

## نوع مقاله: پژوهشی

## چکیده

در این پژوهش سیستم جداساز لرزه‌ای جدیدی با تکیه بر رفتار پاندولی معرفی و پیشنهاد شده است. این سیستم از میله‌هایی به شکل هندسی خرک تشکیل شده است که محل اعمال بار بر آنها در بخش زیرین خرک با بخش نشیمن غلطان در قسمت فوقانی خرک فاصله قابل توجهی دارد. این فاصله که در واقع طول پاندول می‌باشد باعث می‌گردد که پرورد طبیعی ساختمان جداسازی شده به راحتی قابل افزایش به مقادیری بیش از ۲ ثانیه بشود و در نتیجه شتاب ورودی به ساختمان به صورت قابل ملاحظه‌ای کاهش یابد. جهت بررسی عملکرد سیستم پیشنهادی در جداسازی لرزه‌ای سازه‌ها ابتدا معادلات حرکت جسم صلب جداسازی شده با استفاده از جداساز پیشنهادی بر حسب زاویه دوران پاندول استخراج شد. از آنجا که رفتار سیستم غیرخطی هندسی می‌باشد، با استفاده از معادله لاگرانژ و استخراج انرژی پتانسیل و جنبشی سیستم و همچنین تغییرات کار ناپایستار انجام شده معادله دیفرانسیل جسم صلب و سازه یک‌درجه آزاد جداسازی شده با سیستم جداساز پیشنهادی استخراج گردید. با استفاده از روش رانگ کوتا و کدنویسی در نرم‌افزار MATLAB پاسخ سیستم تحت رکوردهای مختلف در دو حالت جداسازی شده و جداسازی نشده استخراج و نتایج با یکدیگر مقایسه شد. سازه‌های مورد بررسی در این پژوهش سیستم جرم متمرکز روی جداساز و قاب یک طبقه رو جداساز بودند که تحت رکوردهای با فرکانس بالا، متوسط و پایین تحریک شدند. نتایج بررسی‌ها نشان داد که به کارگیری این سیستم جداساز در تمامی رکوردهای فرکانس بالا، متوسط و پایین به‌طور متوسط باعث ۷۰ درصد کاهش در مقادیر بیشینه شتاب مطلق، برش پایه و دررفت طبقات شده است و همچنین جابه‌جایی در تراز جداساز به‌طور متوسط ۴۰ سانتی‌متر بوده است و با افزایش طول پاندول از ۲ به ۲/۵ یا ۳ متر شتاب مطلق سیستم جداسازی شده بیشتر کاهش می‌یابد.

**واژگان کلیدی:** انرژی پتانسیل و جنبشی سازه، رکوردهای با فرکانس بالا، متوسط و پایین، دررفت، برش پایه، روش لاگرانژ، تحلیل‌های تاریخیچه زمانی غیرخطی.

## معرفی جداساز لرزه‌ای خرک - پاندولی و بررسی تحلیلی کارایی آن

## نادر قربانی

دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، واحد مهاباد، دانشگاه آزاد اسلامی، مهاباد، ایران

## محمود حسینی (نویسنده مسئول)

استاد، گروه مهندسی عمران، دانشگاه مدیترانه شرقی، فاماگوستا، قبرس شمالی، mahmood.hosseini@emu.edu.tr

## هادی عزیزیان

استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد مهاباد، دانشگاه آزاد اسلامی، مهاباد، ایران

## ۱- مقدمه

است که مورد توجه پژوهشگران مختلف قرار گرفته است. البته این نکته نیز حائز اهمیت است که تهیه سیستم جداساز لرزه‌ای مناسب در پروژه‌ها می‌تواند بار مالی قابل توجهی بر پروژه تحمیل کند، لذا هم‌زمان باید کارآمدی سیستم جداساز پیشنهادی در کنار اقتصادی بودن آن مورد توجه قرار گیرد. یکی از سیستم‌های جداسازی لرزه‌ای که در سال‌های اخیر بیشتر مورد توجه قرار

با استفاده از سیستم‌های جداساز لرزه‌ای، طراحی سازه به گونه‌ای صورت می‌پذیرد که تحریک زمین لرزه با شدت کمتری به سازه منتقل گردد. با کاهش بار لرزه‌ای سازه‌ها علاوه بر اینکه ایمنی سازه در مقابل زمین لرزه‌ها افزایش می‌یابد هم‌زمان هزینه‌های پروژه نیز به میزان قابل توجهی کاهش خواهد یافت. به همین دلیل است که استفاده از سیستم‌های جداساز لرزه‌ای سال‌ها

سیستم جداسازی لرزه‌ای پایه کابلی مبتنی بر عملکرد آونگی را که توسط Garza-Tamez پیشنهاد شده بود (و بنابراین، سیستم جداسازی پایه G-T یا به طور خلاصه GT-BIS نامیده می‌شود) بررسی کردند. آنها آزمایش‌های ارتعاش آزاد، شبیه‌سازی سینوسی و زلزله را روی یک مدل یک‌هشتم مقیاس از یک ساختمان نه طبقه روی یک شبیه‌ساز زلزله انجام دادند. لازم به ذکر است که بر اساس نتایج آن مطالعه، کارایی سیستم GT-BIS تا حد زیادی به عملکرد وجود میراگرها بستگی دارد، به طوری که بدون آنها، پاسخ‌های ساختمان جداسازی شده، از جمله جابه‌جایی پایه آن، می‌تواند چندین برابر بیشتر از حالت بدون استفاده از میراگرها باشد. بدیهی است که اگر جابه‌جایی پایه با استفاده از میراگرها محدود نشود، فضای آزاد نسبتاً بزرگی در اطراف هر ستون لازم خواهد بود که کاربرد این روش را نه تنها از نظر معماری، بلکه از نظر سازه‌ای نیز با توجه به اندازه مورد نیاز جداسازها و طراحی آنها دشوار می‌کند. علاوه بر این، باید توجه داشت که احتمال برکنش که تأثیر نامطلوبی بر عملکرد سیستم جداساز دارد، در آن مطالعه مورد بررسی قرار نگرفته است.

حسینی و همکاران به بررسی و پیشنهاد جداسازی غلتشی با مقطع استوانه بر روی سطح شیب دار و مقطع بیضی شکل در سطح صاف پرداختند که مشاهده گردید جداسازهای پیشنهادی به مقدار قابل توجهی شتاب سازه جداسازی شده کاهش می‌یابد (Tayaran, Hosseini, & Soroor, 2011, 2013).

فوتی (Foti, 2019) جداساز پیشنهادی ایشان از غلتک‌های فولادی قرار گرفته بین سطوح فولادی که با لایه‌های لاستیکی پوشانده شده‌اند تشکیل شده است. هدف از به کار بردن لایه‌های لاستیکی ایجاد سیستم میرایی و اتلاف انرژی در سیستم بوده است. سیستم پیشنهاد شده در فرکانس‌های کم به دلیل امکان بروز پدیده تشدید مناسب نمی‌باشد.

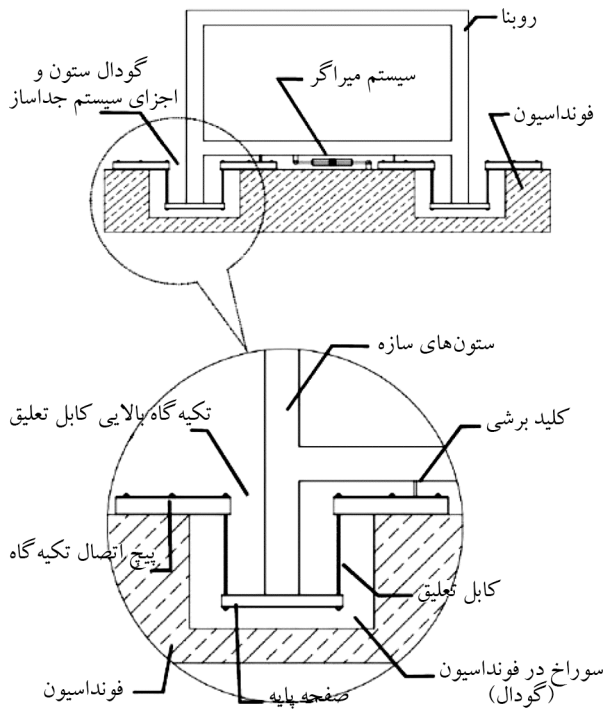
به‌عنوان یکی از آخرین مطالعات صورت گرفته در مورد جداسازی آونگی، لو و همکاران (Lu et al., 2019) یک سیستم جداسازی لرزه‌ای به نام جداسازی پاندولی معلق از پایه (BSPI)<sup>۲</sup>

گرفته، سیستم پاندولی است که در آن پایه ستون‌ها بر قطعاتی با حرکت پاندولی مستقر می‌گردند و با تنظیم طول پاندول پریود مجموعه ساختمان و جداساز به مقدار مطلوب رسانده می‌شود.

## ۲- پیشینه پژوهش

ایده جداسازی لرزه‌ای سازه‌ها جدید نیست و به اوایل دهه ۳۰ میلادی برمی‌گردد، زمانی که اوکا (Oka, 1932) یک دستگاه جداسازی پایه برای سازه‌ها را به ثبت رساند. این ایده در عرض چند دهه به طور گسترده توسعه یافت، به طوری که اولین بررسی در مورد تکنیک‌های جداسازی لرزه‌ای در اواخر دهه ۷۰ انجام شد کلی (Kelly, 1979, 1986) هیلاری و همکاران (Helary, & Grenon, 1987) جانگید و همکاران (Jangid, & Londhe, 1998). با این حال، استفاده از حرکت آونگی یا پاندولی به عنوان تکنیکی برای جداسازی لرزه‌ای پیشنهادی کمتر از چهار دهه دارد، یعنی بیش از ۵۰ سال کمتر از ایده اولیه جداسازی لرزه‌ای. این مفهوم به یک واقعیت عملی تبدیل شده و به عنوان جایگزینی مناسب برای ساخت و سازه‌های مقاوم در برابر زلزله مرسوم (با پایه ثابت) در حال شکل‌گیری است (Buckle & Mayes, 1990). طبق انتشارات موجود، به نظر می‌رسد که گینل (Ginell, 1988) اولین محقق‌هایی باشد که مفهوم حرکت آونگی را در یک سیستم جداسازی پایه مورد بحث قرار داده است. لازم به ذکر است که قبل از استفاده از سیستم آونگی در جداسازی از این نوع، یا هم‌زمان با آن، مفهوم حرکت پاندولی در برخی از انواع تکنیک‌های جداسازی لرزه‌ای مبتنی بر غلتش که در آنها سطوح شیب‌دار (Albin & Pillo, 1984) یا منحنی (Helary & Grenon, 1987) و همچنین در برخی از انواع سیستم پاندولی لغزشی یا اصطکاکی (FPS)<sup>۱</sup> (Zayas et al., 1989) استفاده شده است. با این حال، آنها در واقع تفاوت زیادی با آونگ واقعی دارند که در آن بدنه آونگ به دلیل جرم آویخته به آن در کشش است، در حالی که در سایر سیستم‌های ذکر شده، بدنه جداساز اساساً تحت فشار است.

