



## پیشنهاد یک جداگر لرزه‌ای الاستومریک چندلایه اصطکاکی جدید

غلامرضا عبدا... زاده<sup>۱\*</sup>، غلامعلی میرعلی کتولی<sup>۲</sup>

<sup>۱\*</sup> دانشیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروان بابل، بابل، ایران

(abdollahzadeh@nit.ac.ir)

<sup>۲</sup> کارشناسی ارشد مهندسی سازه، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروان بابل، بابل، ایران

(تاریخ دریافت مقاله: ۹۸/۰۴/۰۸، تاریخ پذیرش مقاله: ۹۸/۰۷/۲۱)

### چکیده

جداسازی لرزه‌ای یکی از بهترین روش‌های کنترل ارتعاشات لرزه‌ای در ساختمان‌ها، پل‌ها و تأسیسات هسته‌ای است. در این روش، تمرکز بر روی کاهش پاسخ لرزه‌ای و شتاب ورودی زلزله به سازه است. در این پژوهش، یک جداگر لرزه‌ای ترکیبی الاستومریک چندلایه اصطکاکی جدید، پیشنهاد و در نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس مدل‌سازی، تحلیل و بررسی و با مدل‌های تقریباً مشابه در مقالات دیگر، مقایسه شده است. در این جداساز لرزه‌ای جدید از هسته‌های اصطکاکی به جای هسته‌های سربی استفاده شده و برخی از مشکلات جداسازهای قبلی، به شکل تقریباً قابل قبولی مرتفع گردیده است. بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد که جداگر پیشنهادی جدید در شرایط مختلف بارگذاری قائم و افقی، دارای سختی اولیه مناسب و رفتار هستیترسیس کاملی است و تنش‌های داخلی در لایه‌های مختلف نیز در حد قابل قبول است. همچنین با افزایش ضرایب اصطکاکی هسته‌ها، سختی اولیه و مساحت کلی نمودار اندکی افزایش می‌یابد، هرچند این ضرایب اصطکاکی باید در محدوده مشخصی قرار گیرند.

### کلمات کلیدی

جداگر لرزه‌ای، جداگر الاستومریک چندلایه، جداگر اصطکاکی، هسته‌های اصطکاکی.



# A new Proposed Friction Multi-layered Elastomeric Seismic Isolator (FMESI)

Gholamreza Abdollahzadeh <sup>1\*</sup>, Gholam Ali Mirali Katouli <sup>2</sup>

<sup>1\*</sup> Associate Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Civil Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran (abdollahzadeh@nit.ac.ir)

<sup>2</sup> M.Sc. of Structural Engineering Department of Civil Engineering, Faculty of Civil Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

(Date of received: 29/06/2019, Date of accepted: 13/10/2019)

## ABSTRACT

Seismic isolation is one of the best-advanced methods for controlling seismic vibrations in buildings, bridges and nuclear facilities. A new Friction Multi-Layer Elastomeric Seismic Isolator (FMESI) has been modeled, analyzed and investigated by ABAQUS finite element analysis software and then, compared to real models. A number of friction cores have been used instead of the lead core therefore, some of the previous isolator problems have been almost resolved. Moreover, Studies show that the proposed isolator provides suitable initial stiffness and acceptable hysteresis behavior under different vertical and horizontal loading conditions and also internal stresses in different layers are acceptable. Also, as a result, the initial stiffness and overall area of the curves increase, as friction coefficients of the cores increase, although the frictional coefficients must be within a certain range

## Keywords:

Seismic isolator, Multilayer elastomeric isolator, Friction isolators, Friction cores.



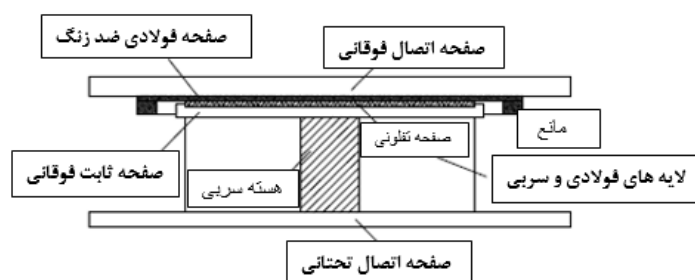
در چند سال اخیر، انواع جداگرهای لرزه‌ای برای کاهش خسارات لرزه‌ای در سازه‌های مختلف بکار گرفته شده است. جداگرهای الاستومریک چندلایه‌ای، معمول‌ترین جداگرهایی هستند که برای جداسازی سازه‌ها در بسیاری از کشورها مورد استفاده قرار گرفته‌اند. تحقیق و توسعه انواع جداسازها از دهه ۱۹۵۰ میلادی تا به امروز ادامه داشته است [۱-۲]. یک جداساز الاستومریک چندلایه شامل، تعدادی لایه‌های فولادی و لاستیکی است که جهت ایجاد سختی عمودی همراه باقابلیت تغییر شکل‌های افقی، با روش ولکانیزاسیون به یکدیگر متصل شده‌اند. جداسازها پرپود اساسی سازه را افزایش می‌دهند، در نتیجه تأثیرات لرزه‌ای مانند جابجایی‌های نسبی بین طبقه‌ای، شتاب کف، تنش‌های اعضای سازه‌ای و غیره را در اعضای رو سازه کاهش می‌یابد [۳-۴]. در سال‌های اخیر فناوری جداسازی لرزه‌ای برای بهبود عملکرد لرزه‌ای انواع سازه‌ها از قبیل؛ پل‌ها، ساختمان‌ها و نیروگاه‌های هسته‌های در کشورها توسعه یافته، بسیار مورد توجه قرار گرفته است. بطور مثال وارن و رایان [۵] توسعه و تحقیقات مورد نیاز جداسازی لرزه‌ای در ساختمان‌ها را مورد بررسی قرار دادند. باسو و همکاران [۶] تحقیقات و کاربرد فناوری‌های کنترل سازه‌ای شامل؛ دستگاه‌های کنترل فعال، نیمه فعال و غیرفعال و عملکرد آن‌ها در سازه‌های عمرانی در اروپا را مورد ارزیابی قرار دادند. بان و همکاران [۷] موارد کاربردی سازه‌های با جداسازی لرزه‌ای و دستگاه‌های مستهلک کننده انرژی دیگر را در چین مورد ارزیابی قرار دادند. به عنوان یک راه مؤثر برای کاهش پاسخ‌های لرزه‌ای، دستگاه‌های جداسازی در طول دهه‌های اخیر به طور وسیعی مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. تیلر و رابینسون [۸] مشخصات مکانیکی جداسازهای لرزه‌ای همراه با کرنش‌های بسیار زیاد را بررسی نمودند. هوانگ و همکاران [۹]، یک مدل جدید از دستگاه‌های لرزه‌ای دوخطی و رایان و همکاران [۱۰] تأثیرات بارمحوری را بر روی جداسازها به صورت تجربی مورد بررسی قرار دادند. نگوین و تاسولا [۱۱] تأثیرات نیروی برشی را بر روی رفتار جداسازها در نرم افزار آباکوس بررسی نمودند. لوکالاندی و همکاران [۱۲] مدل‌های مختلف جداسازهای اصطکاکی پاندولی را در حرکات افقی و قائم مختلف مورد بررسی قرار دادند و با نظر گرفتن رکوردهای نزدیک گسل، آنالیزهای دینامیکی غیرخطی بر روی این سیستم‌ها انجام دادند. مورات ارسوز و همکاران [۱۳] تأثیر پارامترهای مختلف طراحی بر روی پاسخ پل‌های جداسازی شده لرزه‌ای را با سیستم‌های پاندولی اصطکاکی (FPS) مورد ارزیابی انجام دادند و نتیجه گرفتند که پل‌های با رو سازه سنگین تر، کمتر تحت تأثیر مؤلفه قائم زلزله قرار می‌گیرند و جابجایی‌های جداسازی کمتری را تجربه می‌کنند. مورات ارسوز و همکاران [۱۴] پاسخ لرزه‌ای پل‌ها را با سیستم اصطکاکی پاندول (FPS) با فرضیات مدل سازی و تأثیر پارامترهای مدل سازی بر روی پاسخ پل‌های فولادی چنددهانه با جداسازی لرزه‌ای FPS، مورد بررسی قرار دادند. در این سیستم لرزه‌ای جدید برای اولین بار از هسته‌های اصطکاکی به جای هسته‌های سربی استفاده شده است. همچنین موانع داخلی به صورت حلقه‌ای شکل در اطراف هسته‌های اصطکاکی، جهت ایجاد محدودیت جابجایی‌های افقی و قائم مورد نیاز، تعبیه شده است. طبق بررسی‌های انجام گرفته بسیاری از مشکلات جداگرهای لرزه‌ای قبلی از قبیل؛ تغییر شکل‌های بسیار زیاد و غیرقابل کنترل افقی و قائم هسته و لایه‌های اطراف در زلزله‌های شدید، سختی اولیه بسیار زیاد هسته سربی و عدم قابلیت کاربرد آن در سازه‌های سبک، نگرانی‌های مربوط به نحوه اتصال لایه‌های مختلف به یکدیگر و کارایی صحیح سیستم در تغییر شکل‌های افقی بسیار زیاد، وزن و هزینه‌های اولیه زیاد و عدم اطمینان از بازگشت پذیری سیستم به محور اولیه و بسیاری از مشکلات دیگر در این جداساز لرزه‌ای پیشنهادی به شکل تقریباً مطلوبی مرتفع گردیده است.



