر FREI قرار گرفته است. جداگرهای مذکور دارای ابعاد 70\*70 mm در پلان و 25 mm در ارتفاع می‌باشند. هر جداگر متشکل از ۱۲ لایه الاستومر با مدول برشی 0.4 MPa به ضخامت 1.58 mm و ۱۱ لایه تسلیح الیافی هر یک به ضخامت 0.55 mm می‌باشد.

در مطالعات آزمایشگاهی میز لرزه، شتاب‌نگاشت زلزله - El Centro با بیشینه شتاب 0.59g به عنوان سطح شدت بیشینه خطر زلزله در قاب مورد نظر مورداستفاده قرار گرفت. با توجه به این که ضریب مقیاس هندسی قاب آزمون شده ۱:۴ است، باید زمان رکورد حرکت اصلی زمین در این زلزله، توسط ضریب ۲، طبق اصول شبیه‌سازی دینامیکی (dynamic similitude)، فشرده‌سازی شود. شکل ۵ شتاب‌نگاشت مورداستفاده در مطالعات آزمایشگاهی را نشان می‌دهد که در این مقاله نیز از همین شتاب‌نگاشت استفاده می‌شود. شتاب‌نگاشت مذکور در امتداد طول بلندتر قاب وارد شده است.



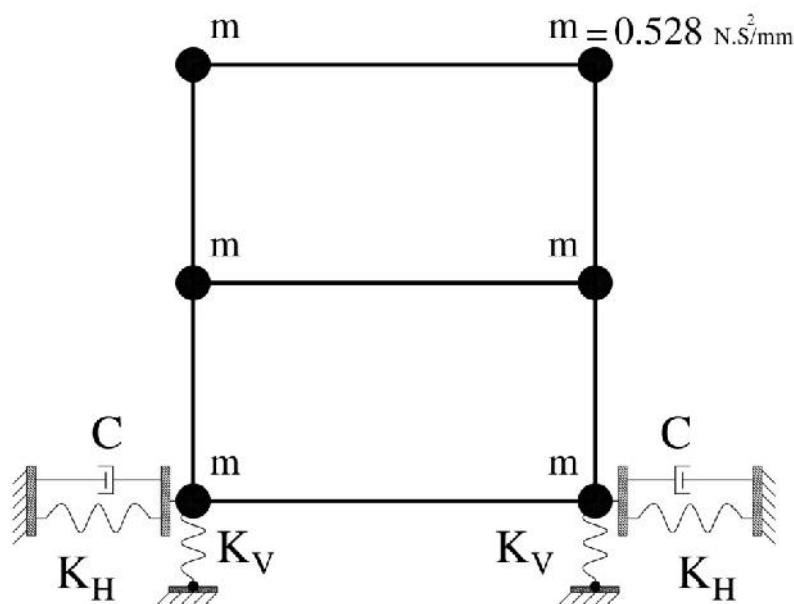
شکل ۵: تاریخچه زمانی شتاب زمین در رکورد فشرده‌سازی شده زلزله El Centro با  $PGA=0.59g$

## مدل کامپیوتری

به منظور تحلیل دینامیکی قاب جداسازی شده و شبیه‌سازی رفتار جداگرهای FREI از نرم‌افزار OpenSEES استفاده شده است. نرم‌افزار اپن‌سیس یک نرم‌افزار کدباز (Open Source) است که کتابخانه‌ای از مصالح، المان‌ها، مدل‌های رفتاری و دستورات آنالیز را در خود جای داده است. این نرم‌افزار در سال ۱۹۹۰ توسط محققین دانشگاه برکلی آمریکا به طور تخصصی در حوزه سیستم‌های خاک و سازه تحت زلزله طراحی شده است و به دلیل باز بودن کد برنامه‌نویسی آن هر ساله در حال توسعه می‌باشد (Mazzoni et al, 2007). باین حال تاکنون المان یا مصالحی که منحصراً در شبیه‌سازی رفتار جداگرهای الیافی مسلح به الیاف با کاربری غیرمتصل باشند در این نرم‌افزار تعریف نشده است؛ بنابراین لازم است تا با تعریف مناسب مصالح و شرایط مرزی، این جداگرها را شبیه‌سازی کرد.

با توجه به اینکه زلزله ال سنترو در یک راستا به سازه وارد شده و به دلیل تقارن پیچشی در قاب می‌توان مدل‌سازی قاب را به صورت دوبعدی به انجام رسانید. بدین منظور طبق شکل ۶ سازه مورد نظر توسط یک قاب دوبعدی با مقاطعی دو برابر سازه مورد آزمایش مدل می‌شود.