به‌عنوان یکی از اولین مطالعات کامل در مورد جداسازی از نوع آونگی واقعی، فوج و همکاران (Foutch et al., 1993) یک



شکل (۱): سیستم جداساز پیشنهادی توسط شهابی و همکاران (Shahabi et al., 2019).

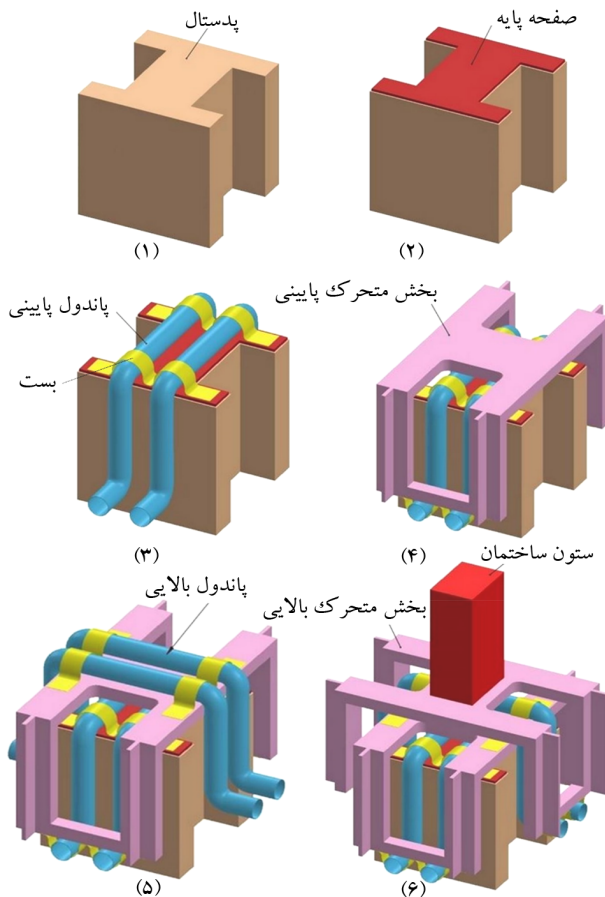
کاملاً مؤثر بوده و میزان شتاب انتقالی به سازه را به مقدار قابل توجهی کاهش می‌دهد. هرچه طول کابل بیشتر باشد، میزان شتاب انتقال یافته به سازه کمتر می‌شود، البته هم‌زمان با افزایش طول کابل، مقدار جابه‌جایی سازه نیز افزایش می‌یابد. آنها نشان دادند که افزایش میرایی سازه منجر به کاهش قابل توجه تغییر مکان نسبی می‌گردد که این مهم ضرورت استفاده از میراگرهای مناسب در این سیستم را نشان می‌دهد. مطالعات آنها همچنین نشان داده است که شتاب قائم بر عملکرد لرزه‌ای سیستم تأثیر ناچیزی دارد. آنها عملکرد سیستم پیشنهادی خود را در طیف گسترده‌ای از زمین‌لرزه‌ها بررسی و طول بهینه کابل را برای هر بازه‌ای از دوره تناوب غالب زمین‌لرزه‌ها استخراج نمودند.

عزیزی و همکاران (Azizi et al., 2024) در سال ۲۰۲۴ به بررسی جداساز لرزه‌ای جدیدی به نام ستون آونگ پرداختند. در این سیستم با تغییر اتصال فونداسیون سازه جداسازی شده، جداسازی را معرفی کردند که یک سیستم مستقل از جرم می‌باشد (شکل ۲). برای بررسی جداساز معرفی شده ابتدا معادله حرکت جسم جداسازی شده را ارائه نمودند. نتایج نشان می‌دهد

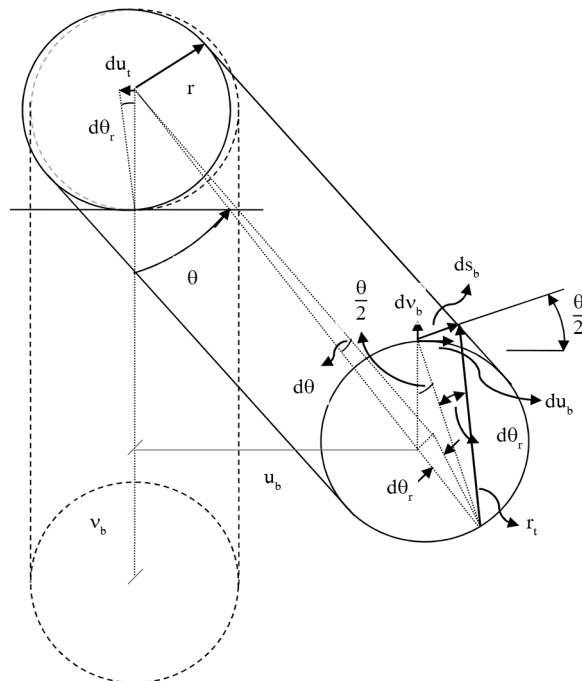
را پیشنهاد کرده‌اند تا از کاستی‌های سیستم FPS و نیز سیستم تعلیق بخش‌بندی شده سازه جلوگیری شود. شایان ذکر است که در آن مطالعه پاسخ جابه‌جایی سازه جداسازی شده بدون میراگر چندین برابر بیشتر از سیستم دارای میراگر است و بنابراین، در حالتی که از میراگر استفاده نمی‌شود، لزوم وجود فضاهای آزاد نسبتاً بزرگ در اطراف ستون‌ها و پیامدهای معماری و سازه‌ای آن در این مورد نیز وجود دارد. همچنین شهابی و همکاران در سال ۲۰۰۷ و ۲۰۲۰ سیستم جدید جداسازی لرزه‌ای به نام ستون‌های معلق<sup>۳</sup> را معرفی نمودند (Shahabi et al., 2020 و Shahabi, 2007). در روش پیشنهادی آنها ستون‌های ساختمان به جای اتصال مستقیم به فونداسیون، بر روی نشیمن‌های گهواره‌ای لولایی قرار می‌گیرند. در این سیستم هر یک از ستون‌ها به وسیله تعدادی کابل بر روی یک نشیمن آویزان شده از اطراف خود قرار می‌گیرند. هر کدام از این نشیمن‌ها در حفره‌هایی که در داخل فونداسیون‌ها تعبیه شده است قرار دارند. در داخل این حفره‌ها کابل‌های کششی آویزان شده است. به دلیل انعطاف‌پذیری کابل‌ها، نشیمن‌های معلق در هنگام زمین‌لرزه می‌توانند تغییر مکان دهند، در نتیجه شتاب کمتری از فونداسیون به سازه منتقل می‌گردد. در ادامه با کد نویسی در نرم‌افزار MATLAB سیستم پیشنهادی خود را تحلیل و پاسخ سیستم را تحت رکوردهای زمین‌لرزه استخراج نمودند (شکل ۱).

بررسی‌های آنها نشان داده است که در صورت استفاده از این سیستم در ساختمان‌ها، کاهش قابل توجهی در شتاب اعمال شده به سازه رخ خواهد داد. همچنین آنها از المان‌هایی تحت عنوان کلید برشی<sup>۴</sup> برای کنترل تغییر مکان سازه تحت بارهای ضعیف استفاده نمودند. تأثیر شتاب قائم نیز بر رفتار لرزه‌ای سیستم پیشنهادی آنها نیز بررسی شده است. یکی از پارامترهای اثرگذار در کنترل شتاب منتقل شده به سازه در این سیستم طول کابل است و با انتخاب طول کابل مناسب، میزان پاسخ شتاب سازه به مقدار قابل ملاحظه‌ای تغییر می‌کند. تعداد و قطر کابل‌ها نیز باید بر اساس وزن سازه محاسبه و ساخته شود. نتایج بررسی‌های آنها نشان داد که سیستم پیشنهادی برای کاهش اثر زلزله بر سازه‌ها

است، در صورتی که میله غلتان به اندازه  $\theta$  درجه دوران نماید تغییر مکان‌های دو سر میله مطابق شکل (۴) خواهد بود.



شکل (۳): توالی مراحل ساخت سیستم جداساز پاندولی غلتکی پیشنهادی.



شکل (۴): دوران در حرکت غلتان.



شکل (۲): سیستم جداساز بررسی شده توسط عزیزی و همکاران (Azizi et al., 2024).

پاسخ شتاب سیستم جداسازی شده تحت رکورد زلزله‌های مختلف به مقدار قابل توجهی کاهش یافته است که با مدل‌سازی با میرایی ۱۵ درصد در نرم‌افزار آباکوس پاسخ‌ها تطابق خوبی با مدل تئوری دارد و برابر معادله حرکت سیستم جداساز پاسخ جداساز به جرم سازه ارتباط ندارد و بررسی‌ها نشان داد برش پایه در سازه جداسازی شده ۵۰ درصد کاهش یافته است.

با توجه به پیشینه ارائه شده ملاحظه می‌گردد که سیستم‌های آونگی که تاکنون مورد مطالعه قرار گرفته‌اند همچنان دارای نقاط ضعفی از جمله رفتار نامطلوب در حالت برکش هستند. در این پژوهش سعی شده است که با ارائه یک سیستم آونگی جدید نقاط ضعف پیش‌گفته برطرف گردد.

### ۳- معرفی سیستم جداساز پاندولی - غلتکی

سیستم جداساز پیشنهاد شده در این پژوهش بر اساس حرکت پاندولی - غلتکی عمل می‌نماید، این سیستم از میله‌های غلتانی تشکیل شده است که محل اعمال بار آنها با نشیمن غلتان فاصله قابل توجهی دارد، این فاصله باعث می‌شود که حرکت غلتشی سیستم با حرکت پاندولی آمیخته شود (شکل ۳). در صورتی که فاصله محل اعمال بار با نشیمن میله‌های غلتان فاصله نداشته باشد، رفتار سیستم کاملاً غلتکی خواهد بود و با افزایش این فاصله عملکرد پاندولی سیستم افزایش می‌یابد.