## ۲- صحت سنجی

## ۲-۱- کلیات

جهت انجام فرآیند صحت سنجی، از تحقی فنگ و همکاران [۱۵] مربوط به سال ۲۰۱۷ که آزمایشات تجربی آن با همکاری دانشگاه جنوب شرقی چین و دانشگاه کلمبیا در نیویورک ایالات متحده انجام شده، انتخاب و تحلیل‌های مربوطه در نرم‌افزار مدل‌سازی اجزای محدود آباکوس نسخه (۳-۶-۱۴) انجام شده است. با توجه به مدل جداساز لرزه‌ای موجود در این مقاله، هم شرایط اصطکاکی و هم شرایط الاستومریک جداسازهای لرزه‌ای به‌طور همزمان مورد صحت سنجی قرار می‌گیرد. شکل (۱)، طرح کلی یک جداگر لاستیکی - سربی اصطکاکی<sup>۱</sup> (SLRB) را نشان می‌دهد که شامل دو بخش در جهت قائم، یعنی بخش لغزشی فوقانی و بخش تکیه‌گاه لاستیکی - سربی تحتانی می‌باشد. بخش لغزشی شامل صفحه اتصال فوقانی<sup>۲</sup>، صفحه فولادی ضد زنگ<sup>۳</sup> و یک مانع یا بازدارنده<sup>۴</sup> است که بر روی صفحه تفلون<sup>۵</sup> قرار دارد و این صفحه تفلونی به‌طور محکم بر روی صفحه ثابت فوقانی<sup>۶</sup> سیستم جداساز با هسته سربی<sup>۷</sup> قرار گرفته است. قطر LRB برابر ۳۰۰ میلی‌متر است. حد لغزش<sup>۸</sup> بین مانع و صفحه ثابت فوقانی LRB برابر ۱۵ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. مانع از یک حلقه فولادی ساخته شده و بر روی صفحه اتصال فوقانی متصل شده است. همچنین قطر مؤثر جداساز تکیه‌گاه لاستیکی - سربی لغزشی (SLRB) و قطر هسته سربی آن به ترتیب برابر ۳۰۰ و ۶۰ میلی‌متر، ضخامت اولیه لایه فولادی و ضخامت لاستیک به ترتیب برابر ۱/۵ و ۳/۳۹ میلی‌متر، تعداد لایه‌های فولادی و لاستیکی به ترتیب ۱۷ و ۱۸ و ارتفاع کلی سیستم برابر ۲۶۲/۲ میلی‌متر است. شکل (۲) نیز مدل جداساز لاستیکی - سربی لغزشی (SLRB) طراحی شده در نرم‌افزار آباکوس جهت صحت سنجی را نشان می‌دهد.



شکل ۱: طرح کلی تکیه‌گاه لاستیکی - سربی لغزشی [۱۵].

<sup>1</sup> sliding lead rubber bearing

<sup>2</sup> Top connection plate

<sup>3</sup> Stainless steel plate

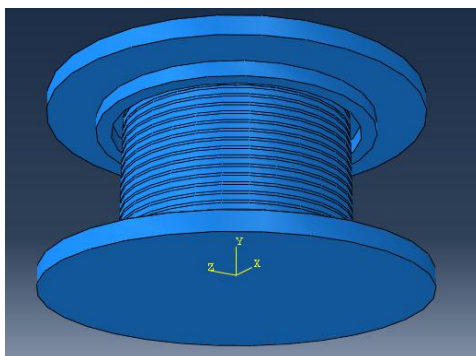
<sup>4</sup> Baffle

<sup>5</sup> Teflon plate

<sup>6</sup> Upper fixing plate

<sup>7</sup> Lead rubber bearing

<sup>8</sup> Slide limit



شکل ۲: مدل تکیه‌گاه لاستیکی - سربی لغزشی طراحی شده در آباکوس جهت صحت سنجی.

اصول عملکرد این سیستم به این صورت است که در ابتدا، بخش LRB، جابجایی بسیار کمی را متحمل می‌شود و نیروی برشی به‌طور مستقیم به بخش لغزشی فوقانی منتقل می‌گردد. با افزایش جابجایی برشی، اگر نیروی برشی LRB از حداکثر نیروی اصطکاک ایستایی سطح مشترک فولاد ضدزنگ - تفلون فراتر رود، بخش لغزشی فوقانی بر روی صفحه تفلونی حرکت خواهد نمود. در ادامه، پس از آنکه جابجایی لغزشی نسبی بخش فوقانی به حداکثر لغزش طراحی رسید (۱۵ سانتیمتر)، صفحه ثابت فوقانی با مانع برخورد خواهد نمود و در این لحظه سیستم LRB با مشخصات استهلاک انرژی هیستریسیس دوخطی سربی بکار خواهد افتاد [۱۶].

