

## بررسی اثر مؤلفه قائم و افقی زلزله بر جداسازهای اصطکاکی و پاندولی – اصطکاکی

افشین کلانتری

استادیار، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران  
a.kalantari@iiees.ac.ir

سید امیر حسین مؤیدی

دانشجو، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران  
a.moayedi@iiees.ac.ir

کلیدواژه‌ها: جداساز اصطکاکی، جداساز پاندولی-اصطکاکی، تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی، نمودار نیرو-جابجایی

### چکیده

برخی سازه‌ها در مناطق نزدیک گسل در معرض خطر و آسیب‌دیدگی شدید قرار دارند. یکی از راه‌های مناسب برای کاهش تقاضای لرزه‌ای سازه‌ها افزایش زمان تناوب و میرایی می‌باشد که این مهم توسط جداسازها امکان‌پذیر خواهد بود. با توجه به این موضوع عملکرد مناسب سازه‌های جداسازی شده در مناطق نزدیک گسل به عملکرد مناسب جداسازها تحت مؤلفه قائم زلزله وابسته است. مدل‌های مورد مطالعه در این تحقیق دو جداساز اصطکاکی و پاندولی - اصطکاکی بوده که در نرم‌افزار MATLAB مدل شده و تحت شتاب‌نگاشت‌های سه زلزله‌ی لوماپریا، طبس و نورتریج در دو بعد قرار گرفته‌اند. در این تحقیق به بررسی پاسخ‌های دو جداساز اصطکاکی و پاندولی-اصطکاکی و تفاوت عملکرد بین این دو جداساز پرداخته و همچنین اثر مؤلفه قائم بر پاسخ‌های جداسازها بررسی شده است. طبق نتایج به‌دست‌آمده مؤلفه قائم بر نیروی برشی و جابجایی نسبی جداسازها تأثیرگذار است و جداساز اصطکاکی-پاندولی بر جداساز اصطکاکی خالص به علت کاهش جابجایی ماندگار مزیت دارد.

### مقدمه

در سال‌های اخیر جداساز لرزه‌ای به‌طور خاص در طراحی لرزه‌ای سازه‌ها مورد توجه قرار گرفته است. هدف اصلی از این کار، جداسازی ارتعاش سازه از زمین به‌جای استفاده از روش‌های مرسوم مقاوم در برابر زلزله می‌باشد. استفاده از سیستم‌های جداسازی که باهدف کاهش تقاضای لرزه‌ای انجام می‌شود روشی مناسب برای محافظت از سازه در برابر خسارات ناشی از زلزله خواهد بود. از آنجاکه کاهش تقاضای سازه، در صورت عملکرد صحیح جداسازها در هنگام زلزله صورت می‌گیرد. عوامل مؤثر بر عملکرد جداسازها اهمیت می‌یابند، از مواردی که عملکرد جداسازها را در مناطق نزدیک گسل تحت تأثیر قرار می‌دهد می‌توان به مؤلفه قائم زلزله و همچنین ضربه‌های قوی زلزله اشاره داشت. در ارتعاشات لرزه‌ای با مؤلفه قائم قابل توجه که اغلب در نواحی نزدیک گسل لرزه‌زا ثبت شده‌اند، برآیند شتاب جاذبه و زلزله موجب تغییر در بار قائم و نوسان در نیروی محوری اعضای حامل این بار می‌گردد. از آنجاکه در جداسازهای لغزشی (اصطکاکی) نیروی جانبی متناسب با این نیروی محوری است، انتظار می‌رود پاسخ نیرو-جابجایی سازه به‌این ترتیب دچار نوسان گردد.