#### ۳-۱- استخراج معادله حاکم بر سیستم

##### ۳-۱-۱- مقادیر جابه‌جایی، سرعت و شتاب جداساز

اساس عملکرد سیستم پیشنهادی بر پایه دوران میله‌های غلتان

همچنین می‌توان نشان داد:

$$ds = r_t, d\theta_r = 2r, \cos \frac{\theta}{2} d\theta_r = 2l, \cos \frac{\theta}{2} d\theta \quad (5)$$

$$du_b = ds \cos \frac{\theta}{2} = 2l, \cos^2 \frac{\theta}{2} d\theta = l(1 + \cos \theta) d\theta \quad (6)$$

$$dv_b = ds \sin \frac{\theta}{2} = 2l, \cos \frac{\theta}{2} \sin \frac{\theta}{2} d\theta = l \sin \theta d\theta \quad (7)$$

به عبارت دیگر خواهیم داشت:

$$u_t = \int_0^\theta l, d\theta = l, \theta \quad (8)$$

$$u_b = \int_0^\theta l(1 + \cos \theta) d\theta = l(\theta + \sin \theta) \quad (9)$$

$$v_b = \int_0^\theta l \sin \theta, d\theta = l(1 - \cos \theta) \quad (10)$$

از این رو تغییر مکان افقی و قائم کل ( $v_{tot}$  و  $u_{tot}$ ) از روابط

زیر به دست خواهند آمد:

$$u_{tot} = u_b - u_t = l, \sin \theta \quad (11)$$

$$v_{tot} = v_b = l(1 - \cos \theta) \quad (12)$$

با مشتق‌گیری از روابط تغییر مکان افقی و قائم می‌توان به روابط

سرعت و شتاب افقی و قائم ( $\dot{v}_{tot}$ ,  $\ddot{u}_{tot}$ ,  $\dot{v}_{tot}$ ,  $\dot{u}_{tot}$ ) دست یافت:

$$\dot{u}_{tot} = l, \dot{\theta}, \cos \theta \quad (13)$$

$$\dot{v}_{tot} = l, \dot{\theta}, \sin \theta \quad (14)$$

$$\ddot{u}_{tot} = l(\ddot{\theta} \cos \theta - \dot{\theta}^2, \sin \theta) \quad (15)$$

$$\ddot{v}_{tot} = l(\ddot{\theta} \sin \theta + \dot{\theta}^2, \cos \theta) \quad (16)$$

### ۳-۲-۱- معادله حرکت ارتعاش آزاد در حالت دو بعدی بدون

حضور نیروهای خارجی، نیروی فنر، میراگر و مقاومت غلتشی

برای به دست آوردن معادله حرکت ارتعاش آزاد در حالت

دو بعدی بدون حضور نیروهای خارجی، نیروی فنر، میراگر و

همچنین بدون در نظر گرفتن مقاومت غلتشی، مطابق با معادله

لاگرانژ خواهیم داشت:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{\theta}} \right) - \frac{\partial T}{\partial \theta} + \frac{\partial V}{\partial \theta} = Q \quad (17)$$

که در آن انرژی پتانسیل ( $T$ ) و انرژی جنبشی ( $V$ ) از رابطه

زیر به دست می‌آیند:

$$T = \frac{1}{2} m(\dot{u}_{tot}^2 + \dot{v}_{tot}^2) = \frac{1}{2} ml^2 \dot{\theta}^2 \quad (18)$$

در شکل (۴) تغییر مکان افقی و قائم محل اعمال بار جسم

جداسازی شده در میله غلتان به ترتیب با  $u_b$  و  $v_b$  نشان داده شده

است.  $du_t$  و  $d\theta_r$  نیز به ترتیب نشان‌دهنده میزان تغییر مکان و

دوران متناظر در آن قسمت از میله غلتان است که بر روی صفحه

نشیمن قرار گرفته است. شعاع  $r$  و طول دسته (فاصله محل

اعمال بار با محل نشیمن) میله غلتان است. با توجه به شکل‌های

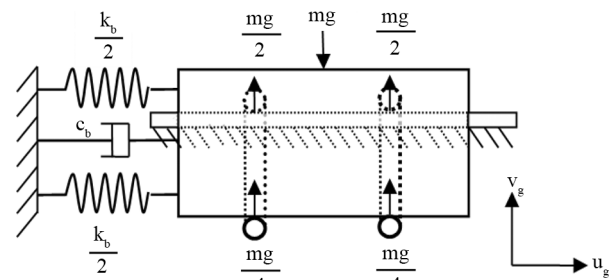
(۴) تا (۶) می‌توان روابط زیر را استخراج نمود:

$$du_t = r, d\theta_r \quad (1)$$

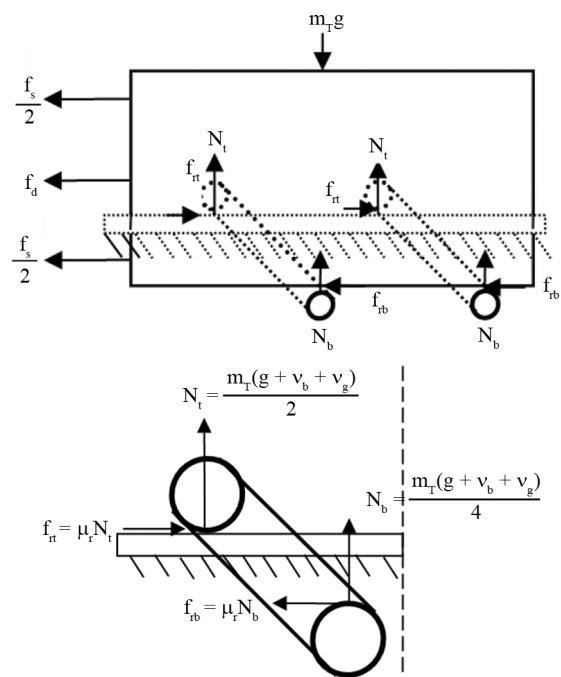
$$ld\theta = r, d\theta_r \quad (2)$$

$$du_t = l, d\theta \quad (3)$$

$$du_t = l, d\theta \quad (4)$$



شکل (۵): نیروهای وارد بر سیستم یک‌درجه‌آزاد جداسازی شده در حالت اولیه.



شکل (۶): نیروهای وارد بر سیستم یک‌درجه‌آزاد جداسازی شده پس از تغییر مکان پایه.

$$\frac{\partial V}{\partial \theta} \approx mgl\theta \quad (37)$$

$$Q = 0 \quad (38)$$

$$ml^2\ddot{\theta} - 0 + mgl\theta = 0 \quad (39)$$

$$\ddot{\theta} + \frac{g}{l}\theta = 0 \quad (40)$$

$$\omega_N = \sqrt{\frac{g}{l}} \quad T_N = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}} \quad (41)$$

۳-۴-۱- معادله حرکت در حالت دو بعدی با حضور نیروهای خارجی، نیروی فنر، میراگر و همچنین با در نظر گرفتن مقاومت غلتشی

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{\theta}} \right) - \frac{\partial T}{\partial \theta} + \frac{\partial V}{\partial \theta} = Q \quad (42)$$

$$T = \frac{1}{2} m_b (\dot{u}_{tot}^2 + \dot{v}_{tot}^2) = \frac{1}{2} m_b l^2 \dot{\theta}^2 \quad (43)$$

$$V = \frac{1}{2} m_b gl(1 - \cos \theta) + \frac{1}{2} k_b l^2 \sin^2 \theta \quad (44)$$

$$\left( \frac{\partial T}{\partial \dot{\theta}} \right) = m_b l^2 \dot{\theta} \quad (45)$$

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{\theta}} \right) = m_b l^2 \ddot{\theta} \quad (46)$$

$$\frac{\partial T}{\partial \theta} = 0 \quad (47)$$

$$\frac{\partial V}{\partial \theta} = m_b gl \sin \theta + k_b l^2 \sin \theta \cos \theta \quad (48)$$

$$\delta W_{nc} = [-m_b \ddot{u}_g - c_b l (\dot{\theta} \cos \theta)] \times l \cos \theta \delta \theta - \text{sign}(\dot{\theta}) F_r l \delta \theta - m_b \dot{v}_g l \sin \theta \delta \theta \quad (49)$$

$$f_r = 2\mu_t N_t + 4\mu_b N_b \rightarrow N_b \approx N_t = m_b (g + \ddot{v}_g + \dot{v}_b) \quad (50)$$

$$m_b l^2 \ddot{\theta} + m_b gl \sin \theta + k_b l^2 \sin \theta \cos \theta = [-m_b \ddot{u}_g - c_b l (\dot{\theta} \cos \theta)] \quad (51)$$

$$l \cos \theta - \text{sign}(\dot{\theta}) 6F_r l - m_b \dot{v}_g l \sin \theta$$

$$\ddot{\theta} + \frac{g}{l} \sin \theta + \frac{k_b}{m_b} \sin \theta \cos \theta = [-\ddot{u}_g - \frac{c_b}{m_b} l (\dot{\theta} \cos \theta)] \frac{1}{l} \cos \theta - \text{sign}(\dot{\theta}) \frac{6F_r}{m_b l} - \frac{\dot{v}_g}{l} \sin \theta \quad (52)$$

$$\ddot{\theta} + \dot{\theta} \frac{c_b}{m_b} \cos^2 \theta + \text{sign}(\dot{\theta}) \frac{6F_r}{m_b l} +$$

$$\left[ \frac{k_b}{m_b} \cos \theta + \left( \frac{g + \dot{v}_g}{l} \right) \right] \sin \theta = [-\ddot{u}_g] \frac{1}{l} \cos \theta \quad (53)$$

۳-۲- ظرفیت باربری سیستم با استفاده از تحلیل به روش اجزای محدود

جهت تخمین اولیه از ظرفیت باربری سیستم پیشنهادی،

$$V = mgl(1 - \cos \theta) \quad (19)$$

با توجه به انرژی پتانسیل و جنبشی سیستم می توان نشان داد:

$$\left( \frac{\partial T}{\partial \dot{\theta}} \right) = ml^2 \dot{\theta} \quad (20)$$

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{\theta}} \right) = ml^2 \ddot{\theta} \quad (21)$$

$$\frac{\partial T}{\partial \theta} = 0 \quad (22)$$

$$\frac{\partial V}{\partial \theta} = mgl \sin \theta \quad (23)$$

کار ناپایدار سیستم (Q) نیز در این حالت صفر است.

$$Q = 0 \quad (24)$$

از این رو معادله حرکت ارتعاش آزاد در حالت دو بعدی

بدون حضور نیروهای خارجی، نیروی فنر، میراگر و همچنین

بدون در نظر گرفتن مقاومت غلتشی این چنین خواهد بود:

$$ml^2\ddot{\theta} - 0 + mgl \sin \theta = 0 \quad (25)$$

$$\ddot{\theta} + \frac{g}{l} \sin \theta = 0 \quad (26)$$

۳-۱-۳- معادله حرکت ارتعاش آزاد در حالت ۲ بعدی بدون

حضور نیروهای خارجی، نیروی فنر، میراگر و مقاومت غلتشی با

زوایای کوچک

$$\sin \theta \approx \theta \quad (27)$$

$$\cos \theta \approx 1 - \frac{\theta^2}{2} \quad (28)$$

$$u_{tot} = u_b - u_t = l \sin \theta = l\theta \quad (29)$$

$$v_{tot} = v_b = l(1 - \cos \theta) = l \frac{\theta^2}{2} \quad (30)$$

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{\theta}} \right) - \frac{\partial T}{\partial \theta} + \frac{\partial V}{\partial \theta} = Q \quad (31)$$

$$T \approx \frac{1}{2} m (\dot{u}_{tot}^2) \approx \frac{1}{2} ml^2 \dot{\theta}^2 \quad (32)$$

$$V \approx mgl \frac{\theta^2}{2} \quad (33)$$

$$\left( \frac{\partial T}{\partial \dot{\theta}} \right) \approx ml^2 \dot{\theta} \quad (34)$$