## ۲-۲- مدلسازی سیستم جداساز SLRB و اصلاح ساختاری آن در نرم افزار

در فرآیند مدلسازی اجزای محدود، المان‌های فولادی و سربی به ترتیب با چگالی ۷۸۵۰ و  $11300 \text{ kg/m}^3$  و ضریب پواسون ۰/۳ و ۰/۴۴ و لایه‌های لاستیکی از نوع هایپر الاستیک نئو هوک<sup>۹</sup> با ضرایب  $C_{10}=0.2587 \times 10^6$  و  $D_1=1.5828 \times 10^{-3}$  در نظر گرفته شده است. در فرآیند ساخت SLRB، لاستیک‌ها و فولادها با استفاده از فرآیند ولکانیزاسیون<sup>۱۰</sup> یا همان جوش اکسیژن لاستیک و فلزات تحت حرارت زیاد، به هم متصل شده‌اند، به همین دلیل از اتصال نوع Ti برای اتصال لایه‌های فولادی و لاستیکی به هم استفاده شده است که دارای دقت بسیاری زیادی است. لایه‌های فولادهای انتهایی نیز به‌طور محکم به صفحات لایه‌های فولادی - لاستیکی با اتصال نوع Ti، متصل شده‌اند. صفحات تفلونی نیز دارای مدول یانگ ۳۰۰ مگاپاسکال و ضریب پواسون ۰/۴ می‌باشند. همچنین جهت تعریف سطح اصطکاکی بین صفحه تفلونی و صفحه انتهایی فوقانی در نرم‌افزار آباکوس از اصطکاک نوع پنالتی با ضریب اصطکاک ۰/۰۵۵ مطابق مقاله مذکور، استفاده شده است. همچنین جابجایی‌ها در طول جهت X و Z در سطح فوقانی و همچنین جابجایی‌ها در طول Y و Z در انتهای صفحه تحتانی در تمامی آزمایش‌ها محدود شده است.

## ۲-۳- آزمایش فشاری و تعیین سختی قائم

بر اساس روش بارگذاری آزمایشگاهی، نیروی عمودی  $0.7P_0$  و  $1.3P_0$  بر روی سطح فوقانی جداساز اعمال شده است. جابجایی قائم در جهت محور Y، دارای بیشترین مقدار ۱/۱۲ و ۰/۶۴۵ میلی‌متر باشد. سختی قائم SLRB را می‌توان به‌صورت زیر محاسبه نمود [۱۷].

$$K_v = (P_2 - P_1) / (Y_1 - Y_2) = (1.3 - 0.7) \times 707 / (1.12 - 0.645) = 894.93 \text{ KN/mm}$$

<sup>۹</sup> Neo hooke

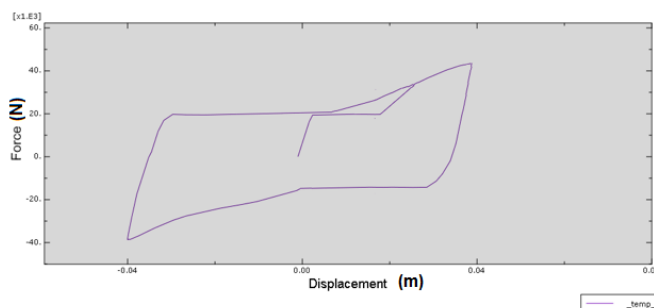
<sup>۱۰</sup> Vulcanization



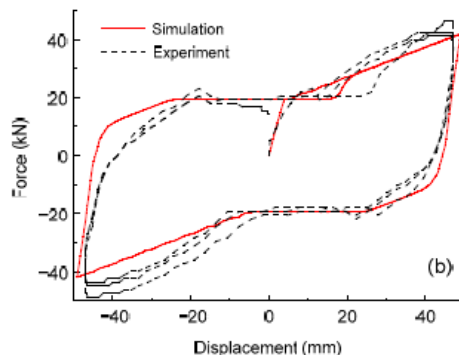
درصد خطای بین نتایج تجربی  $862\text{KN/mm}$  و عددی  $894.93\text{KN/mm}$  برابر  $3/5$  درصد است که بر اساس نتایج تحقیقات استانتون و همکاران [۱] قابل قبول و با یافته‌های مدول بالک لاستیک‌ها سازگار است [۱۸].

#### ۴-۲- آزمایش‌های فشاری-برشی و نمودار هیستریزیس

در آزمایش‌ها فشاری-برشی یا کرنش برشی، یک مجموعه از آزمایش‌ها همبستگی بر روی خصوصیات برشی مواد تعریف شده تا اثرات جابجایی‌های افقی مختلف تحت بار قائم ثابت، مورد بررسی قرار گیرد. فرکانس بارگذاری تمامی جابجایی‌های بارگذاری برابر ۱ هرتز در نظر گرفته شده است. در ادامه یک نمونه از آزمایش‌ها هیستریسیس جهت صحت سنجی در نرم‌افزار آباکوس مورد بررسی قرار گرفته است.



شکل ۳: نمودار هیستریسیس جداساز SLRB با بار قائم  $5\text{Mpa}$  و جابجایی افقی ۴ سانتیمتر در آباکوس.



شکل ۴: نمودار هیستریسیس جداساز SLRB با بار قائم  $5\text{Mpa}$  و جابجایی افقی ۴ سانتیمتر در مقاله پایه مورد نظر.

همانطوریکه در شکل‌های (۳) و (۴) مشاهده می‌گردد، مدل‌سازی انجام شده در نرم‌افزار آباکوس از دقت کافی برخوردار بوده است و بیشترین تطابق لازم با نتایج آزمایشگاهی مربوطه را داشته است. هرچند اختلافات جزئی در آن‌ها مشاهده می‌گردد، اما در حالت کلی نحوه مدل‌سازی جداسازهای لرزه‌ای اصطکاکی و دارای هسته سربی در نرم‌افزار آباکوس، مطابق شرایطی که قبلاً توضیح داده شده، قابل قبول خواهد بود.



### ۳- مدل سازی جداساز چندلایه الاستومریک اصطکاکی پیشنهادی در نرم افزار آباکوس

#### ۳-۱- کلیات

در این بخش، نحوه مدل سازی جداساز و نتایج حاصل از تحلیل آن‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد. به منظور شروع کار و کاهش حجم و زمان محاسباتی و رعایت مسائل عملی، یک نمونه اولیه از جداساز پیشنهادی مطابق تناسب‌های هندسی و مهندسی متداول سیستم‌های جداساز لرزه‌ای مطابق مقاله پایه مذکور، پیشنهاد می‌گردد. در این جداساز پیشنهادی جدید، برای اولین بار از تعدادی هسته‌های کوچک اصطکاکی جهت ایجاد سختی‌های افقی و قائم، به جای هسته‌ی سربی، به منظور ایجاد سختی‌های اولیه و ثانویه استفاده شده است. از مزیت‌های این سیستم پیشنهادی می‌توان به موارد زیر اشاره نمود؛

الف- قابلیت استفاده از مواد مختلف به عنوان جایگزین هسته‌های سربی همراه با ضرایب اصطکاک یا مساحت سطح تماس متفاوت، نظیر فولاد، تفلون، برنج، لنت ترمز و غیره و قابلیت کنترل میزان سختی اولیه و ثانویه هسته‌ها مطابق نیاز مسئله.

ب- محدودیت حداکثر جابجایی افقی و قائم با تعبیه موانع افقی و قائم داخلی جهت جلوگیری از تغییر شکل‌های بسیار زیاد و از کار افتادن سیستم در زلزله‌های شدید

ج- وزن سبک‌تر نسبت به سیستم‌های با هسته سربی به دلیل استفاده از هسته‌های اصطکاکی با جنس برنز، برنج، لنت ترمز و غیره با چگالی کمتر به جای هسته‌های سربی

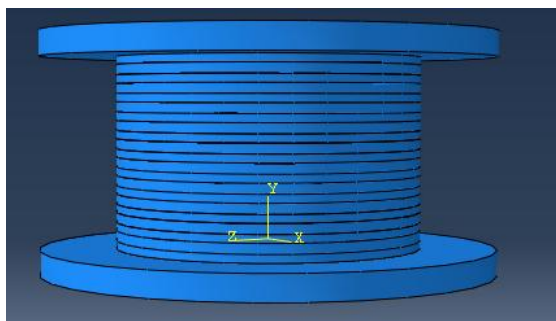
د- کاهش نگرانی‌های مربوط به نحوه اتصال لایه‌های مختلف، مخصوصاً اتصال لایه‌های انتهایی به هسته با وجود هسته‌های اصطکاکی.