### مروری بر مطالعات گذشته

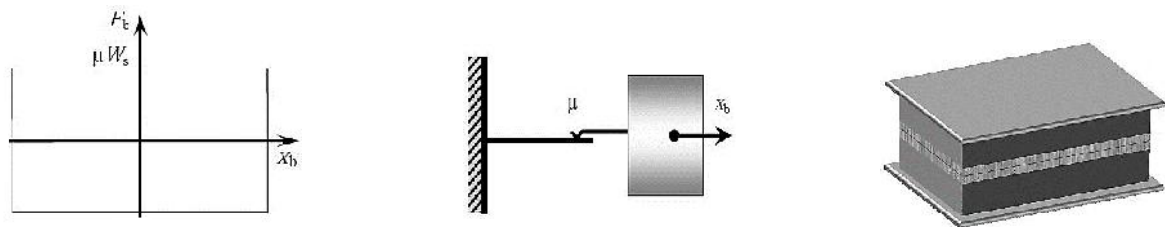
خشنودیان و معتمدی (خشنودیان و معتمدی ۱۳۸۹) به بررسی اثر مؤلفه قائم زلزله بر رفتار ساختمان‌های فولادی جداسازی شده پرداخته و در نظر گرفتن مؤلفه قائم را به دلیل نیروی محوری کششی که در لحظاتی از زمان رخداد زلزله نادیده گرفته می‌شود لازم دانسته‌اند. در مطالعه دیگر وارن و همکارش (Warn and Whittaker, 2008) به این نتیجه دست یافتند که در استفاده‌ی ترکیبی از جداسازها مانند اصطکاکی با سطح صاف و الاستومریک، کاهش در میزان سختی قائم باید در نظر گرفته شود. در مطالعه چوهیو (Cho Hyo and Seok, 2000) مشخص شد که حل معادلات حرکت دز جداسازها پاسخ‌های پل را به‌صورت مؤثری کاهش می‌دهد. در مقابل برخی از مطالعات انجام‌شده بر عدم تفاوت قابل توجه در پاسخ‌ها در حالت با و بدون مؤلفه قائم تأکید دارند از جمله‌ی این مطالعات می‌توان به مقاله ایمورا و همکاران (Iemura et al., 2005) اشاره کرد. بررسی مدل آزمایشگاهی در این مطالعه نشان می‌دهد تغییرات نیروی قائم در لغزنده‌ها به علت حرکت گهواره‌ای و شتاب قائم، تفاوت قابل توجهی در پاسخ‌های سیستم جداساز ایجاد نمی‌کند و پاسخ لرزه‌ای پل‌های جداسازی شده توسط جداساز مورد نظر در حالت با و بدون مؤلفه قائم تقریباً



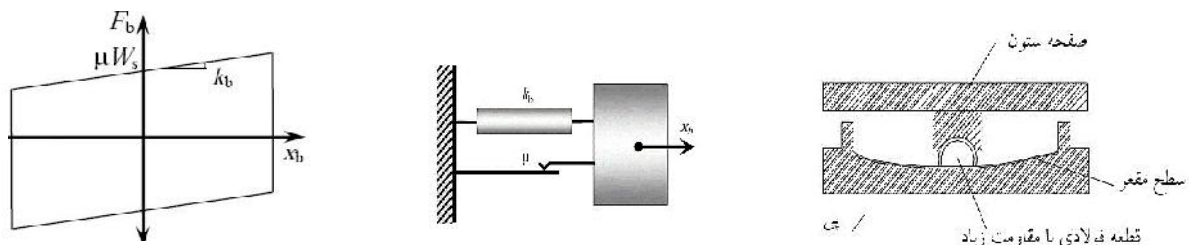
شبهه به هم می‌باشد. جانگید (Jangid, 2005) به این نتیجه دست‌یافت که جابجایی در سیستم پاندولی-اصطکاکی برای حرکات نزدیک گسل اما بدون مؤلفه قائم برای مقادیر کم ضریب اصطکاک اهمیت پیدا می‌کند. ناکاجیما و همکارانش (Nakajima et al., 2000) نیز دریافتند که حرکات قائم اثر زیادی بر پاسخ زمین‌لرزه افقی ندارد و برای حرکات نوسانی که پیک‌های حرکت قائم و افقی هم‌زمان رخ می‌دهد تکیه‌گاه‌های لغزشی یک پاسخ لرزه‌ای بزرگ خواهند داشت. با توجه به مطالعات گذشته و نتایج متفاوت برای تأثیر مؤلفه قائم زلزله بر جداسازها در این مطالعه به بررسی رفتار دو جداساز اصطکاکی خالص و اصطکاکی - پاندولی در مناطق نزدیک گسل پرداخته شده است. به این منظور مدل عددی یک سیستم یک درجه آزاد (لغزشی) بر روی این تکیه‌گاه‌ها در محیط نرم‌افزار MATLAB ایجاد شد و پاسخ نیرو-جابجایی در محل تکیه‌گاه تحت شتاب‌نگاشت‌های موردنظر محاسبه گردید.

## پاسخ دینامیکی در سیستم‌های اصطکاکی

ساده‌ترین سیستم‌های لغزشی، سیستم اصطکاکی بدون هرگونه نیروی بازگرداننده می‌باشد. در این نوع جداسازی، روسازه اجازه می‌یابد تا در زمان رخداد زلزله‌های نسبتاً بزرگ بر روی جداساز بلغزد. سازه به محض فرا گذشت نیروی برشی از میزان نیروی اصطکاکی، شروع به لغزش می‌کند و به این ترتیب از ارسال نیروهای لرزه‌ای بزرگ به روسازه جلوگیری می‌شود. در این حالت شتاب موجود در طبقه‌ی جداسازی شده متناسب با ضریب اصطکاک در نظر گرفته شده برای جداسازها خواهد بود. نکته‌ی قابل توجه در این‌گونه سامانه‌های جداسازی، نبود نیروی بازگرداننده در آن است این امر ممکن است موجب شود تا سازه پس از اتمام زلزله به محل اولیه‌ی خود بازنگردد. با توجه به جابجایی ماندگار جداسازهای لغزشی در به‌کارگیری آن‌ها برای سازه‌های بااهمیت، دقت کافی لازم است. در شکل زیر و دیاگرام و نمودار نیرو-جابجایی این جداساز قرار داده شده است. (نشریه ۵۲۳)