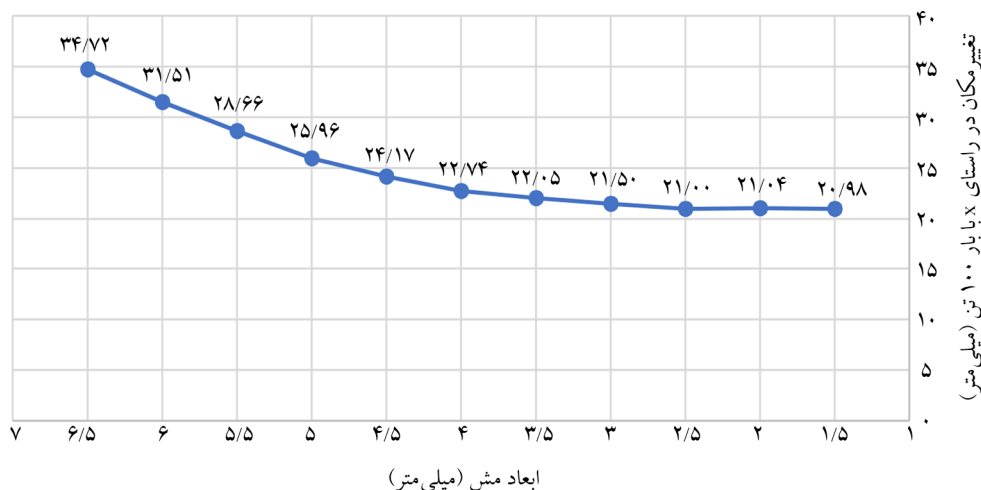
$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{\theta}} \right) \approx ml^2 \ddot{\theta} \quad (35)$$

$$\frac{\partial T}{\partial \theta} \approx 0 \quad (36)$$

شکل اعمال شد. بارگذاری و تحلیل سیستم به صورت GeneralStatic با در نظر گرفتن جابه‌جایی‌های بزرگ بود که نمودار بار قائم-تغییر مکان به‌عنوان رفتار سیستم ترسیم شده است. بدین منظور ابتدا جهت دسترسی به ابعاد بهینه مش‌بندی‌ها، ۱۱ نمونه با مش‌بندی‌های مختلف بررسی شده است. هر کدام از نمونه‌های M-01 الی M-11 تحت بار قائم ۱۰۰ تن تحلیل و نمودار ابعاد مش - تغییر مکان افقی آنها استخراج شده که تغییر مکان افقی هر کدام از نمونه‌های مدل‌سازی به‌منظور کنترل دقت مش‌بندی مطابق شکل (۷) به دست آمد.

همان‌گونه که در شکل (۷) مشاهده می‌شود، تغییر مکان افقی به‌دست‌آمده در نمونه M-02 تحت بار قائم ۱۰۰ تن حدود ۲۱ میلی‌متر به دست آمده است و با بزرگ‌تر شدن ابعاد مش‌ها در نمونه‌های M-02 الی M-11 تغییر مکان‌های به‌دست‌آمده تغییرات قابل ملاحظه‌ای داشته‌اند، اما در نمونه‌های M-02 الی M-01 تقریباً تغییر مکان به‌دست‌آمده تحت بار قائم ۱۰۰ تن یکسان بوده و کوچک‌تر کردن ابعاد مش‌بندی تغییر قابل ملاحظه‌ای در پاسخ‌های به‌دست‌آمده نداشته است. از آنجا که با کوچک‌تر شدن ابعاد مش‌بندی‌ها تعداد المان‌ها افزایش و هم‌زمان مدت‌زمان تحلیل‌ها به میزان قابل توجهی بیشتر می‌شود. از مش‌بندی به ابعاد نمونه M-02 که پاسخ تقریباً یکسانی با نمونه M-01 داشته، به‌عنوان مش بهینه استفاده شده است. ابعاد نهایی نمونه که منجر به نتایج مطلوب شد عبارت بودند از:

جداساز معرفی شده با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS شبیه‌سازی شده روند مدل‌سازی در نرم‌افزار آباکوس بدین ترتیب است: ابتدا در مدل part نرم‌افزار آباکوس سه قطعه شامل صفحه نشیمن، المان U شکل وارونه و المان خردک شکل تعریف شدند. در این مدل قطعه u شکل وارونه جایگزین نیمی از یکی از دو قطعه متحرک متکی بر پاندول‌ها در شکل (۳) است. در مدول Interaction به معرفی اندرکنش افقی سطوح خارجی این قطعات با یکدیگر، با استفاده از معادله اصطکاکی Penalty با ضریب اصطکاکی ۰/۳ و همچنین اندرکنش قائم بین سطوح پرداخته شد، به‌نحوی که سطح صفحه پایینی به‌عنوان Master و سطح المان خردک شکل به‌عنوان Slave انتخاب شدند. رفتار ماده متشکله جداساز به‌صورت کاملاً کشسان و خطی با تنش تسلیم ۳۷۰ مگاپاسکال و با مدول الاستیسیته ۲۰۰ گیگاپاسکال و ضریب پواسون ۰/۳ در نظر گرفته شد و بررسی وارد شدن به حوزه خمیری بر اساس مقایسه مقادیر تنش‌های Von Mises با مقادیر حدی صورت گرفت. قطعات متشکله جداساز به‌صورت بلوک‌های Solid با المان C3D8R که این المان هشت‌گره‌ای مکعبی یا آجری شکل، سه‌بعدی، دارای فرمول‌بندی کاهش یافته، قابلیت کنترل پدیده ساعت شنی یا Hourglass، از پرکاربردترین المان‌های مورد استفاده در آباکوس بوده که دارای ابعاد مش‌بندی بهینه است. جهت بارگذاری سیستم کنشی از جنس جابه‌جایی (تغییر مکان) به صفحه قائم انتهایی المان خردک



شکل (۷): تغییر مکان قائم تحت بار قائم ۱۰۰ تنی در نمونه‌های M-01 الی M-11.

حرکت پاندولی- غلتکی معرفی گردید. از آنجا که هدف از معرفی جداساز مذکور، جداسازی سازه‌ها در برابر تحریک زمین لرزه است، ظرفیت باربری آن نیز استخراج و سپس معادلات حاکم بر سیستم در حالات مختلف به دست آورده شده است. پس از صحت‌سنجی روابط به دست آمده ذکر شده در بالا به بررسی عملکرد سیستم جداساز پیشنهادی تحت تحریک‌های مختلف پرداخته شده است. برای این منظور با کدنویسی در نرم‌افزار MATLAB معادلات استخراج شده به روش عددی رانگ کوتا حل و نتایج به دست آمده بررسی شد.

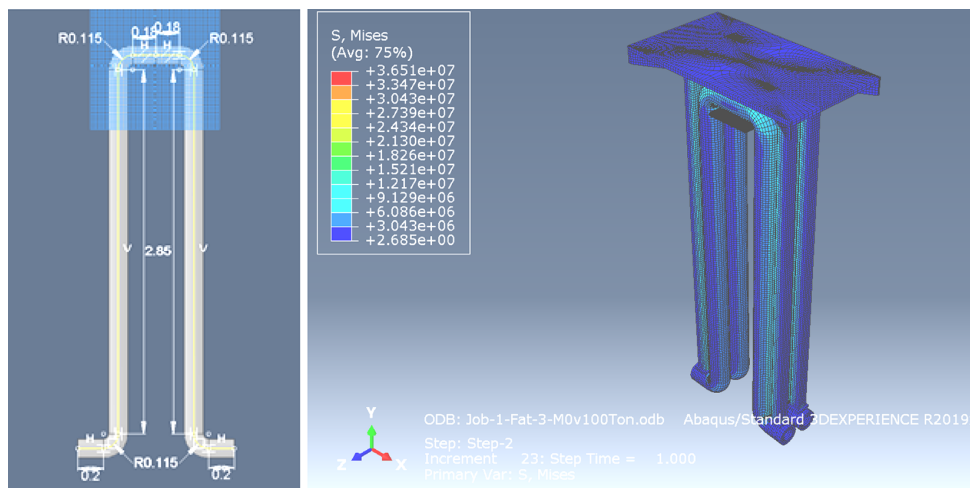
#### ۴-۱- خصوصیات زلزله‌های در نظر گرفته شده جهت تحلیل لرزه‌ای

بدین منظور سه دسته رکورد زمین لرزه انتخاب شده است که عبارتند از زلزله‌های دارای محتوای فرکانسی بالا، متوسط و پایین که مشخصات هر کدام از آنها در جدول‌های (۱) الی (۳) آورده شده است.

- ستونک‌های نشسته بر روی خرک: مقطع جعبه‌ای مربعی شکل به ابعاد ۱۰ سانتی‌متر و به ضخامت ۲ سانتی‌متر؛  
 - ورق زیرین مربعی شکل به ابعاد ۱۴ و ضخامت ۲ سانتی‌متر  
 - ورق بالایی به ابعاد ۱/۷ متر در ۰/۹۰ متر و به ضخامت ۳ سانتی‌متر به همراه سخت‌کننده‌هایی به ضخامت ۳ سانتی‌متر و ارتفاع ۵ سانتی‌متر؛  
 - خرک با مقطع لوله‌ای به شعاع داخلی ۶ سانتی‌متر و شعاع خارجی ۱۰ سانتی‌متر و طول قائم ۳ متر.  
 توزیع تنش Von Mises برای نمونه نهایی به همراه جزئیات هندسی آن در شکل (۸) نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل (۸) مشاهده شد، تحت بارگذاری ۱۰۰ تن حداکثر تنش Von Mises کمتر از تنش تسلیم فولاد به کاررفته در جداساز (370 Mpa) می‌باشد، به طوری که هیچ کدام از المان‌ها به حد تسلیم نرسیده‌اند.

#### ۴- بحث و بررسی

همان‌طور که توضیح داده شد، جداساز پیشنهادی بر اساس



شکل (۸): توزیع تنش Von Mises برای خرک نمونه MB-2.

جدول (۱): مشخصات زلزله‌های با فرکانس بالا.

شماره رکورد	نام زلزله	نام ایستگاه	PGA (g)	PGV (cm/s)	PGD (cm)	Effective Duration (s)	پریود غالب PGD	پریود غالب PGV	پریود غالب PGA
۸۰۲	Loma Prieta	Capitola	۰/۵۲	۳۵/۰۱	۹/۱۲	۱۱/۹۱	۱/۴۵	۱/۴۹	۰/۲۸
۱۰۰۴	Northridg-01	Lasepulveda va Hospital	۰/۳	۲۳/۱۲	۱۰/۵۶	۱۳/۴۶	۳/۱	۰/۶۵	۰/۲۴
۱۶۰۲	Duzce, Turkey	Bolu	۰/۷۳	۵۵/۹۳	۲۵/۵۸	۸/۵۵	۳/۶۷	۰/۵۷	۰/۳۲

جدول (۲): مشخصات زلزله‌های با فرکانس متوسط.