و- کاهش هزینه‌های نگهداری و نیاز به تعویض بسیار کمتر هسته‌ها، نسبت به سیستم با هسته سربی بدون دلیل عدم ورود هسته‌ها به ناحیه پلاستیک.

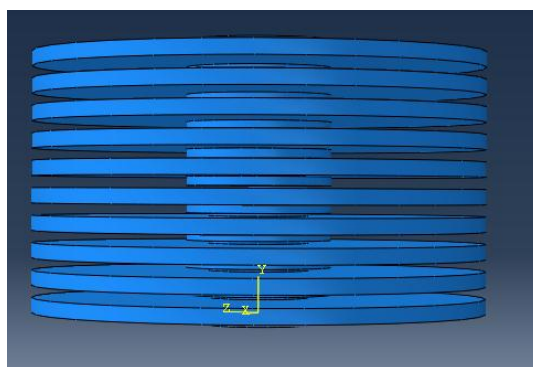
ی- امکان بازگشت پذیری مناسب سیستم با کمک موانع افقی و قائم و لایه‌های فولادی-لاستیکی اطراف و ایجاد رفتار هیستریزیس کامل.

#### ۳-۲- ساختار هندسی سیستم جداساز لرزه ای جدید

همانطوریکه قبلاً بیان شد، در این جداساز لرزه‌ای جدید از تعدادی صفحات نازک اصطکاکی به جای هسته‌ی سربی جهت ایجاد سختی اولیه و ثانویه استفاده شده است. قطر مؤثر جداساز چندلایه الاستومریک اصطکاکی جدید و قطر هسته اصطکاکی آن به ترتیب برابر ۳۰۰ و ۶۰ میلی‌متر، ضخامت اولیه لایه فولادی و ضخامت لاستیک به ترتیب برابر ۱۰ و ۸ میلی‌متر، تعداد لایه‌های فولادی و لاستیکی به ترتیب ۱۱ و ۱۰ و ارتفاع کلی سیستم برابر 238 mm می‌باشد. شکل (۵)، طرح کلی مدل سازی اولیه جداساز لرزه‌ای الاستومریک چندلایه اصطکاکی پیشنهادی را در نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس نشان می‌دهد. در هر حفره نیز، هسته‌های اصطکاکی تحتانی از جنس تفلون و هسته‌های فوقانی از جنس فولاد در نظر گرفته شده است.



شکل ۵: مدل‌سازی اولیه سیستم پیشنهادی جدید در نرم‌افزار آباکوس.



شکل ۶: حفره‌های میانی و هسته‌های سربی در سیستم پیشنهادی جدید (با حذف لایه‌های کناری).

با توجه به شکل (۶)، بخش میانی لایه‌های لاستیکی دارای حفره‌های دایره‌ای شکل به قطر ۱۰۶ میلی‌متر است که در آن در هر حفره، دو لایه هسته اصطکاکی به ضخامت ۴ میلی‌متر و قطر ۶۰ میلی‌متر روی هم قرار گرفته است. لایه‌های فولادی به صورت یک دایره کامل و بدون حفره میانی، جهت اتصال صفحات اصطکاکی فوقانی و تحتانی می‌باشند. مطابق شکل (۶)، هر حفره دارای دو هسته اصطکاکی است که به صفحات فولادی مجاور خود به طور کامل متصل شده است و امکان حرکت افقی و قائم آن‌ها وجود ندارد. در واقع سطوح اصطکاکی موردنظر، فقط سطوح مشترک بین هسته‌های سربی در هر حفره داخلی است. دو هسته اصطکاکی انتهایی در ارتفاع نیز از یک سمت به صفحات فولادی انتهایی سیستم متصل شده است. همچنین دو مانع<sup>۱۱</sup> داخلی در هر حفره تعبیه شده است که به صورت حلقه‌ای شکل طراحی شده‌اند. حلقه فوقانی به سطح زیرین لایه فوقانی و حلقه تحتانی در اطراف هسته پایینی در هر حفره قرار گرفته است.

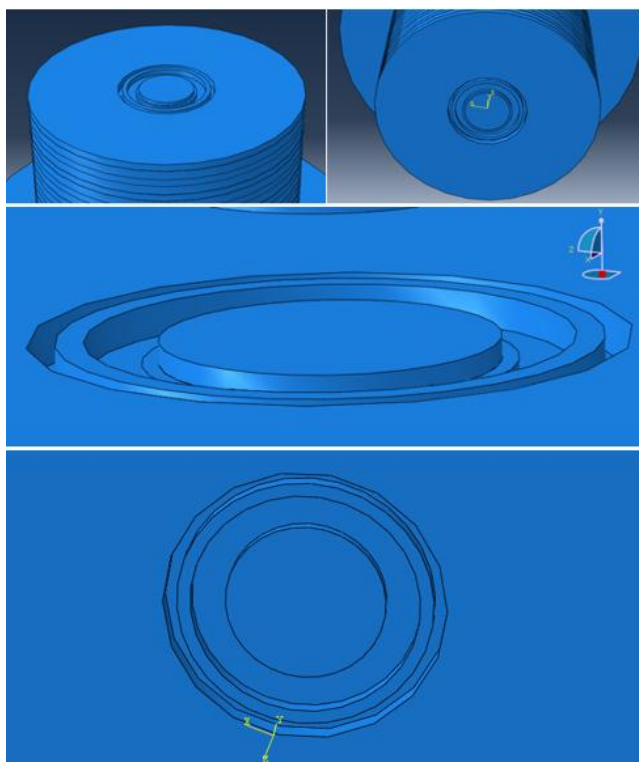
این موانع یا حلقه‌های داخلی به منظور محدود نمودن و ایجاد اطمینان خاطر از عدم ایجاد جابجایی‌های افقی و قائم بسیار زیاد سیستم در زلزله‌های شدید و عملکرد صحیح سیستم لرزه‌ای، در نظر گرفته شده است. حلقه فوقانی و تحتانی به ترتیب دارای قطر بیرونی ۹۶ و ۶۶ میلی‌متر و قطر داخلی ۸۶ و ۶۰ و ضخامت ۶ و ۴ میلی‌متر در هر حفره می‌باشند. مانع فوقانی دارای ۵ میلی‌متر فاصله با لایه‌های فولادی - لاستیکی اطراف و مانع تحتانی چسبیده به هسته اصطکاکی تحتانی است. این فاصله جهت عملکرد صحیح سیستم در جابجایی‌های زیاد و تغییر شکل قابل قبول لایه‌های لاستیکی اطراف، ایجاد شده است. در واقع بدون وجود فاصله کافی بین مانع فوقانی و لایه‌های اطراف، عملکرد سیستم در جابجایی‌های زیاد با مشکل مواجه خواهد شد. همچنین مانع فوقانی، ۲ میلی‌متر

---

<sup>11</sup> Baffle



ضخامت بیشتری نسبت به مانع تحتانی جهت محدود نمودن جابجایی‌های بسیار زیاد افقی است. فاصله افقی بین مانع فوقانی و تحتانی نیز ۱۰ میلیمتر در نظر گرفته شده است که در واقع همان حد جابجایی تعریف شده در هر حفره است.