شکل ۱: شکل، دیاگرام، نمودار نیرو-جابجایی جداساز لغزشی بدون نیروی بازگرداننده (Jangid, 2014)



شکل ۲: شکل، دیاگرام، نمودار نیرو-جابجایی جداساز پاندولی-اصطکاکی (Jangid, 2014)

## معادلات حرکت حاکم بر سیستم‌های جداساز

با توجه به اینکه مقادیر پاسخ‌ها با حل معادله حرکت برای سیستم‌های یک درجه محاسبه می‌شود در این مطالعه با مدل کردن دو جداساز اصطکاکی و پاندولی-اصطکاکی به صورت یک درجه آزاد و حل معادله حرکت آن‌ها با استفاده از MATLAB و SIMULINK تاریخچه زمانی نیرو-جابجایی سازه محاسبه می‌شود. با توجه به شکل‌های ۱ و ۲، معادله حرکت جرم  $m$  تحت شتاب  $\ddot{x}_g$  ناشی از زلزله به صورت رابطه ۱ بیان می‌گردد:

$$m \times \ddot{x}_{b(i)} + F_b = -m \times \ddot{x}_{g(i)} \quad (1)$$

در این رابطه  $x_b$  مقادیر جابجایی نسبی جرم و  $F_b$  نیروی موجود در جداساز می‌باشد که با توجه به نوع جداساز مقادیر متفاوتی که در ادامه ذکر می‌گردد، خواهد داشت:

**الف)  $F_b$  در جداساز اصطکاکی**

با توجه به نمودار نیرو - جابجایی در جداساز اصطکاکی (شکل ۱-ج)، این جداساز با ایجاد نیروی اصطکاک که وابسته به نیروی وزن می‌باشد در مقابل نیروی زلزله مقاومت می‌کند و مقدار آن به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$F_b = \sim \times N = \sim \times m \times g \quad (2)$$

با توجه به اینکه نیروی اعمالی به این جداساز ممکن است بیشتر یا کمتر از نیروی اصطکاک باشد دو حالت برای این جداساز رخ خواهد داد. در حالت اول اگر نیروی اعمالی به آن کمتر از میزان نیروی اصطکاک باشد جداساز در حالت سکون قرار گرفته و نیروی جداساز برابر نیروی اعمال شده به آن می‌باشد:

$$F_b = -m \times \ddot{x}_g \quad (3)$$

اما در صورتی که میزان نیروی اعمالی به جداساز بیشتر از نیروی اصطکاک باشد در آن لغزش اتفاق می‌افتد و این نیرو به صورت زیر محاسبه می‌شود

$$F_b = \sim \times m \times g \times \text{sign}(\dot{x}_{b(i)}) \quad (4)$$

از آنجایی که این جداساز فاقد نیروی بازگرداننده می‌باشد مقدار نیروی مقاوم آن در مقابل زلزله تنها شامل نیروی اصطکاک خواهد بود. به این ترتیب معادله حرکت این جداساز تحت شتاب افقی زلزله به صورت رابطه ۵ می‌باشد. اما زمانی که این جداساز تحت مؤلفه افقی و قائم زلزله قرار می‌گیرد شتاب قائم زلزله نیز در معادله حرکت وارد خواهد شد و معادله حرکت به صورت رابطه ۶ می‌باشد.

$$m \times \ddot{x}_{b(i)} + \mu \times m \times g \times \text{sign}(\dot{x}_{b(i)}) = -m \times \ddot{x}_{g(i)} \quad (5)$$

$$m \times \ddot{x}_{b(i)} + \left[ \mu \times m \times (g + \ddot{x}_{g(i)}) \right] \times \text{sign}(\dot{x}_{b(i)}) = -m \times (g + \ddot{x}_{g(i)}) \quad (6)$$

**الف)  $F_b$  در جداساز پاندولی - اصطکاکی**

در جداساز پاندولی - اصطکاکی با توجه به نمودار نیرو - جابجایی (شکل ۲-ج) و نیروی بازگرداننده که توسط نیروی ثقل در آن ایجاد می‌شود مقدار نیروی ایجاد شده در جداساز به صورت زیر می‌باشد:

$$F_b = F_s + \sim \times m \times g \times \text{sign}(\dot{x}_b) \quad (7)$$

در این رابطه  $F_s$  برابر با نیروی ناشی از سختی جداساز است که در اثر نیروی ثقل به وجود می‌آید و توسط رابطه زیر مقدار آن محاسبه شده است.