همچنین جرم طبقات در گره‌های قاب متمرکز می‌شود. در راستای عمود بر صفحه، به دلیل مدل‌سازی دوبعدی، بعد هر یک از دو جداگر دو برابر بعد واقعی جداگرهای بکار رفته در آزمایش در نظر گرفته می‌شود تا سطح تماس مؤثر جداگرها در مدل به‌درستی شبیه‌سازی گردد.



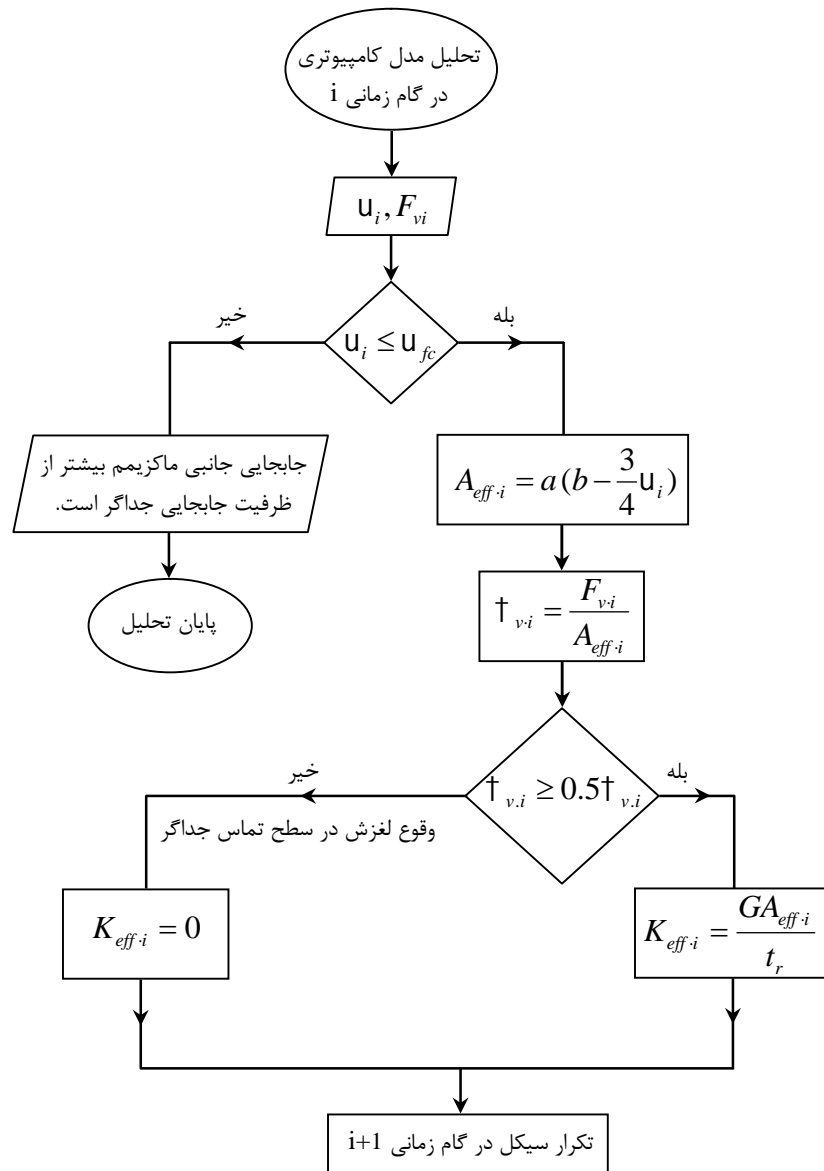
شکل ۶: مدل کامپیوتری استفاده‌شده در نرم‌افزار OpenSees