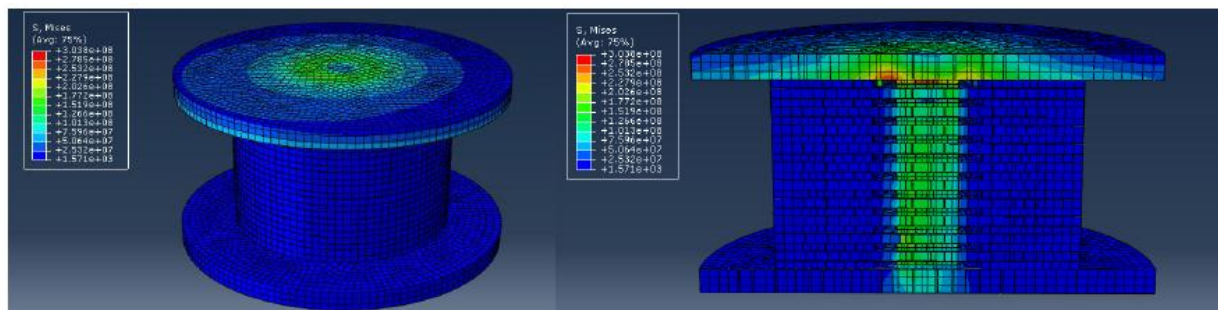
شکل ۷: ایجاد موانع داخلی در سیستم پیشنهادی جدید.

فاصله بین موانع داخلی و لایه‌های اطراف، بنابر شرایط مورد نیاز مسئله، قابل تغییر است و در واقع این فاصله یکی از ویژگی‌های بارز این سیستم پیشنهادی جدید، جهت ایجاد حرکت و استفاده از پتانسیل اصطکاکی آن است و بدون وجود این فاصله افقی مابین دو مانع داخلی، عملاً استفاده از هسته‌های سربی امکان پذیر نخواهد بود. به طور کلی می‌توان بیان نمود که در هنگام ایجاد جابجایی افقی زیاد، حلقه‌ی فوقانی با حلقه تحتانی که هر دو از جنس فولاد می‌باشند، برخورد نموده و مانع از جابجایی‌های بسیار زیاد و عدم تحمل کافی لاستیک‌ها و خرابی سیستم، می‌گردد. این موانع یا حلقه‌های داخلی در جابجایی افقی کوچک‌تر از حد مجاز تعریف شده، کارایی خاصی نداشته، اما در جابجایی‌های افقی قائم اولیه زیاد و بار قائم زلزله، با برخورد با یکدیگر، مانع ایجاد جابجایی‌های بیش از حد مورد انتظار در جهت افقی و قائم، می‌گردند. همچنین فاصله حلقه فوقانی و سطح لایه فولادی لایه پایین‌تر، ۲ میلیمتر و در کل لایه‌ها ۲۲ میلیمتر در نظر گرفته شده است. در واقع ۱۲ میلیمتر حداکثر میزان جابجایی قائم مجاز این سیستم خواهد بود. حداکثر جابجایی افقی مجاز این سیستم نیز در حالت نظری با در نظر گرفتن ۱۱ حفره‌ی میانی، ۱۱۰ میلیمتر خواهد بود. در این پژوهش این فاصله‌ها با سعی و خطا در نرم‌افزار آباکوس، به دست آمده است، اما به منظور بررسی دقیق‌تر مسئله و بهینه‌سازی فواصل آن، باید مطالعات دقیق‌تری بر اساس محاسبات نظری و آزمایش‌های تجربی در پژوهش‌های دیگری انجام گیرد که جزئیات آن در این پژوهش مدنظر نمی‌باشد.



### ۳-۳- تعیین سختی قائم جداگر پیشنهادی جدید

به منظور تعیین سختی قائم می توان بار قائم ثابتی را به سیستم جداساز اعمال نموده و با استفاده از جابجایی قائم ایجاد شده ، سختی قائم آن با استفاده از معادله مربوطه به دست آورد. جهت تعیین جابجایی قائم تحت بار ثابت ، دو مرحله بارگذاری قائم و هر مرحله ، سه سیکل مشابه ، در مدت زمان هر سیکل ۱ ثانیه ، انجام شده است و میزان جابجایی قائم متوسط یا مؤثر آن از طریق میانگین گیری این سه جابجایی قائم ، به دست آمده است. نقطه کنترل جابجایی قائم نیز در وسط سطح فوقانی صفحه انتهایی بالایی در نظر گرفته شده است. تنش قائم یکنواخت به سطح فوقانی جداساز پیشنهادی جهت تعیین سختی قائم در سه سیکل متوالی یک ثانیه ، اعمال شده است و با به دست آوردن میانگین جابجایی های وارده در هر بخش ، سختی قائم آن تعیین می گردد . بر این اساس ، جداساز لرزه ای الاستومریک اصطکاکی پیشنهادی با اعمال تنش قائم ۱۳ و ۷ مگاپاسکال، به ترتیب میانگین جابجایی قائم ۳ و ۲/۵ میلیمتر را تجربه نموده است .



شکل ۸: اعمال تنش قائم در گام اولیه سیستم جداساز پیشنهادی جدید.

سختی قائم سیستم پیشنهادی را می توان به صورت زیر محاسبه نمود :

$$K_v = (P_2 - P_1) / (Y_1 - Y_2) = (1.3 - 0.7) \times 707 / (3 - 2.5) = 848.4 \text{ KN/mm}$$

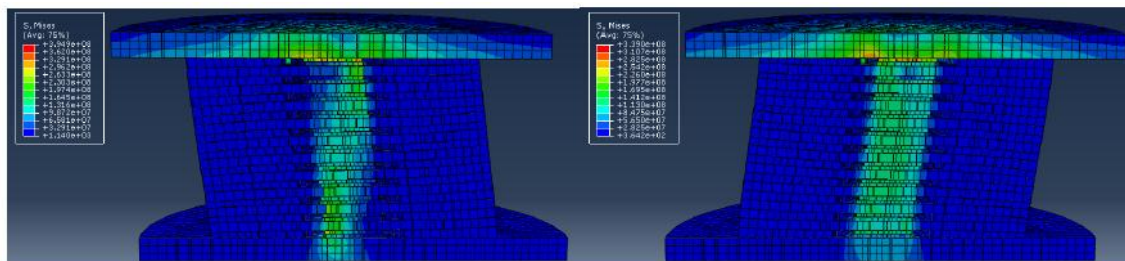
درصد خطای بین نتایج تجربی 862KN/mm مشابه در مدل SLRB و مدل جداساز عددی پیشنهادی جدید با هندسه کلی یکسان 848.4KN/mm، برابر ۱/۵ درصد است که نسبت به حالت قبلی (۳/۵٪) دارای اختلاف کمتری با حالت آزمایشگاهی است [۱۵] و از نظر عددی ، سیستم پیشنهادی جدید دارای سختی کمی کمتر نسبت به سیستم SLRB مشابه خود است ، زیرا در این سیستم جدید ، به جای هسته سربی با سختی بالا ، از مواد دیگر نظیر تفلون ، برنج ، تفلون و غیره استفاده می شود که دارای سختی کمتر و در نتیجه جابجایی ماندگار قائم بیشتری است و البته سختی سیستم پیشنهادی جدید به سختی آزمایشگاهی مشابه خود در سیستم SLRB ، نزدیک تر است.