$$F_s = k_b \times X_b = \frac{N}{R} \times X_b \quad (8)$$

در این رابطه  $R$  برابر شعاع انحناى سطح لغزشی و  $N$  برابر نیروی وزن می‌باشد. همان طور که در شکل (شکل ۲-ج) مشاهده می‌گردد مقدار نیروی جداساز ابتدا در حالت سکون و پیش از آغاز حرکت به اندازه نیروی اصطکاک افزایش یافته و سپس با شیب  $k_b$  نسبت به جابجایی افزایش می‌یابد. در این جداساز نیز معادله حرکت تحت مؤلفه افقی زلزله در حالت بدون مؤلفه قائم و با مؤلفه قائم به ترتیب در روابط ۹ و ۱۰ به صورت زیر ارائه شده است:

$$m \ddot{x}_{b(i)} + \left[ \mu \times m \times (g + \ddot{x}_{g(i)}) \right] \times \text{sign}(\dot{x}_{b(i)}) + k_b \times x_b = -m \times \ddot{x}_{g(i)} \quad (9)$$

$$m \ddot{x}_{b(i)} + \left[ \mu \times m \times (g + \ddot{x}_{g(i)}) \right] \times \text{sign}(\dot{x}_{b(i)}) + k_b \times x_b = -m \times (g + \ddot{x}_{g(i)}) \quad (10)$$

مؤلفه قائم بر نیروی ناشی از وزن تأثیر می‌گذارد و باعث تغییر نیروی برشی جداسازها می‌شود. از سوی دیگر دستورالعمل‌های طراحی جداسازها از مؤلفه قائم در روند طراحی صرف نظر کرده‌اند که با توجه به معادلات ارائه شده این مؤلفه می‌تواند اهمیت بسیاری داشته باشد.

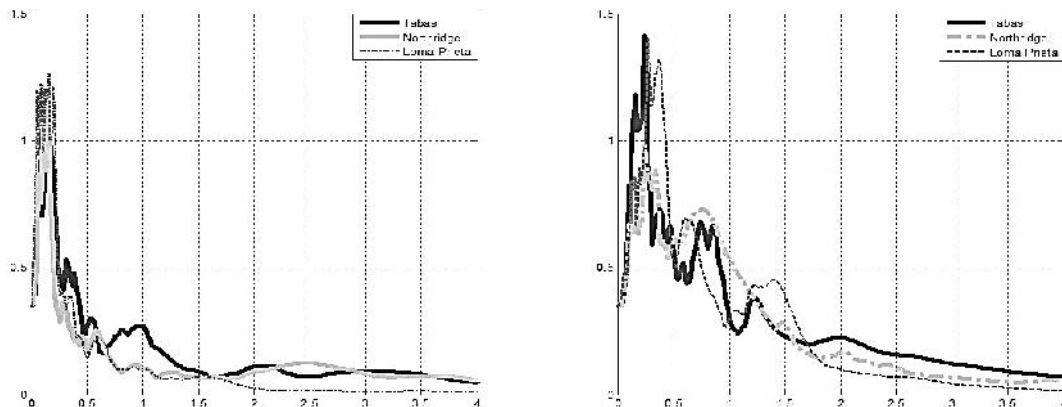
## مدل و زمین لرزه انتخابی

به منظور مطالعه عددی، سیستم یک درجه آزادی با جرمی برابر ۱۰۰۰ کیلوگرم بر روی جداساز لغزشی با ضریب اصطکاکی برابر ۰/۱ در نظر گرفته می‌شود. همچنین شعاع انحنای جداساز پاندولی برای نیل به زمان تناوب ۲ ثانیه طرح گردیده است. سازه‌های جداسازی شده همان‌طور که ذکر شد در محیط نرم‌افزار MATLAB و SIMULINK شبیه‌سازی شدند. معیار انتخاب رکورد برای این مطالعه، استفاده از رکوردهای نزدیک گسلی است که از نسبت حداکثر شتاب قائم به افقی (V/H) بالایی برخوردار هستند. به این منظور سه رکورد با نسبت V/H بالاتر از ۰/۶۶ و فاصله از گسل کمتر از ۲۵ کیلومتر انتخاب شده که شرح جزئیات آن‌ها در جدول (۱) آورده شده است.

جدول ۱: جزئیات زمین‌لرزه‌های انتخابی

نسبت V/H	مدت‌زمان (ثانیه)	بیشینه شتاب		فاصله از گسل (کیلومتر)	ایستگاه	رکورد انتخابی
		قائم	طولی			
۰/۸۲۳	۳۲/۸	۰/۶۸۸	۰/۸۳۶	۳	9101 Tabas	طیس
۱/۰۲۲	۳۹/۹۴	۰/۵۴۱	۰/۵۲۹	۱۴/۵	Capitola	لوماپریا
۱/۶۰۵	۳۹/۹۶	۰/۵۵۲	۰/۳۴۴	۹/۲	Arleta - Nordhoff Fire	نورتریج

در این مطالعه با همپایه کردن رکوردهای افقی زلزله‌های موردنظر به ۰/۳۵g سعی شد تا پاسخ این دو جداساز به زلزله‌های با شتاب حداکثر ۰/۳۵g مورد ارزیابی قرار گیرد. شتاب‌نگاشت‌های قائم نیز به منظور حفظ نسبت V/H، با نسبت مشابه مؤلفه‌های افقی مقیاس گردیدند. طیف‌های شتاب حاصل از هر یک از رکوردها برای میرایی ۵ درصد پس از مقیاس شدن در شکل (۳) نشان داده شده است.