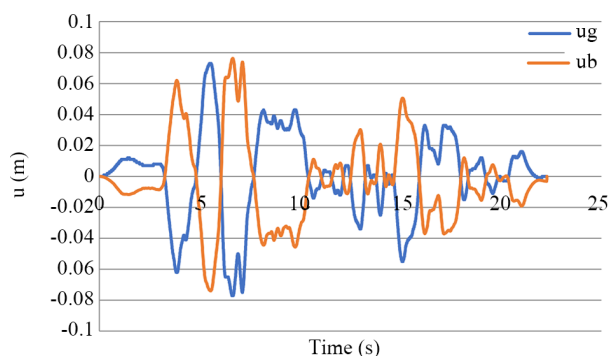
شماره رکورد	نام زلزله	نام ایستگاه	PGA (g)	PGV (cm/s)	PGD (cm)	Effective Duration (s)	پریود غالب PGD	پریود غالب PGV	پریود غالب PGA
۱۶۵	Imperial Valley	Chihushus	۰/۲۶	۲۴/۸	۹/۲۹	۲۰/۵۷	۴	۰/۶۷	۰/۲۵
۷۲۱	Superstition Hills-02	El Centro Imp.Co.Cent	۰/۴۷	۴۱/۱۶	۷/۷۳	۱۳/۶۹	۲/۸	۴۶	۰/۴۶
۱۰۸۶	Northridge-01	Sylmar-Olive View Med ff	۰/۸۴	۱۲۹/۳۷	۳۲/۱۴	۵/۳۲	۲/۸۹	۱/۶۲	۰/۳۵

جدول (۳): مشخصات زلزله‌های با فرکانس پایین.

شماره رکورد	نام زلزله	نام ایستگاه	PGA (g)	PGV (cm/s)	PGD (cm)	Effective Duration (s)	پریود غالب PGD	پریود غالب PGV	پریود غالب PGA
۱۸۱	Imperial Valley-06	El Centro Array	۰/۴۴	۶۷/۰۱	۲۷/۸۹	۱۱/۴۶	۳/۶۵	۲/۴	۰/۰۶
۷۲۳	Superstition Hills-02	Parachute	۰/۴۳	۱۳۴/۲۸	۴۶/۱۷	۱۰/۵۷	۲/۵	۱/۸۴	۰/۶۴
۷۵۳	Loma Prieta	Corralitos	۰/۴۸	۴۷/۵۷	۱۲/۷۷	۷/۸۸	۳/۶۹	۰/۷۹	۰/۵۷

#### ۲-۴- صحت‌سنجی کد نویسی

پیش از بررسی عملکرد سیستم جداساز پیشنهادی تحت تحریک‌های مختلف زمین لرزه، ابتدا به صحت‌سنجی کد تحلیل روابط استخراج شده پرداخته شد. بدین منظور طول پاندول (بخش قائم میله غلتان جداساز) در معادلات استخراج شده برابر با ۳۰۰۰ متر در نظر گرفته شد. در این حالت انتظار می‌رود که سیستم بتواند به‌طور کامل برعکس حرکت زمین ارتعاش نماید، به‌عنوان نمونه پاسخ سیستم در این حالت مطابق با شکل (۹) به دست آمده است که نشان می‌دهد الگوریتم کد نویسی صحیح است.



شکل (۹): پاسخ سیستم یک‌درجه‌آزاد تحت تحریک ۷۲۱ با طول پاندول ۳۰۰۰ متر.

در شکل (۹) مشاهده می‌شود که با در نظر گرفتن پاندولی به طول ۳۰۰۰ متر همان‌طور که انتظار می‌رفت پاسخ تغییر مکان سیستم در این حالت کاملاً نسبت به تغییر مکان زمین لرزه قرینه عددی می‌باشد، به گونه‌ای که تغییر مکان جسم صلب جداسازی

شده تقریباً برابر با صفر (حاصل جمع تغییر مکان زمین لرزه و تغییر مکان نسبی جسم صلب جداسازی شده) است. از این رو می‌توان نتیجه گرفت که پاسخ‌های به دست آمده از حل عددی معادلات استخراج شده در بخش قبل کاملاً صحیح کد نویسی شده است.

#### ۳-۴- صحت‌سنجی معادلات

پس از بررسی حل عددی معادلات استخراج شده در بخش قبل به صحت‌سنجی روابط استخراج شده پرداخته شد. بدین منظور تحریک ورودی به صورت تابع سینوسی با فرکانس مشخص به سیستم اعمال شده است. مشخصات دینامیکی سیستم به همراه شتاب خارجی اعمالی و پاسخ جداساز لرزه‌ای طبق جدول (۴) به شرح زیر است.

جدول (۴): مشخصات دینامیکی سیستم جداساز.

$m = 1000\text{kg}$	$k = 0$	$c = 0$	$L = 3(\text{m})$	$f_r = 0$
---------------------	---------	---------	-------------------	-----------

فرکانس انتخابی برای تحریک سینوسی ۱/۸ رادیان بر ثانیه بوده که برابر فرکانس اصلی سیستم پاندولی جهت ایجاد حالت تشدید است. با توجه به نمودارهای شکل‌های (۱۰) تا (۱۲) ملاحظه گردید که در طی اعمال تحریک سینوسی، پاسخ به صورت ارتعاش اجباری و با افزایش دامنه به دلیل تشدید بوده و پس از قطع تحریک پاسخ به صورت ارتعاش آزاد است که دامنه پاسخ ارتعاش آزاد در حالت بدون مقاومت غلتشی ( $f_r = 0$ ) و

#### ۴-۴- بررسی عملکرد سیستم در حالت یک جرم متمرکز روی جداساز

پس از اطمینان از صحت معادلات استخراج شده و دقت مناسب حل عددی معادلات در نرم افزار متلب در این بخش به بررسی عملکرد سیستم جداساز پیشنهادی در حالت جداسازی جسم صلب (حالت یک درجه آزادی) پرداخته شد. بدین منظور سه دسته رکورد زمین لرزه که مشخصات هر کدام از آنها در جدول های (۱) الی (۳) آورده شده است، مطابق با مشخصات زیر اعمال و پاسخ سیستم استخراج شده است.

$$n = 1 \quad (54)$$

$$g = 9.81 \quad (55)$$

$$f_r = 0.001 \quad N c_b = 0 \quad m_b = 10000 \quad k_b = 0 \quad (56)$$

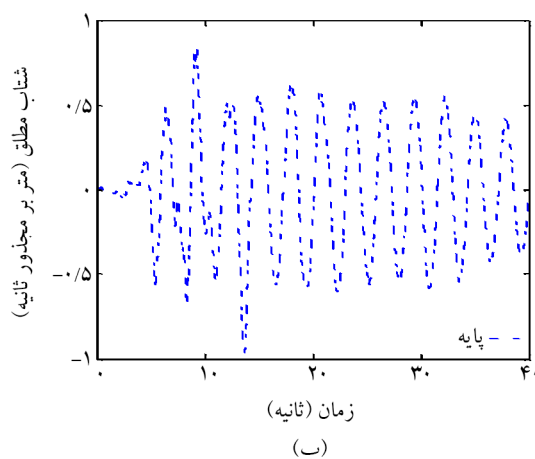
معادلات حرکت برای سیستم تک درجه آزادی دو بعدی دارای جداساز لرزه ای:

$$\ddot{\theta} + \dot{\theta} \frac{c_b}{m_b} \cos^2 \theta + \text{sign}(\dot{\theta}) \frac{6F_r}{m_b l} + \quad (57)$$

$$\left[ \frac{k_b}{m_b} \cos \theta + \left( \frac{g + \ddot{v}_g}{1} \right) \right] \sin \theta = [-\ddot{u}_g] \frac{1}{l} \cos \theta$$

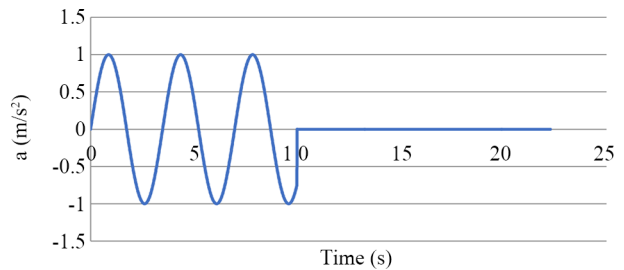
به عنوان نمونه نمودار پاسخ های تک جرم روی جداساز تحت رکورد ۸۰۲ مطابق شکل های (۱۳) تا (۱۵) آورده شده است.

خلاصه پاسخ های بیشینه در جدول های (۵) الی (۷) و شکل های (۱۶) تا (۱۸) نشان داده شده است.

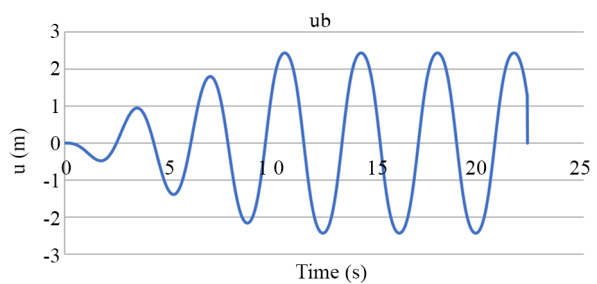


شکل (۱۳): نمودار پاسخ جرم روی جداساز تحت رکورد ۸۰۲ با طول  $L=2$ .

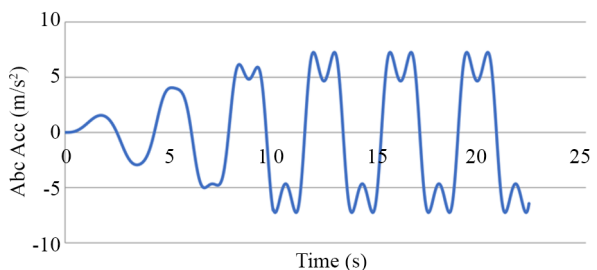
بدون میرایی با دامنه ثابت ادامه می یابد که با روابط دینامیک سازه ها هم خوانی خوبی دارد.



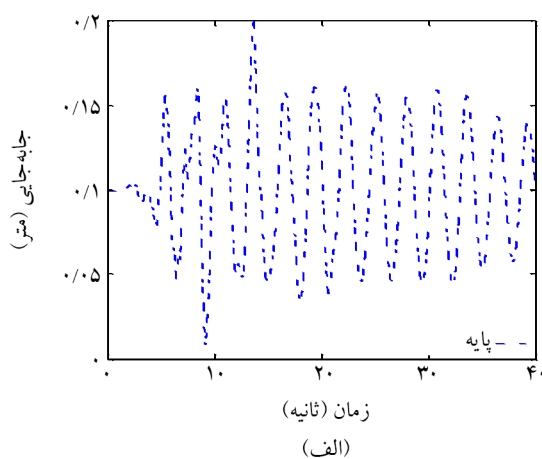
شکل (۱۰): نمودار تابع شتاب خارجی اعمالی به سیستم به صورت  $\sin(1.8t)$ .