### ۳-۴- همبستگی کرنش برشی یا بار افقی سیستم پیشنهادی

در آزمایش های کرنش برشی یا فشاری- برشی ، یک مجموعه از آزمایش ها همبستگی بر روی خصوصیات برشی مواد تعریف شده تا اثرات جابجایی های افقی مختلف تحت بار قائم ثابت ، مورد بررسی قرار گیرد . در آزمایش های همبستگی بار یا جابجایی افقی ، فشار عمودی ۵ مگاپاسکال در گامی جداگانه ، به صورت خطی اعمال شده و تا پایان آزمایش ثابت نگه داشته شده است جابجایی های

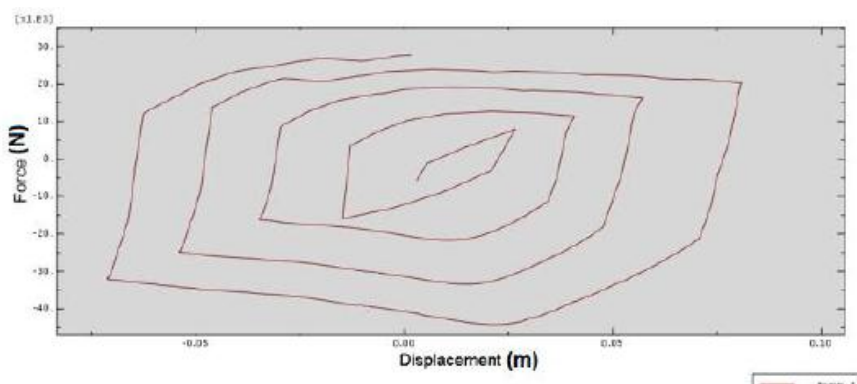


برشی با حداکثر ۲۰، ۳۵، ۵۰ و ۸۰ میلیمتر بر روی سطح تحتانی صفحه اتصال زیرین اعمال شده است. فرکانس بارگذاری تمامی جابجایی‌های بارگذاری برابر 1Hz بوده است. ضریب اصطکاک افقی بین لایه‌های اصطکاکی نیز مطابق پیشنهاد فنگ [۱۵]، برابر ۰/۰۵۵ و در طول تحلیل ثابت و از نوع پنالتی در نظر گرفته شده است. از اصطکاک بین موانع داخلی با صفحات اصطکاکی صرف نظر شده است. همچنین نقطه کنترل جابجایی افقی، نقطه‌ای در وسط سطح تحتانی صفحه اتصال پایینی در نظر گرفته شده است.



شکل ۹: اعمال همزمان تنش قائم و جابجایی‌های قائم مختلف سیستم پیشنهادی جدید.

مطابق شکل (۹)، اولین لایه اصطکاکی فوقانی نیز در حرکات افقی بیشترین تنش نسبی و لایه‌های میانی اصطکاکی، بیشترین جابجایی‌های افقی نسبی را تحمل می‌کنند. با توجه به جهت اعمال بار افقی، سهم بخش‌های مختلف هسته‌های اصطکاکی از تنش‌های قائم و افقی وارده، تغییر می‌نماید.



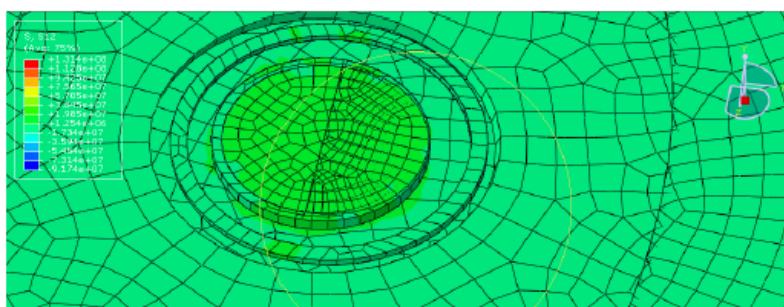
شکل ۱۰: نمودار نیرو - جابجایی سیستم پیشنهادی جدید با اعمال تنش قائم ثابت 5Mpa و ضریب اصطکاک ثابت  $\mu=0.055$

با توجه به شکل (۱۰)، می‌توان بیان نمود که با ثابت ماندن بار قائم و تغییر میزان جابجایی افقی در شدت‌های مختلف زلزله افقی، جداساز پیشنهادی رفتار هیستریزس کاملی را از خود نشان می‌دهد. این رفتار در سیکل اول به صورت تقریباً خطی آغاز می‌گردد و در سیکل‌های بعدی به صورت منحنی شکل، ادامه پیدا می‌کند. در هر نیم سیکل نیز ابتدا افزایش موضعی مقاومت از نظر عددی، مشاهده می‌گردد که دلیل آن سهم شدن بیشتر لایه‌های مختلف اصطکاکی در دریافت استهلاک انرژی زلزله است و با حرکت افقی تمامی لایه‌های اصطکاکی، اندکی کاهش موضعی و سپس ثبات تقریبی مقاومت تا انتهای نیم سیکل مشاهده می‌گردد.

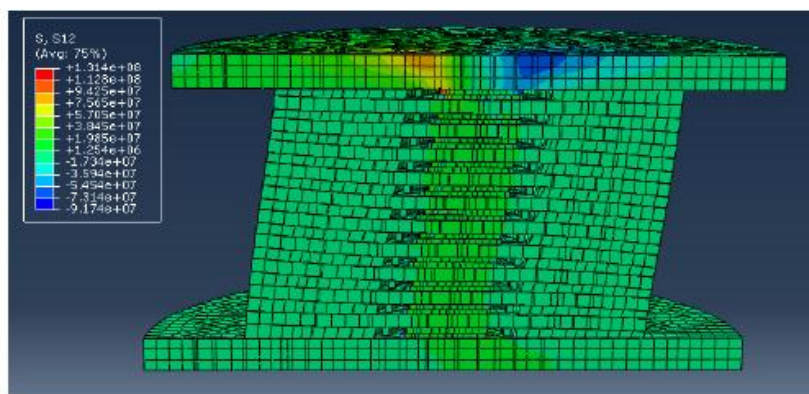


## ۳-۵- بررسی تنش برشی قائم (S12) در جداساز پیشنهادی جدید

با توجه به آنکه محور  $Y$ ، عمود بر صفحه جداساز و دو محور  $X$  و  $Z$ ، مماس بر صفحه است، بنابراین عبارت (S11)، بیانگر تنش عمودی افقی و عبارت (S22) بیانگر تنش‌های عمود بر صفحه و عبارت (S12) بیانگر تنش برشی می‌باشد. همان‌طور که در شکل 11 ملاحظه می‌شود، تنش برشی قائم S12 در هسته‌های اصطکاکی به‌صورت موضعی تغییر می‌کند و در لایه‌های لاستیکی-فولادی اطراف دارای تقریباً مقدار ثابت  $1.42 \times 10^7$ - هست که مقادیر بسیار ناچیزی است و در هسته‌های سربی در حداکثر حالت خود دارای مقادیر  $2.78 \times 10^7$ + می‌باشد.



شکل ۱۱: تنش برشی قائم S12 در مسیر افقی (جهت X) در جداساز پیشنهادی.