ب) طیف‌های قائم سه زلزله‌ی طیس، نورتریج و لوماپریا

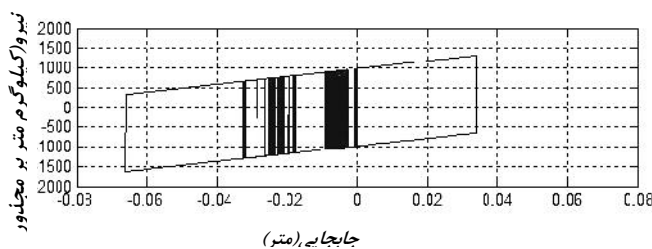
الف) طیف‌های افقی سه زلزله‌ی طیس، نورتریج و لوماپریا

شکل ۳: طیف‌های قائم و افقی سه زلزله‌ی طیس، نورتریج و لوماپریا

برای بررسی صحت عملکرد شبیه‌سازی عددی، شیب ثانویه در نمودار نیرو - جابجایی رسم شده باید به اندازه مقدار سختی عامل بازگرداننده در جداسازها باشد به این ترتیب در جداسازهای اصطکاکی که سختی جانبی صفر است شیب ثانویه نمودارها صفر و نمودار نیرو-جابجایی به صورت افقی خواهد بود اما در جداساز پاندولی-اصطکاکی نمودار با شیب K افزایش می‌یابد. با توجه به اینکه دوره تناوب جداساز برابر  $T=2$  sec در نظر گرفته شده مقدار سختی به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$k = m \cdot \ddot{S}^2 = 1000 \times \left(\frac{2 \cdot f}{2}\right)^2 = 9859.6$$

شیب نمودار نیرو - جابجایی یک نمونه از نتایج در شکل زیر نیز برابر با همین مقدار می‌باشد.



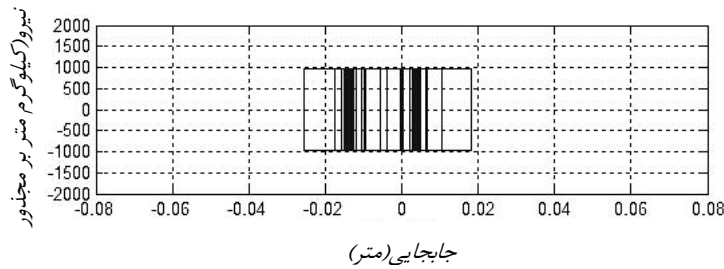
شکل ۴: نیرو - جابجایی برای جداساز پاندولی-اصطکاکی تحریک افقی زلزله



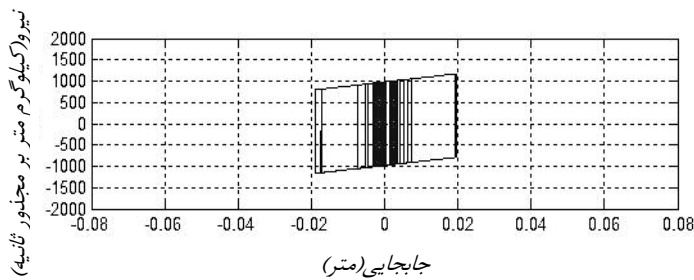
## نتایج

نتایج حاصل از تحلیل مدل‌ها تحت هر یک از سه زلزله طبس، لوماپریا و نورتریج برای دو جداساز اصطکاکی و اصطکاکی-پاندولی به صورت نمودارهای نیرو-جابجایی برای ۴ حالت مختلف بررسی شده است:

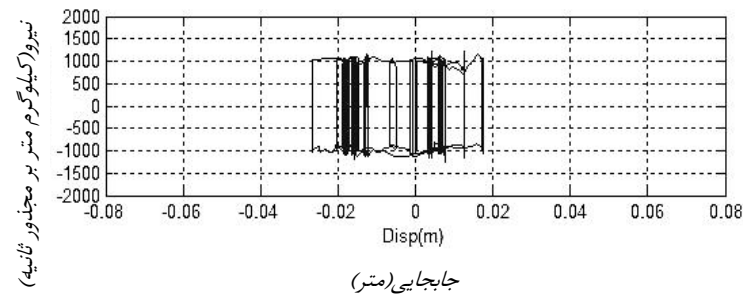
- ۱- جداساز اصطکاکی تحت مؤلفه افقی
  - ۲- جداساز اصطکاکی تحت مؤلفه افقی و قائم
  - ۳- جداساز پاندولی - اصطکاکی تحت مؤلفه افقی
  - ۴- جداساز پاندولی - اصطکاکی تحت مؤلفه افقی و قائم
- نتایج شامل ۱۲ نمودار نیرو-جابجایی می‌باشد که برای نمونه پاسخ‌ها به زلزله طبس در زیر نمایش داده شده است.