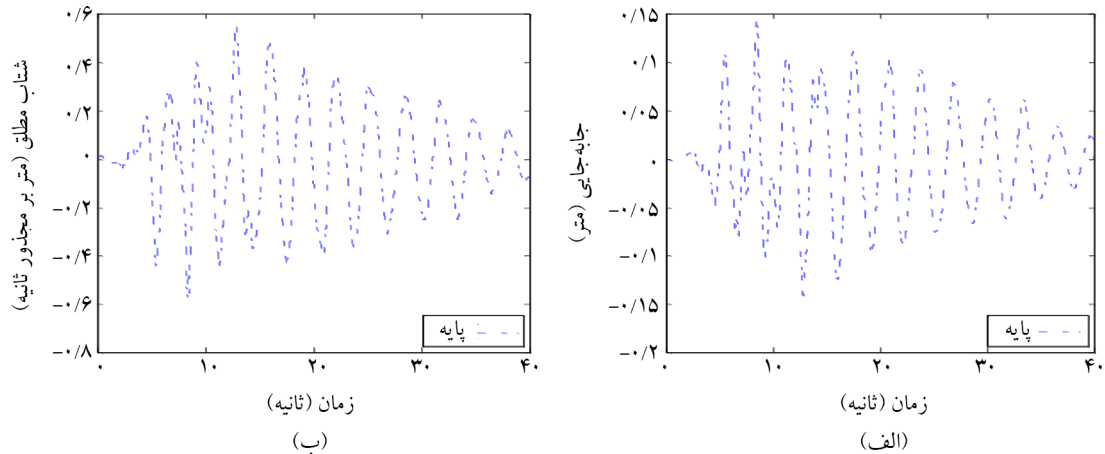


شکل (۱۱): نمودار پاسخ جابه جایی جداساز لرزه ای تحت شتاب  $\sin(1.8t)$  و مشخصات دینامیکی جدول (۴).

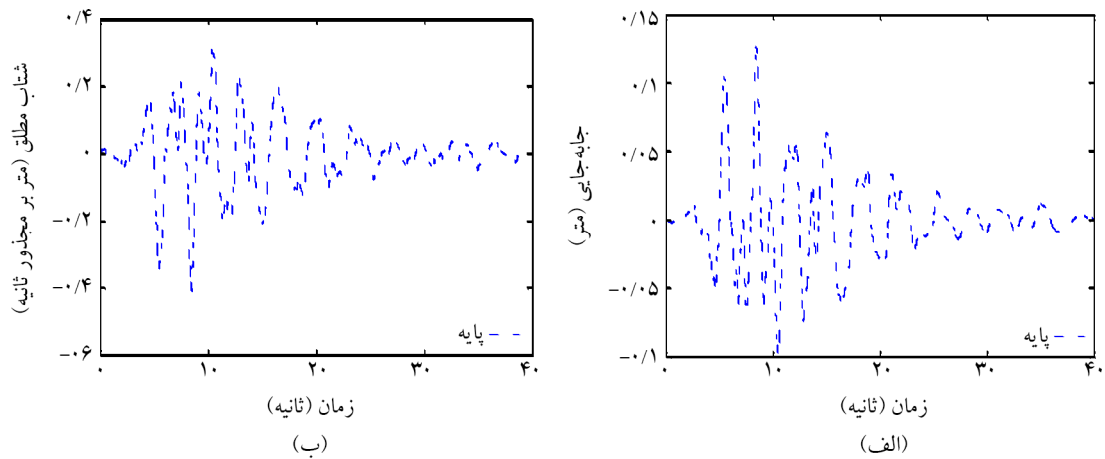


شکل (۱۲): نمودار پاسخ شتاب مطلق جداساز لرزه ای تحت شتاب  $\sin(1.8t)$  و مشخصات دینامیکی جدول (۴).





شکل (۱۴): نمودار پاسخ جرم روی جداساز تحت رکورد ۸۰۲ با طول  $L=2.5$ .



شکل (۱۵): نمودار پاسخ جرم روی جداساز تحت رکورد ۸۰۲ با طول  $L=3$ .

جدول (۵): خلاصه نتایج جداساز تحت رکورد با فرکانس بالا.

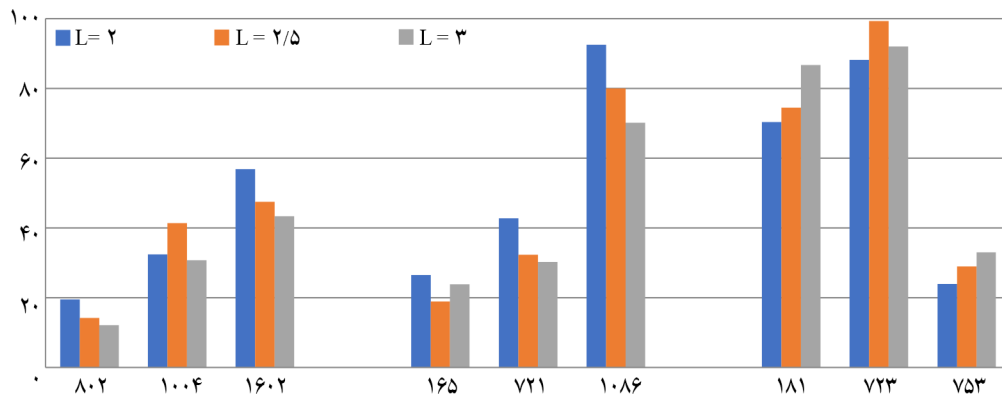
شماره رکورد	$\ddot{u}_{\max}$ (سانتی‌متر)			$\ddot{u}_{\max}$ (متر بر مجذور ثانیه)			$\ddot{u}_{\text{cop,max}} / \ddot{u}_{\text{base,max}}$
	L (متر)	L (متر)	L (متر)	L (متر)	L (متر)	L (متر)	
۸۰۲	۲	۲/۵	۳	۲/۵	۲	۰/۵۷	۰/۱۹
۱۰۰۴	۲	۲/۵	۳	۱/۸۷	۲	۱/۹۵	۰/۶۴
۱۶۰۲	۲	۲/۵	۳	۱/۷۸	۲	۲/۶۴	۰/۲۵
میانگین	۲	۲/۵	۳	۱/۲۲	۲	۱/۶۲	۰/۲۷

جدول (۶): خلاصه نتایج جداساز تحت رکورد با فرکانس متوسط.

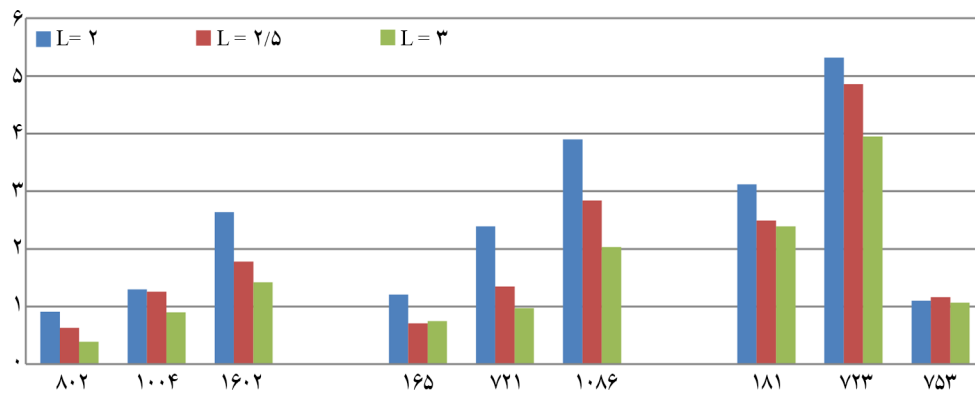
شماره رکورد	$\ddot{u}_{\max}$ (سانتی‌متر)			$\ddot{u}_{\max}$ (متر بر مجذور ثانیه)			$\ddot{u}_{\text{cop,max}} / \ddot{u}_{\text{base,max}}$
	L (متر)	L (متر)	L (متر)	L (متر)	L (متر)	L (متر)	
۱۶۵	۲	۲/۵	۳	۲/۵	۲	۱/۱۰	۰/۲۴
۷۲۱	۲	۲/۵	۳	۱/۳۵	۲	۲/۳۹	۰/۲۹
۱۰۸۶	۲	۲/۵	۳	۲/۸۴	۲	۳/۹۰	۰/۳۴
میانگین	۲	۲/۵	۳	۱/۶۰	۲	۱/۴۶	۰/۲۹

جدول (۷): خلاصه نتایج جداساز تحت رکورد با فرکانس پایین.

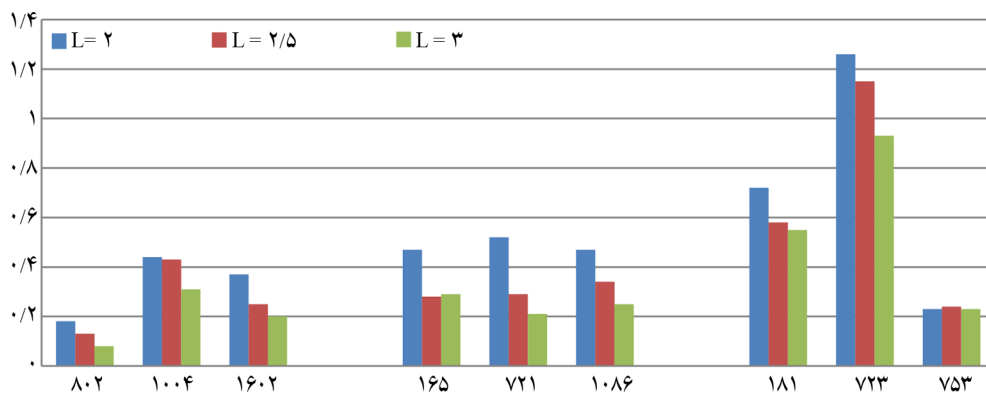
شماره رکورد	$\ddot{u}_{\max}$ (سانتی متر) L			$\ddot{u}_{\max}$ (متر بر مجذور ثانیه) L			$\ddot{u}_{\text{cop,max}} / \ddot{u}_{\text{base,max}}$ L (متر)		
	۲	۲/۵	۳	۲	۲/۵	۳	۲	۲/۵	۳
۱۸۱	۷۰/۳۸	۷۴/۴۷	۸۶/۷۵	۳/۱۲	۲/۴۹	۲/۳۹	۰/۷۲	۰/۵۸	۰/۵۵
۷۲۳	۸۸/۲۳	۹۹/۴	۹۲/۰۵	۵/۳۲	۴/۸۶	۳/۹۵	۱/۲۶	۱/۱۵	۰/۹۳
۷۵۳	۲۳/۹۸	۲۸/۹۳	۳۳/۰۴	۱/۱۰	۱/۱۶	۱/۰۷	۰/۲۳	۰/۲۴	۰/۲۳
میانگین	۶۰/۸۶	۶۷/۵۸	۷۰/۶۱	۳/۱۸	۲/۸۴	۲/۴۷	۰/۷۴	۰/۶۶	۰/۵۷



شکل (۱۶): حداکثر جابه‌جایی جرم جداسازی شده نسبت به پی بر حسب سانتی متر در سیستم تک‌درجه‌آزادی.



شکل (۱۷): حداکثر شتاب مطلق جرم جداسازی شده بر حسب متر بر مجذور ثانیه در سیستم تک‌درجه‌آزادی.



شکل (۱۸): نسبت حداکثر شتاب مطلق جرم جداسازی به حداکثر شتاب زمین در سیستم تک‌درجه‌آزادی.