همان‌گونه که در شکل ۶ مشاهده می‌گردد هر جداگر با یک فنر افقی غیرخطی  $K_H$  و میراگر ویسکوز  $C$  مدل‌سازی شده و در راستای قائم یک فنر خطی  $K_V$  در نظر گرفته می‌شود. سختی مؤثر فنر افقی در راستای افقی در هر گام زمانی بر اساس رابطه (۲) تعیین می‌شود. ضمناً در تحلیل انجام‌شده، نسبت میرایی ویسکوز معادل در میراگر ویسکوز در نظر گرفته‌شده است. برای توصیف رفتار جداگر در راستای قائم و شبیه‌سازی کاربری غیرمتصل از فنری با سختی بسیار بالا بدون قابلیت تحمل نیروی کششی استفاده به‌عمل آمده است. به‌منظور کنترل پایداری لغزشی جداگرها در هر گام زمانی، تنش مؤثر قائم روی هر جداگر محاسبه و ثبت می‌شود. تنش مؤثر قائم از تقسیم نیروی واکنش فنر قائم بر سطح تماس مؤثر لحظه‌ای جداگر که از رابطه (۱) محاسبه می‌شود به دست می‌آید. در صورتی که تنش قائم محاسبه‌شده کمتر از معیار ارائه‌شده (Russo and Pauletta, 2012) یعنی  $0.5 \text{ MPa}$  باشد، جداگر دچار ناپایداری لغزشی شده و در این هنگام سختی فنر افقی صفر منظور می‌گردد. الگوریتم اشاره‌شده در فلوجارت شکل ۷ برای جداگری با ابعاد  $a*b$  در پلان  $h$  ارتفاع  $h$  ضخامت کلی لایه‌های الاستومر  $t_r$  و مدول برشی  $G$  نشان داده شده است.

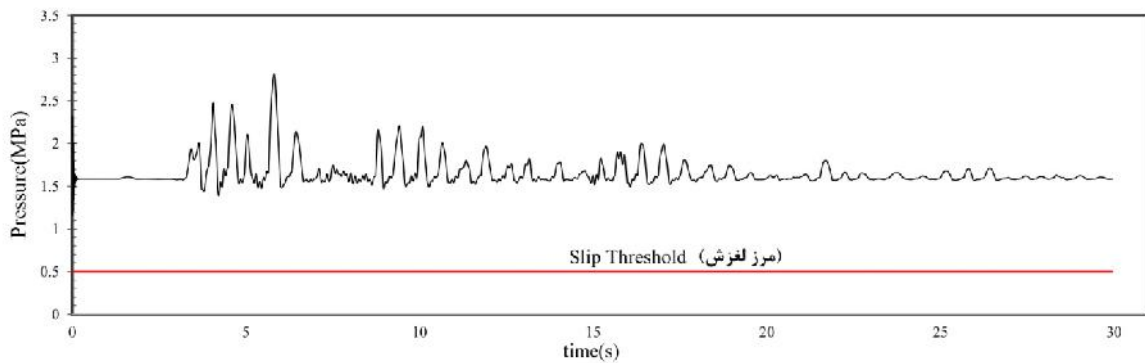
## نتایج

شکل ۸ تنش فشاری قائم وارد بر یکی از جداگرهای الاستومری سیستم را نشان می‌دهد. همان‌گونه که ملاحظه می‌گردد تنش قائم بین  $1.2 \text{ MPa}$  تا  $3.14 \text{ MPa}$  در نوسان است. تنش‌های فشاری محاسبه‌شده هیچ‌گاه از مقدار حدی  $0.5 \text{ MPa}$  کمتر نشده‌اند بنابراین می‌توان نتیجه گرفت جداگر دارای شرایط پایداری لغزشی بوده و هیچ‌گونه لغزش نسبی در سطح تماس با تکیه‌گاه‌ها رخ نداده است. شایان‌ذکر است که این پدیده (عدم لغزش) در طی آزمایش میز لرزه نیز مشاهده گردیده است (Toopchi-Nezhad et al., 2009).

شکل ۹ تاریخچه تغییرات سختی جانبی  $K_H$  هر یک از جداگرهای سیستم لرزه‌جاساز را نشان می‌دهد. سختی جانبی با توجه به تغییر مکان جانبی از رابطه (۲) محاسبه شده است. با توجه به اینکه حداکثر جابجایی جداگر از مقدار جابجایی نظیر تماس کامل  $f_c$  کمتر است می‌توان از رابطه شماره (۲) سختی جداگر را در هر گام زمانی محاسبه نمود. بر اساس شکل ۹ بیشترین مقدار سختی جانبی  $258 \text{ mm}$  و کمترین مقدار آن  $185 \text{ mm}$  به‌دست آمده است.