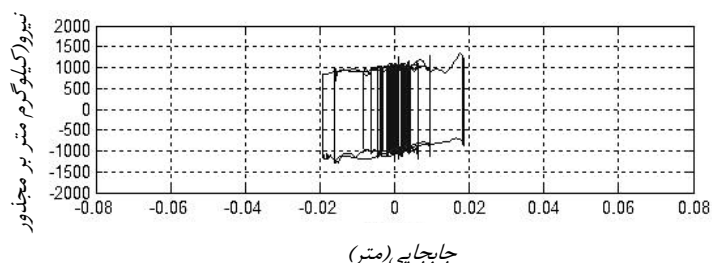
شکل ۵: نیرو-جابجایی جداساز اصطکاکی تک مؤلفه افقی



شکل ۶: نیرو-جابجایی جداساز اصطکاکی-لاستیکی تک مؤلفه افقی



شکل ۷: نیرو-جابجایی جداساز اصطکاکی تک مؤلفه افقی و مؤلفه قائم



شکل ۸: نیرو-جابجایی جداساز اصطکاکی-لاستیکی تک مؤلفه افقی و مؤلفه قائم



همان طور که نمودارها نشان می دهند مؤلفه قائم باعث دندان دار شدن نمودارها می شود.

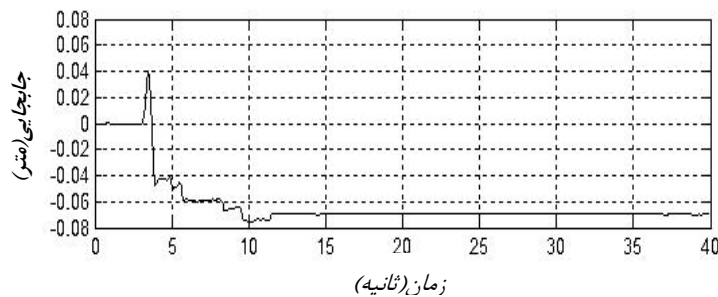
### اثر نوع جداساز بر مقادیر پاسخها در هر یک از زلزله‌ها

با توجه به نتایج حاصله برای زلزله‌های مختلف می توان دریافت که تحت مؤلفه قائم و افقی مقدار بیشترین جابجایی جداساز اصطکاکی در هر سه زلزله بیشتر از جداساز اصطکاکی - پاندولی است و مقدار بیشترین نیروی برشی در جداساز اصطکاکی کمتر از جداساز اصطکاکی - پاندولی است. در جدول زیر نیز درصد اختلاف پاسخهای جداساز اصطکاکی-پاندولی نسبت به جداساز اصطکاکی خالص محاسبه شده تا اثر نوع جداساز به صورت دقیق تر بر مقادیر پاسخها بررسی شود.

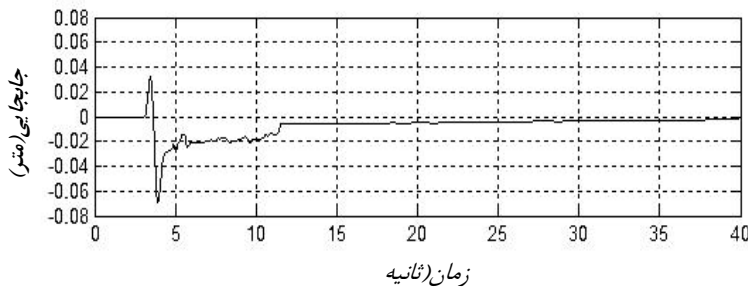
جدول ۲: درصد اختلاف پاسخهای دو جداساز نسبت به هم

زلزله	درصد اختلاف بیشترین جابجایی جداساز پاندولی-اصطکاکی نسبت به جداساز اصطکاکی خالص	درصد اختلاف بیشترین نیروی برشی جداساز پاندولی-اصطکاکی نسبت به جداساز اصطکاکی خالص
طیس	-27.43	6.11
لوماپریا	-39.23	11.56
نورتریج	-7.90	26.89