کلید تحریک‌های جداول (۱) تا (۳) به یک قاب دو بعدی یک طبقه مطابق با مشخصات زیر اعمال و پاسخ سیستم استخراج شد.

$$n = 2 \quad (58)$$

$$g = 9.81 \quad (59)$$

$$m = [20000; 20000]; \text{ (kg)} \quad (60)$$

$$k = [0; 1600000]; \text{ (N/M)} \quad (61)$$

$$c = [0; 18000]; \quad (62)$$

$$m_b = 20000 \text{ kg} \quad k_b = 0 \quad c_b = 0 \quad (63)$$

با توجه به موارد فوق دوره تناوب قاب یک طبقه فوق ۰/۷ ثانیه و میرایی آن ۰/۰۵ درصد خواهد بود. به منظور مقایسه پاسخ سازه جداسازی شده با سازه بدون جداساز، علاوه بر مقادیر طول پاندول به طول ۲، ۲/۵ و ۳ متر، حالت  $L = 0/001$  متر که عملاً باعث می‌گردد سیستم به صورت جداسازی نشده عمل نماید نیز مورد تحلیل قرار گرفته است. نتایج تحلیل‌ها در شکل‌های (۱۹) تا (۲۳) و جدول‌ها و نمودارهای بعدی ملاحظه می‌گردد. به عنوان نمونه نمودار پاسخ قالب یک طبقه روی جداساز تحت رکورد ۸۰۲ آورده شده است.

خلاصه پاسخ‌های بیشینه در جدول‌های (۸) الی (۱۰) و شکل‌های (۲۴) تا (۲۸) نشان داده شده است.

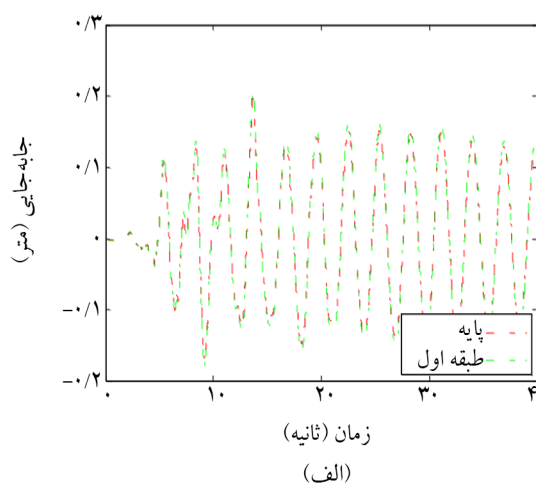
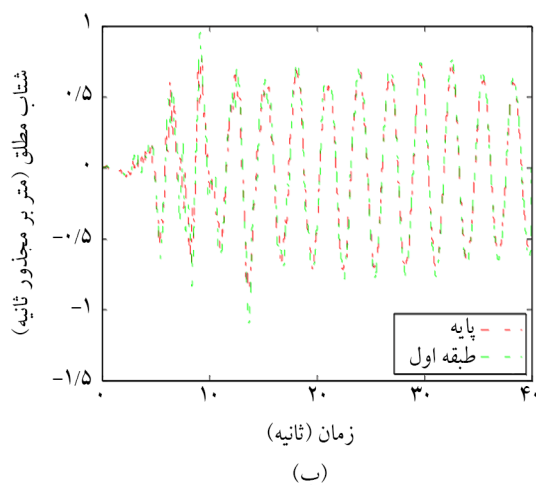
با توجه به جدول‌های (۵) تا (۷) و شکل‌های (۱۶) تا (۱۸) مشاهده گردید که عموماً با افزایش طول پاندول پاسخ‌های جابه‌جایی و شتاب هر دو کاهش می‌یابند (به استثناء مواردی اندک در پاسخ جابه‌جایی).

دیگر نکته قابل ملاحظه در این شکل‌ها این است که با کاهش فرکانس غالب زلزله‌های اعمالی مقادیر پاسخ عموماً افزایش می‌یابد (به استثناء یک مورد در زلزله فرکانس پایین).

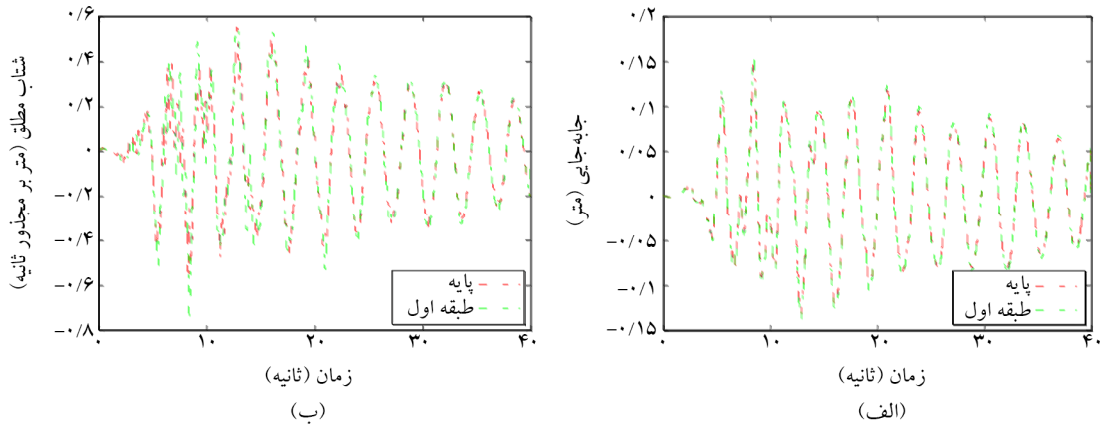
بر اساس شکل (۱۸) می‌توان گفت اکثر زلزله‌ها به جز دو مورد از زلزله‌های فرکانس پایین سیستم جداساز منجر به ۷۰ درصد کاهش در شتاب سیستم گردیده است. استثنائاً در مورد زلزله ۷۲۳ که سیستم جداساز باعث افزایش پاسخ شده است، علت را می‌توان نزدیکی فرکانس غالب زلزله به فرکانس سیستم و ایجاد حالت تشدید دانست.

#### ۴-۵- بررسی عملکرد سیستم در حالت قاب دو بعدی یک طبقه روی جداساز

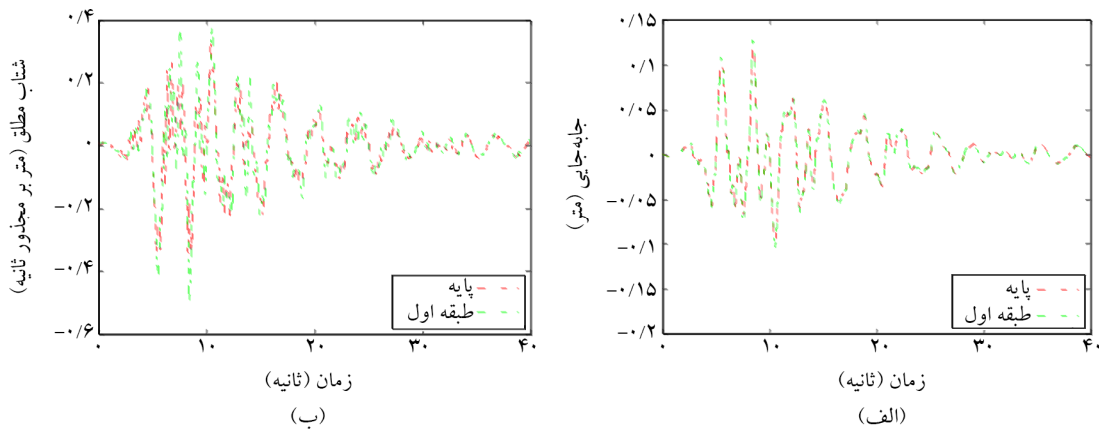
پس از اطمینان از صحت معادلات استخراج شده و دقت مناسب حل عددی معادلات در نرم‌افزار متلب در این بخش به بررسی عملکرد سیستم جداساز پیشنهادی در حالت جداسازی یک قاب دو بعدی یک طبقه (حالت دو درجه آزادی) پرداخته شد.



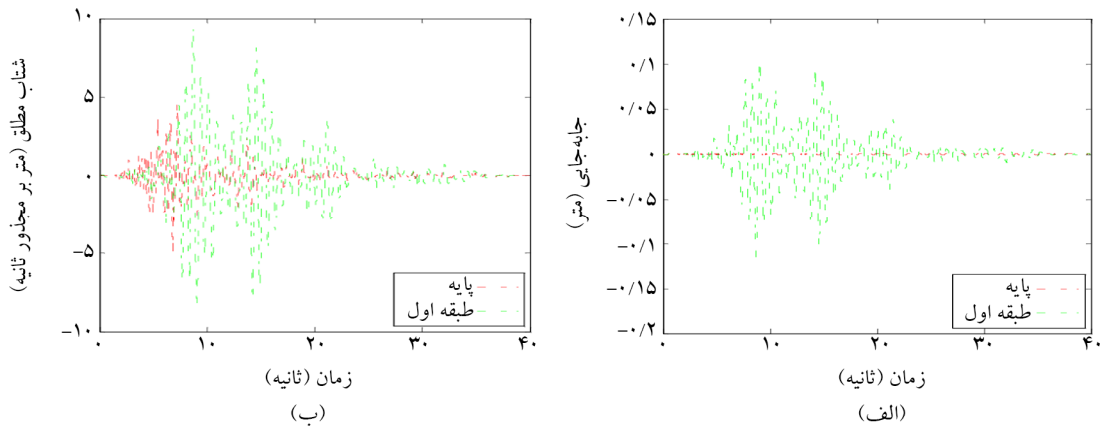
شکل (۱۹): نمودار پاسخ قالب یک طبقه دارای جداساز تحت رکورد ۸۰۲ با طول جداساز  $L=2$ .



شکل (۲۰): نمودار پاسخ قاب یک طبقه دارای جداساز تحت رکورد ۸۰۲ با طول جداساز  $L=2.5$ .



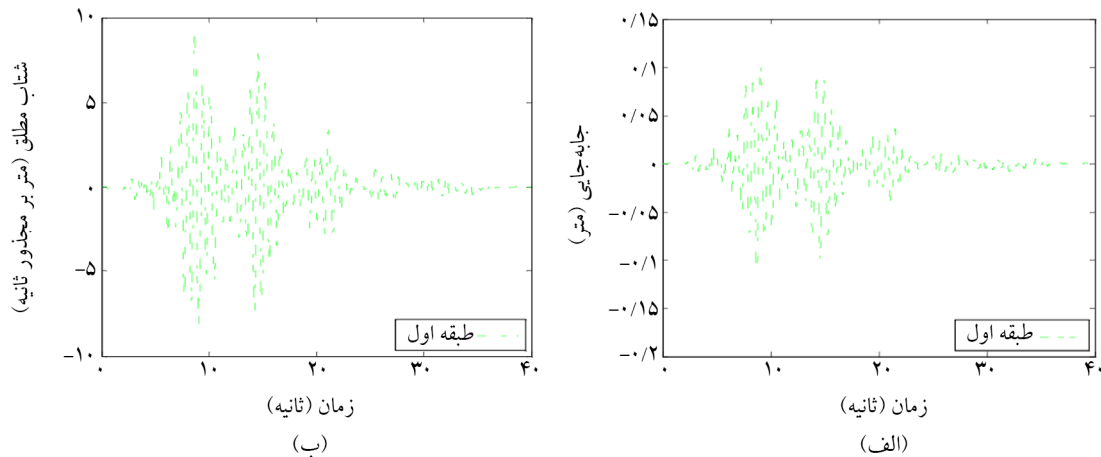
شکل (۲۱): نمودار پاسخ قاب یک طبقه دارای جداساز تحت رکورد ۸۰۲ با طول جداساز  $L=3$ .