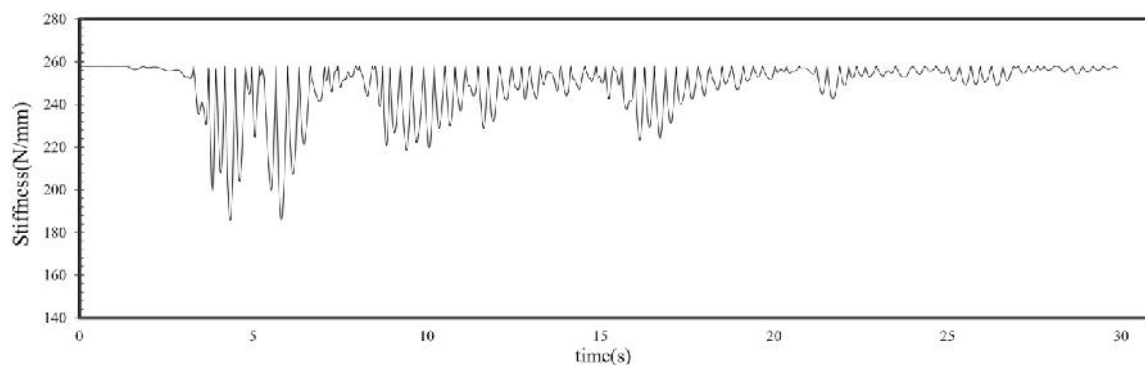


شکل ۷: الگوریتم بکار رفته در برنامه جهت محاسبه سختی جانبی و کنترل پایداری لغزشی جداگرهای FREI



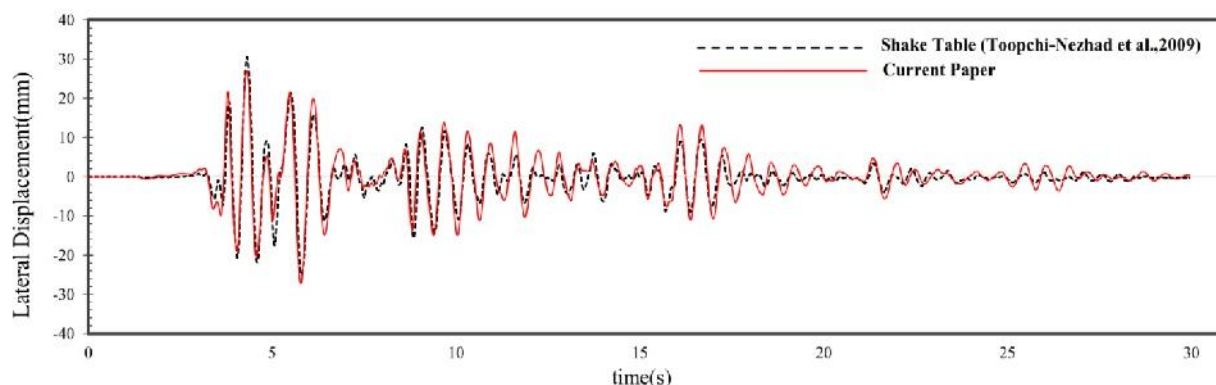
شکل ۸: تاریخچه زمانی تنش فشاری وارد بر جداگر در مدل کامپیوتری





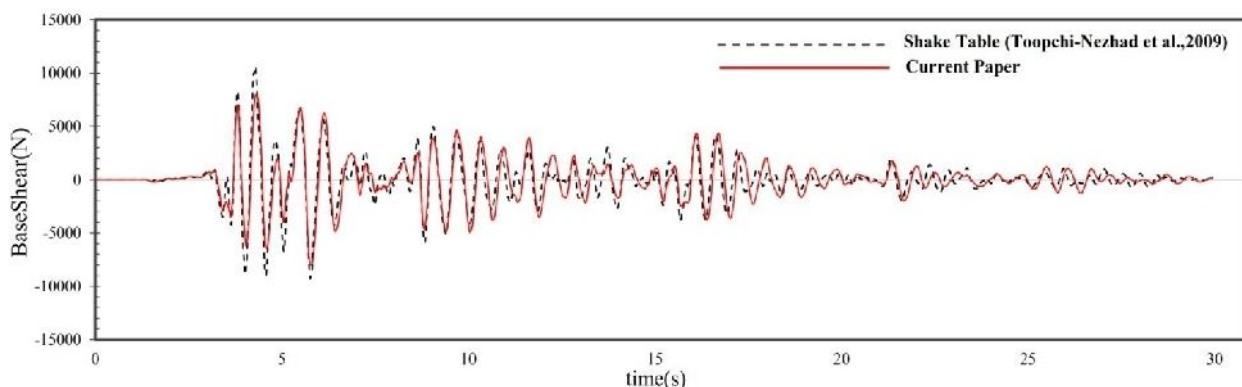
شکل ۹: تاریخچه زمانی تغییرات سختی جداگر در مدل کامپیوتری

با مقایسه پاسخ جابجایی جانبی یکی از جداگرها در مدل شبیه‌سازی شده با پاسخ قاب در آزمایش میز لرزه (Toopchi-Nezhad et al., 2009) طبق نمودار شکل 10 می‌توان میزان دقت مدل کامپیوتری را مشاهده نمود. ماکزیمم جابجایی جداگر در مدل کامپیوتری 27.29 mm محاسبه شده است که از ماکزیمم جابجایی جانبی آزمایش میز لرزه تنها 10.7% کمتر می‌باشد. علاوه بر این مدل کامپیوتری از انطباق کلی مناسبی در قیاس با نتایج آزمایش برخوردار می‌باشد.