با توجه به درصد اختلاف محاسبه شده برای دو جداساز موردنظر مشاهده می شود که در هر سه زلزله ، حداکثر جابجایی در جداساز اصطکاکی-پاندولی نسبت به جداساز اصطکاکی کاهش یافته است و در زلزله لوماپریا این کاهش به میزان ۳۹ درصد نیز می رسد. اما مقادیر حداکثر نیروی برشی در هر سه زلزله در جداساز اصطکاکی-پاندولی نسبت به جداساز اصطکاکی خالص افزایش می یابد و این افزایش در بیشترین مقدار خود در زلزله نورتریج با ۲۷ درصد اتفاق می افتد. این افزایش در نیروی برشی با افزایش نسبت حداکثر شتاب قائم به افقی رابطه مستقیم دارد. در نتیجه با توجه به سه زلزله موردنظر می توان نتیجه گرفت که استفاده از جداساز اصطکاکی-پاندولی نسبت به جداساز اصطکاکی خالص می تواند مقادیر حداکثر جابجایی را کاهش و حداکثر نیروی برشی را افزایش دهد. با توجه به نمودارهای نیرو-جابجایی در جداساز اصطکاکی و اصطکاکی-پاندولی مشاهده می شود که جابجایی ماندگار در جداساز اصطکاکی-پاندولی کمتر از جداساز اصطکاکی می باشد و این تفاوت در زلزله نورتریج با مقایسه شکل های ۹ و ۱۰ کاملاً مشهود است. این موضوع به علت وجود نیروی بازگرداننده ناشی از نیروی ثقلی (روابط ۹ و ۱۰) در جداساز اصطکاکی-پاندولی می باشد که از مزیت های این جداساز بر جداساز اصطکاکی خالص می باشد.



شکل ۹: جابجایی - زمان جداساز اصطکاکی تک مؤلفه افقی و مؤلفه قائم



شکل ۱۰: جابجایی - زمان جداساز اصطکاکی - لاستیکی تک مؤلفه افقی و مؤلفه قائم

نمودارهای بالا تأثیر نیروی بازگرداننده را به صورت کامل نشان می دهد. این نیروی بازگرداننده باعث کاهش تغییر مکان های ماندگار در جداسازهای اصطکاکی-لاستیکی نسبت به جداسازهای اصطکاکی می باشد.



## بررسی اثر مؤلفه قائم

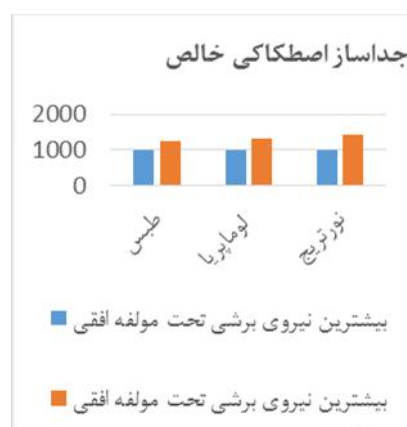
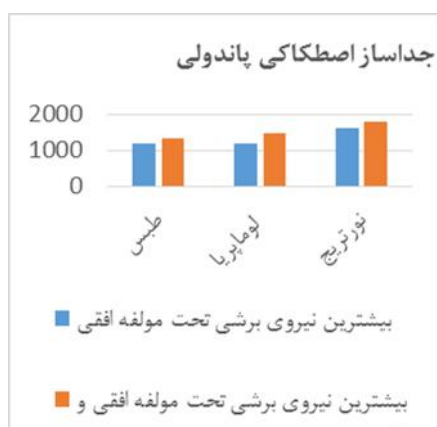
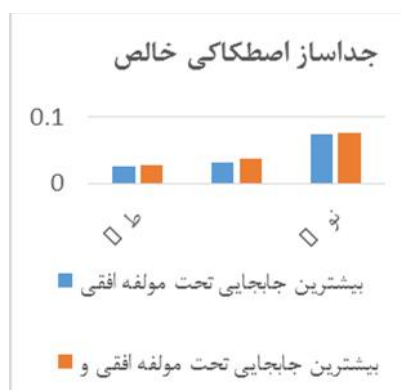
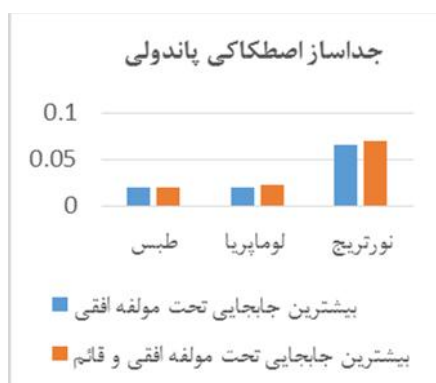
در جداول زیر مقادیر پاسخها برای هر یک از جداسازها یکبار بدون مؤلفه قائم و در حالت دوم با مؤلفه قائم محاسبه شده تا به بررسی اثر مؤلفه قائم پرداخته شود. در ادامه مقادیر پاسخ برای هر یک از جداسازها در نمودارهای میله نمایش داده شده است.