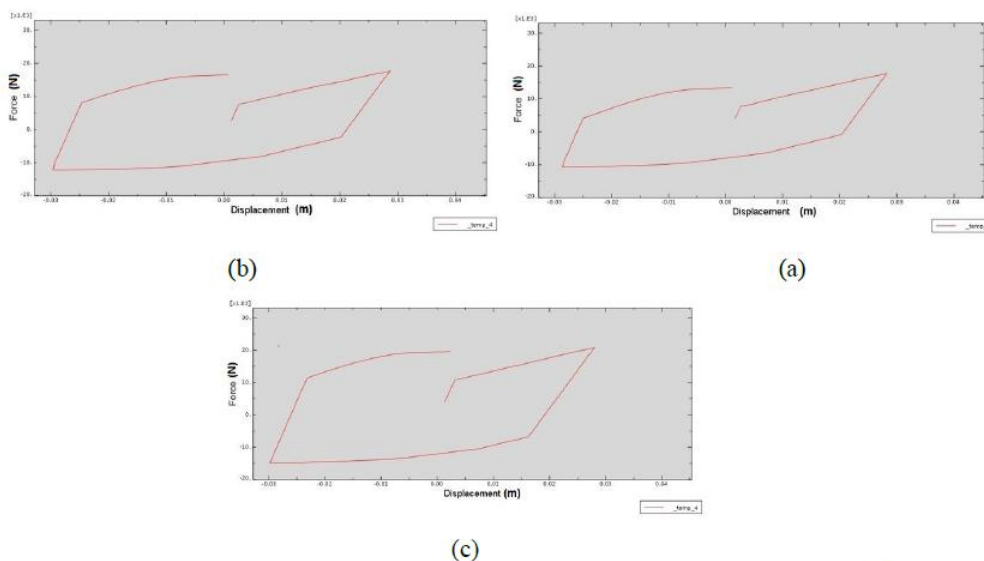
شکل ۱۲: تنش برشی قائم S12 در مسیر قائم (جهت Y) در جداساز پیشنهادی.

همان‌طوریکه در شکل (۱۲) مشاهده می‌گردد، تنش برشی قائم S12 در صفحه انتهایی فولادی فوقانی دارای تغییرات بسیار زیادی بوده است و در راستای قائم لایه‌های لاستیکی- فولادی اطراف تقریباً ثابت و برابر  $1.42 \times 10^7$ - و در هسته‌های اصطکاکی با اعمال جابجایی افقی، تنش برشی قائم S12 در راستای قائم هسته‌ها با توجه به جهت اعمال بار تغییر می‌کند و در حالت کلی در حداکثر مقدار خود، تقریباً برابر  $6.98 \times 10^7$  می‌باشد. لازم به ذکر است، میزان تنش برشی مجاز در فولاد 96 Mpa بوده که از میزان به‌دست‌آمده در این تحلیل بسیار بیشتر می‌باشد. مقادیر اخیر از تنش عمودی مجاز فولاد یعنی 145 Mpa کوچک‌تر است.



۳-۶- همبستگی بار قائم در سیستم پیشنهادی

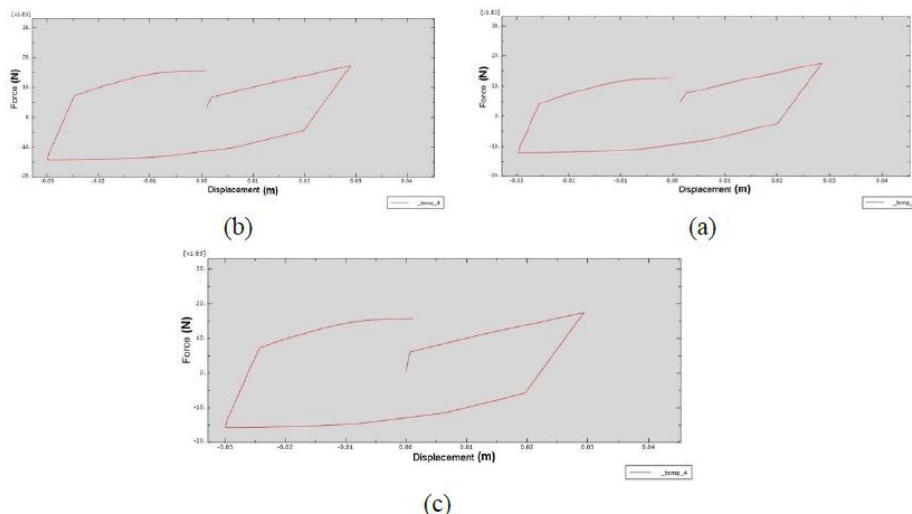
این مجموعه از تحلیل‌ها، جهت بررسی تأثیر بار قائم مختلف با جابجایی افقی یکسان، انجام می‌گیرد. این مجموعه بارهای قائم از حداکثر ظرفیت باربری جداساز کمتر می‌باشند. در این بخش، مطابق سناریوهای تعریف‌شده در تحقیقات فنگ [۱۵]، فشارهای عمودی به ترتیب  $\frac{2}{8}$ ، ۵ و ۷ مگاپاسکال با حداکثر جابجایی برشی ۳۰ میلی‌متر بر جداساز پیشنهادی، اعمال شده است و همچنین ضریب اصطکاک در تمامی آزمایش‌های این بخش، به صورت پیش فرض برابر  $0.05$ ، در نظر گرفته شده است. به طور کلی در این بخش، سه مرتبه تحلیل با بارهای قائم متفاوت و جابجایی‌های افقی یکسان انجام گرفته است. شکل‌های (۱۳)، تغییرات تنش جداساز پیشنهادی را با اعمال بار قائم و افقی نشان می‌دهد. همانطوریکه در شکل‌های (۱۳) مشاهده می‌گردد، با افزایش بار قائم، مقاومت اولیه لازم برای شروع حرکت افزایش یافته است، اما با توجه به ثابت بودن ضریب اصطکاک در این بخش، سختی یا شیب اولیه نمودارها تقریباً ثابت باقی مانده است. همچنین در حالت کلی، مساحت نمودارهای هیستریسیس و در نتیجه میزان استهلاک انرژی نیز با افزایش تنش قائم، افزایش یافته است. شکل کلی نمودارها نیز با افزایش تنش قائم، تغییر محسوسی نداشته است.



شکل ۱۳: تأثیر بارهای قائم مختلف با جابجایی افقی و ضریب اصطکاک یکسان  $\mu=0.055$ ، در سیستم پیشنهادی؛ (الف) بار قائم  $2.8\text{Mpa}$ ، (ب) بار قائم  $5\text{Mpa}$ ، (ج) بار قائم  $7\text{Mpa}$

۳-۷- تأثیر تغییرات ضرایب اصطکاک بر عملکرد جداگر لرزه ای پیشنهادی

همانطوریکه قبلاً بیان شد، در این سیستم لرزه‌ای جدید از هسته‌های اصطکاکی به جای هسته‌های سربی استفاده شده است. به همین منظور، جهت بررسی تأثیر ضریب اصطکاک بر رفتار و عملکرد سیستم، فشار قائم ۵ مگاپاسکال و جابجایی افقی ۳۰ میلی‌متر با ضرایب اصطکاکی مختلف از  $0.05$ ،  $0.1$ ،  $0.15$ ،  $0.2$  در نظر گرفته شده است که در شکل‌های (۱۴) قابل مشاهده است. ضرایب اصطکاک در نرم‌افزار آباکوس از نوع پنالتی و فقط در سطوح مشترک بین هسته‌های اصطکاکی، در نظر گرفته شده است. همچنین از اصطکاک بین هسته اصطکاکی فوقانی هر لایه بر روی موانع یا حلقه‌های تحتانی در جابجایی‌های افقی، صرف نظر شده است. همانطوریکه در شکل‌های (۱۴) مشاهده می‌گردد، افزایش ضریب اصطکاک باعث افزایش سختی و مقاومت اولیه می‌گردد. همچنین در حالت کلی مساحت زیر نمودار و در واقع میزان استهلاک انرژی با افزایش ضریب اصطکاک افزایش یابد.