شکل ۱۰: انطباق تاریخچه زمانی جابجایی جانبی جداساز با سختی متغیر در مدل کامپیوتری با نتایج میز لرزه

به منظور محاسبه تاریخچه برش پایه قاب مورد آزمایش می‌توان مجموع نیروهای اینرسی حاصل در تراز طبقات مختلف را محاسبه نمود. نیروی اینرسی هر طبقه از حاصل ضرب جرم طبقه در شتاب افقی مؤثر بر آن طبقه محاسبه می‌گردد. شکل ۱۱ تاریخچه برش پایه محاسباتی و برش پایه به دست آمده در آزمایش (Toopchi-Nezhad et al., 2009) را نشان می‌دهد. از مقایسه نتایج ملاحظه می‌گردد که حداکثر برش پایه با تقریب بیش از 20% قابل محاسبه است.



شکل ۱۱: مقایسه تاریخچه زمانی برش پایه مدل کامپیوتری با نتایج میز لرزه

تغییر شکل جانبی شبه غلتان در جداگرهای الیافی غیرمتصل موجب غیرخطی شدن رفتار جانبی جداگر و وابسته شدن شرایط مرزی جداگر و سختی جانبی آن به تغییر شکل‌های وارده می‌گردد. رابطه تحلیلی ارائه شده توسط توپچی نژاد (Toopchi-Nezhad, 2014) بر اساس مشخصات مصالح و ابعاد جداگر امکان تخمین سختی افقی متناظر با جابجایی وارد شده به جداگر را فراهم می‌کند تا بتوان از آن در طراحی اولیه جداگر استفاده کرد. بر اساس ضوابط آیین‌نامه‌های موجود طرح نهایی جداگرها پس از انجام آزمایش‌های رفت و برگشتی و استخراج حلقه‌های پسماند نیرو-تغییر مکان جانبی نمونه‌های آزمایشگاهی آنها امکان‌پذیر است. از طرفی پایداری لغزشی جداگرهای الیافی غیرمتصل طراحی شده، علاوه بر جنس سطوح تماس، وابسته به میزان تنش فشاری وارد بر سطح تماس جداگر و نرخ جابجایی‌های جانبی اعمالی می‌باشد. روش مؤثر بررسی پایداری لغزشی مستلزم آن است که مدل آزمایشگاهی جداگر تحت بارگذاری‌های جانبی رفت و برگشتی با تاریخچه‌های مختلف قرار گرفته تا پایداری لغزشی آن عملاً مورد بررسی قرار گیرد. مدل کامپیوتری ارائه شده در این مقاله با توجه به دقتی که دارد می‌تواند در ارزیابی پایداری لغزشی جداگرهای غیرمتصل در طرح اولیه سازه جداسازی شده با جداگرهای مذکور مورد استفاده قرار گیرد.

## مراجع

- Gaetano Russo G and Pauletta M (2012) *Sliding instability of fiber-reinforced elastomeric isolators in unbonded applications*, *Journal of Engineering Structures* 48 (2013) 70–80
- Harris HG and Sabnis GM (1999) *Structural Modeling and Experimental Techniques*. CRC Press: New York
- Mazzoni S, McKenna F, Scott M and Fenves G (2007) *OpenSees Command Language Manual*. Pacific Earthquake Engineering Research Center. University of California, Berkeley, USA
- Naeim F and Kelly JM (1999) *Design of Seismic Isolated Structures*. Wiley: New York
- Toopchi-Nezhad H (2014) *Horizontal stiffness solutions for unbonded fiber reinforced elastomeric bearings*, *Journal of Structural Engineering and Mechanics*, Vol. 49, No. 3, 395-410
- Toopchi-Nezhad H, Tait MJ and Drysdale RG (2011) *Bonded versus unbonded strip fiber reinforced elastomeric isolators: finite element analysis*, *Journal of Compos. Struct.* 93, 850-859
- Toopchi-Nezhad H, Tait MJ and Drysdale RG (2009). *Shake table study on an ordinary low-rise building seismically isolated with SU-FREIs (stable unbonded fiber-reinforced elastomeric isolators)*. *Journal of Earth Eng Struct Dyn* 2009; 38(11):1335–57