جدول ۳: بیشینه پاسخها تحت راستای افقی

تحت راستای افقی زلزلهها				
زلزله	جداساز اصطکاکی		جداساز اصطکاکی لاستیکی	
	بیشترین جابجایی	بیشترین نیروی برشی	بیشترین جابجایی	بیشترین نیروی برشی
طیس	0.025	981	0.0195	1173.6
لوماپریا	0.031	981	0.0192	1171
نورتریچ	0.073	981	0.0660	1632.5

جدول ۴: بیشینه پاسخها تحت راستای قائم و افقی

تحت راستای افقی و قائم زلزلهها				
زلزله	جداساز اصطکاکی		جداساز اصطکاکی لاستیکی	
	بیشترین جابجایی	بیشترین نیروی برشی	بیشترین جابجایی	بیشترین نیروی برشی
طیس	0.027	1263.50	0.0194	1340.7
لوماپریا	0.037	1332.50	0.0224	1486.6
نورتریچ	0.075	1417.8	0.0691	1799



شکل ۱۱: نمودارهای میله‌ای برای بیشینه پاسخها

## نتیجه‌گیری

با توجه به اهمیت عملکرد مناسب جداسازها در سازه‌های جداسازی شده به‌ویژه در مناطق نزدیک گسل به بررسی رفتار دو جداساز اصطکاکی و پاندولی - اصطکاکی تحت سه مؤلفه قائم و افقی زلزله‌های طیس، لوماپریا و نورتریچ در دو حالت با و بدون مؤلفه قائم در برنامه



MATLAB پرداخته شده است. همچنین رفتار این دو جداساز تحت مؤلفه قائم و افقی زلزله‌ها مورد مقایسه قرار گرفته است. از مقایسه و بررسی نمودارها نتایج زیر دریافت می‌شود:

- ۱- استفاده از جداساز اصطکاکی - پاندولی نسبت به جداساز اصطکاکی خالص می‌تواند مقادیر حداکثر جابجایی را کاهش و حداکثر نیروی برشی را افزایش دهد. بیشترین کاهش در حداکثر جابجایی در زلزله لوماپریا به میزان ۳۹ درصد و بیشترین افزایش در نیروی برشی در زلزله نورتریج با ۲۷ درصد اتفاق می‌افتد. همچنین افزایش در نیروی برشی با نسبت حداکثر شتاب قائم بر افقی سه زلزله‌ی موردنظر رابطه‌ی مستقیم دارد.
- ۲- از مزیت‌های جداساز اصطکاکی-پاندولی بر جداساز اصطکاکی خالص کاهش جابجایی ماندگاری است که در جداساز اصطکاکی-پاندولی به علت وجود نیروی بازگرداننده نسبت جداساز اصطکاکی ایجاد می‌شود. این تفاوت در پاسخ‌های زلزله‌ی نورتریج کاملاً مشهود است.
- ۳- با توجه به روابط موجود و نمودارهای نیرو-جابجایی حاصل از تحلیل تاریخچه زمانی مشاهده می‌شود که مؤلفه قائم زلزله باعث دنداندار شدن این نمودارها نسبت به حالتی که جداسازها تنها تحت مؤلفه افقی قرار گرفته‌اند می‌شود این موضوع باعث افزایش حداکثر نیروی برشی در هر دو جداساز می‌شود. بیشترین اثرگذاری مؤلفه قائم بر حداکثر نیروی برشی نیز در زلزله‌ی نورتریج و جداساز اصطکاکی است که این پاسخ را تا ۴۴ درصد افزایش می‌دهد. در نتیجه مؤلفه قائم بر حداکثر نیروی برشی تأثیر قابل ملاحظه‌ای دارد.

## مراجع

خشنودیان ف و معتمدی و فرامرزی (۱۳۸۹) اثر مؤلفه قائم زلزله بر رفتار ساختمان‌های فولادی دارای جداساز الاستومریک، نشریه مهندسی عمران و نقشه‌برداری، از صفحه ۴۶۹ تا ۴۷۴

معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رییس‌جمهور (۱۳۸۹)، راهنمای طراحی و اجرای سیستم‌های لرزه‌ای در ساختمان‌ها، نشریه ۵۲۳

Cho Hyo N and Seok W (2000) Comparison of seismic Retrofit Efficiencies of Base Isolation System for Existing Bridges. 81-86.

Iemura H, Taghikhany T, Takahashi Y and K. Jain S (2005) Effect of variation of normal force on seismic performance of resilient sliding isolation systems in highway bridges. earthquake engineering and structural dynamics.

Jangid, R S (2014) Introduction to Earthquake Engineering , National Programme on Technology Enhanced Learning(NPTEL), Chapter 8 Feb.

Jangid, R.S. (2005) Optimum friction pendulum system for near-fault motions, Engineering Structures, USA, Vol. 27, pp. 349-359.

Nakajima K, Iemura H, Takahashi Y And OGAW K (2000). Pseudo Dynamic Tests and Implementation of Sliding Bridge Isolators With Vertical Motion. , Proc. of 12th World Conference on Earthquake Engineering, Paper No. 1365, 2000.

Warn G and Whittaker A (2008) Vertical Earthquake Loads on Seismic Isolation Systems in Bridges. journal of structural engineering ASCE. 1696 – 1704.