شکل ۱۴: تأثیر ضرایب مختلف اصطکاکی بر عملکرد جداساز پیشنهادی؛ (الف)  $\mu=0.1$ ، (ب)  $\mu=0.15$ ، (ج)  $\mu=0.20$

همچنین با تغییر ضرایب اصطکاک مختلف، در رفتار نمودارهای هیستریزس در سیکل اول تفاوت چندانی مشاهده نمی‌گردد. با این حال با توجه به بررسی‌های انجام‌شده، اعمال ضریب اصطکاک بالای ۰/۲۵، سیستم رفتار مناسبی از خود نشان نمی‌دهد و اعمال ضرایب بسیار کم (کمتر از ۰/۰۳)، مقاومت و سختی موردنیاز را تأمین نمی‌نماید.

#### ۴- جمع بندی و نتیجه گیری

در این مقاله یک جداگر لرزه‌ای الاستومریک چندلایه اصطکاکی جدید پیشنهاد و در نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس مدل‌سازی شده است. در این جداگر جدید از هسته‌های اصطکاکی به‌جای هسته سربی استفاده شده که برخی از مشکلات سیستم‌های جداگر لرزه‌ای قبلی مانند عدم قابلیت کنترل تغییر شکل‌های افقی، قائم و سختی اولیه و غیره، مرتفع گردیده است. همچنین دو مانع حلقه‌ای شکل داخلی نیز جهت جلوگیری از تغییر شکل‌ها و جابجایی‌های افقی و قائم بیش‌ازحد در اطراف هسته‌های اصطکاکی تعبیه شده است. نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد که جداگر پیشنهادی دارای سختی اولیه قائم قابل‌قبول و رفتار هیستریزس کامل در جابجایی‌های افقی و تنش‌های قائم متفاوت است. همچنین تنش‌های داخلی لایه‌ها در شرایط مختلف بارگذاری نیز در حد قابل‌قبول بوده است و با ثابت ماندن بار قائم و تغییر جابجایی‌های افقی، رفتار هیستریزس کاملی در سیکل‌های مختلف از خود نشان داده است. همچنین استفاده از هسته‌های اصطکاکی داخلی و موانع حلقه‌ای شکل داخلی کمک شایانی به عملکرد صحیح سیستم در تغییر شکل‌های افقی و قائم زیاد نموده است و امکان بازگشت‌پذیری مطلوب سیستم به محور اولیه را فراهم نموده است. در نهایت می‌توان بیان نمود که در این سیستم پیشنهادی با افزایش ضرایب اصطکاک هسته‌ها، سختی اولیه اندکی افزایش می‌یابد، اما جهت عملکرد صحیح رفتار این جداساز، این ضرایب اصطکاکی نباید از حد مشخصی کمتر و یا بیشتر باشد. این مدل جداگر ترکیبی الاستومریک چندلایه و اصطکاکی، برای نخستین بار با هسته‌های اصطکاکی و موانع داخلی پیشنهاد شده است. بنابراین جهت بررسی عملکرد صحیح سیستم لرزه‌ای در شرایط زلزله‌های واقعی، آزمایش‌های آزمایشگاهی مطابق با استانداردهای معتبر مربوطه پیشنهاد می‌گردد.



۵- مراجع

- 1- Stanton, J. F., Roeder, C. W., Mackenzie-Helnwein, P., White, C., Kuester, C., and Craig, B., 2007, **Rotation limits for elastomeric bearings**. Washington D.C.: National Cooperative Highway Research Program (NCHRP), Transportation Research Board.
- 2- Aria, M., and Akbari, R., 2013, **Inspection, condition evaluation and replacement of elastomeric bearings in road bridges**, Structure and Infrastructure Engineering, Vol.9, No.9, pp.918-934.
- 3- Buckle, I. G., and Kelly, J. M., 1986, **Properties of slender elastomeric isolation bearings during shake table studies of a large-scale model bridge deck**. In: **Joint sealing and bearing systems for concrete structures**, American Concrete Institute, Vol.1, pp. 247-269.
- 4- Koh, C. G., and Kelly, J. M., 1986, **Effects of axial load on elastomeric bearings**, Earthquake Engineering Research Center, Rep. UCB/EERC-86/12, University of California, Berkeley.
- 5- Warn, G. P., and Ryan, K. L., 2012, **A review of seismic isolation buildings: historical development and research needs**, Buildings, Vol.2, No.3, pp.300-325.
- 6- Basu, B., Bursi, O. S., and Casciati, F., 2014, **A European association for the control of structures joint perspective. Recent studies in civil structural control across Europe**, Structural Control and Health Monitoring, Vol.21, No.12, pp.1414-1436.
- 7- Pan, P., Ye, L. P., and Shi, W., 2012, **Engineering practice of seismic isolation and energy dissipation structures in China**, Science China Technological Sciences, Vol.55, No.11, pp. 3036-3046.
- 8- Tyler, R. G., and Robinson, W. H., 1984, **High-strain tests on lead rubber bearings for earthquake loadings**, Bulletin of the New Zealand National Society Earthquake Engineering, Vol.17, No.2, pp.90-105.
- 9- Hwang, J. S., Chiou, J. M., and Sheng, L. H., 1996, **A refined model for base-isolated bridge with bi-linear hysteretic bearings**, Earthquake Spectra, Vol.12, No.2, pp.245-273.
- 10- Ryan, K. L., Kelly, J. M., and Chopra, A. K., 2004, **Experimental observation of axial load effects in isolation bearings**, 13th World Conference on Earthquake Engineering, Paper No.1707.
- 11- Nguyen, H. H., and Tassoulas, J. L., 2010, **Directional effects of shear combined with compression on bridge elastomeric bearings**, Journal of Bridge Engineering, Vol.15, No.1, pp.73-80.
- 12- Luca Landi, G. G., 2016, **Comparison of different models for friction pendulum isolators in structures subjected to horizontal and vertical ground motions**, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol.81, pp.201-215.
- 13- Murat Eröz, 2013, **The influence of design parameters on the response of bridges seismically isolated with the Friction Pendulum System (FPS)**, Engineering Structures, Vol.56, pp.585-599.
- 14- Murat Eröz, 2008, **Bridge seismic response as a function of the Friction Pendulum System (FPS) modeling assumptions**, Engineering Structures, Vol.30, pp.3204-3212.
- 15- Yi-feng, Hao, 2017, **Explicit finite element analysis and experimental verification of a sliding lead rubber bearing**, Journal of Zhejiang University-SCIENCE A, China, Vol.18, No.5, pp.363-376.



- 16- Xing, C. X., Wang, H., and Li, A. Q., 2012, **Design and experimental verification of a new multi-functional bridge seismic isolation bearing**, Journal of Zhejiang University- SCIENCE A (Applied Physics & Engineering), Vol.13, No.12, pp.904-914.
- 17- SAC (Standardization Administration of the People's Republic of China), 2006, **Rubber Bearings—Part II: Elastomeric Seismic-Protection Isolators for Bridges**, GB 20688.2-Standardization Administration of the People's Republic of China (in Chinese).
- 18- Constantinou, M. C., Kartoum, A., and Kelly, J. M., 1992, **Analysis of compression of hollow circular elastomeric bearings**, Engineering Structures, Vol.142, No.2, pp.103-111.