شکل (۲۲): نمودار پاسخ قاب یک طبقه دارای جداساز تحت رکورد ۸۰۲ با طول جداساز  $L=0.001$ .

جدول (۸): خلاصه نتایج قاب یک طبقه دارای جداساز تحت رکورد با فرکانس بالا.

$\ddot{u}_{top,max} / \ddot{u}_{base,max}$	$Drift_{story,max} (cm)$	$Drift_{story,max} (Isol. / F.Base)$	$\ddot{u}_{top,max} (Isol. / F.Base)$	$u_{top,max} (cm)$	شماره رکورد													
(متر) L	(متر) L	(متر) L	(متر) L	(متر) L														
۳ / ۲/۵	۲	۳	۰/۰۰۱	۳ / ۲/۵	۲													
۰/۱	۰/۱۴	۰/۲۱	۰/۶۴	۰/۹۲	۱/۳۷	۰/۰۶	۰/۰۸	۰/۱۲	۱	۰/۵۱	۰/۷۴	۱/۱	۱۱/۵	۱۱/۵۳	۱۲/۷۳	۱۵/۴	۲۱/۰۴	۸۰۲
۰/۳۹	۰/۶۸	۰/۷۴	۱/۴۴	۲/۵۳	۲/۷۳	۰/۲	۰/۳۶	۰/۳۸	۱/۰۱	۰/۲	۰/۳۵	۰/۳۸	۷/۱۱	۷/۲۷	۳۴/۶۸	۵۵/۲۵	۴۶/۶۲	۱۰۰۴
۰/۲۷	۰/۲۷	۰/۳۸	۱/۸۱	۲/۳۸	۳/۴۴	۰/۱۷	۰/۲۲	۰/۳۲	۱/۰۱	۰/۲۲	۰/۲۲	۰/۳۲	۱۰/۶۳	۱۰/۸۷	۴۵/۴۶	۴۹/۲۱	۶۰/۷۶	۱۶۰۲
۰/۲۵	۰/۳۶	۰/۴۴	۱/۳۰	۱/۹۴	۲/۵۱	۰/۱۴	۰/۲۲	۰/۲۷	۱/۰۱	۰/۳۱	۰/۴۴	۰/۶۰	۹/۷۵	۹/۸۹	۳۰/۹۶	۳۹/۹۵	۴۲/۸۱	میانگین



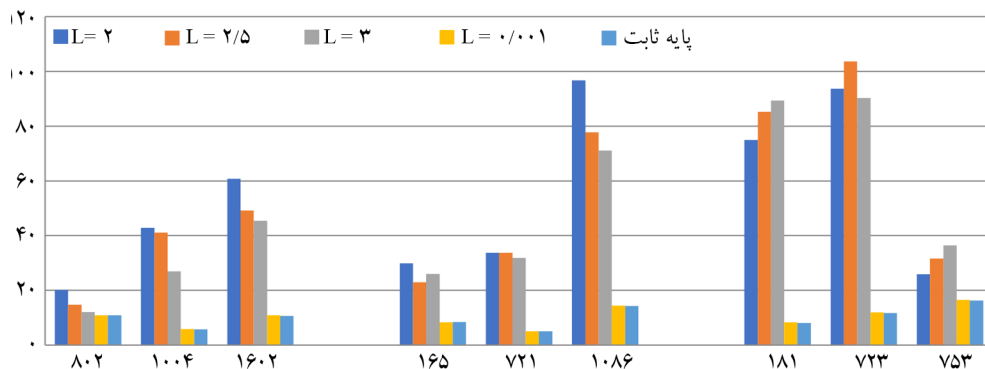
شکل (۲۳): نمودار پاسخ قاب یک طبقه بدون جداساز تحت رکورد ۸۰۲

جدول (۹): خلاصه نتایج قاب یک طبقه دارای جداساز تحت رکورد با فرکانس متوسط.

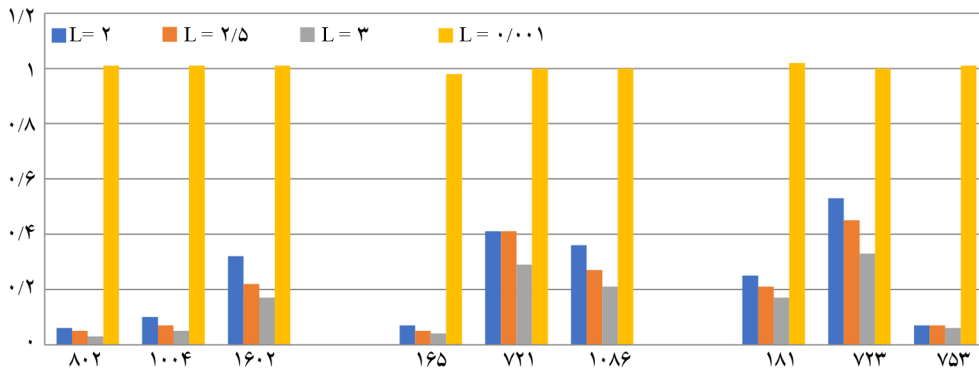
$\ddot{u}_{top,max} / \ddot{u}_{base,max}$	Drift <sub>story,max</sub> (cm)			Drift <sub>story,max</sub> (Isol. / F.Base)			$\ddot{u}_{top,max}$ (Isol. / F.Base)			$u_{top,max}$ (cm)			شماره رکورد					
(متر) L	(متر) L			(متر) L			(متر) L			(متر) L								
۳ / ۲/۵	۲	۳	۲/۵	۲	۳	۲/۵	۲	۳	۲/۵	۲	۳	۲/۵	۲	پایه ثابت	۰/۰۰۱	۳	۲/۵	۲
۰/۲۹	۰/۳۱	۰/۵	۰/۹۱	۰/۹۸	۱/۶	۰/۱۱	۰/۱۲	۰/۱۹	۰/۹۸	۰/۱۱	۰/۱۲	۰/۱۹	۸/۴۳	۸/۳۷	۲۲	۲۰	۲۷	۱۶۵
۰/۲۶	۰/۳۶	۰/۳۶	۱/۴۷	۲/۰۶	۲/۰۶	۰/۲۹	۰/۴۱	۰/۴۱	۱	۰/۲۹	۰/۴۱	۰/۴۱	۵/۰۱	۵/۰۵	۳۱/۸۱	۳۳/۷۲	۳۳/۷۲	۷۲۱
۰/۲۹	۰/۳۸	۰/۵۱	۳/۰۳	۳/۸۷	۵/۲۳	۰/۲۱	۰/۲۷	۰/۳۷	۱	۰/۲۱	۰/۲۷	۰/۳۶	۱۴/۲۸	۱۴/۴۵	۷۱/۰۶	۷۷/۸۱	۹۶/۷۰	۱۰۸۶
۰/۲۸	۰/۳۵	۰/۴۶	۱/۸۰	۲/۳۰	۲/۹۶	۰/۲۰	۰/۲۷	۰/۳۲	۰/۹۹	۰/۲۰	۰/۲۷	۰/۳۲	۹/۲۴	۹/۲۹	۴۱/۶۲	۴۳/۸۴	۵۲/۴۷	میانگین

جدول (۱۰): خلاصه نتایج قاب یک طبقه دارای جداساز تحت رکورد با فرکانس پایین.

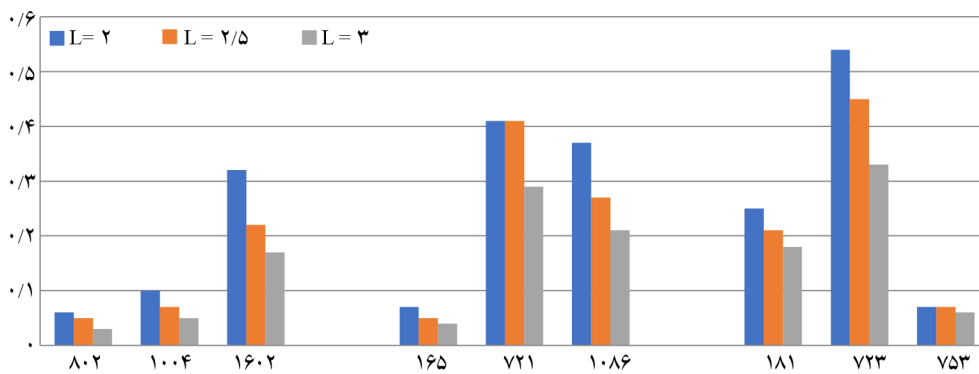
$\ddot{u}_{top,max} / \ddot{u}_{base,max}$	Drift <sub>story,max</sub> (cm)			Drift <sub>story,max</sub> (Isol. / F.Base)			$\ddot{u}_{top,max}$ (Isol. / F.Base)			$u_{top,max}$ (cm)			شماره رکورد					
(متر) L	(متر) L			(متر) L			(متر) L			(متر) L								
۳ / ۲/۵	۲	۳	۲/۵	۲	۳	۲/۵	۲	۳	۲/۵	۲	۳	۲/۵	۲	پایه ثابت	۰/۰۰۱	۳	۲/۵	۲
۰/۲۹	۰/۳۱	۰/۵	۰/۹۱	۰/۹۸	۱/۶	۰/۱۱	۰/۱۲	۰/۱۹	۰/۹۸	۰/۱۱	۰/۱۲	۰/۱۹	۸/۴۳	۸/۳۷	۲۲	۲۰	۲۷	۱۶۵
۰/۲۶	۰/۳۶	۰/۳۶	۱/۴۷	۲/۰۶	۲/۰۶	۰/۲۹	۰/۴۱	۰/۴۱	۱	۰/۲۹	۰/۴۱	۰/۴۱	۵/۰۱	۵/۰۵	۳۱/۸۱	۳۳/۷۲	۳۳/۷۲	۷۲۱
۰/۲۹	۰/۳۸	۰/۵۱	۳/۰۳	۳/۸۷	۵/۲۳	۰/۲۱	۰/۲۷	۰/۳۷	۱	۰/۲۱	۰/۲۷	۰/۳۶	۱۴/۲۸	۱۴/۴۵	۷۱/۰۶	۷۷/۸۱	۹۶/۷۰	۱۰۸۶
۰/۲۸	۰/۳۵	۰/۴۶	۱/۸۰	۲/۳۰	۲/۹۶	۰/۲۰	۰/۲۷	۰/۳۲	۰/۹۹	۰/۲۰	۰/۲۷	۰/۳۲	۹/۲۴	۹/۲۹	۴۱/۶۲	۴۳/۸۴	۵۲/۴۷	میانگین



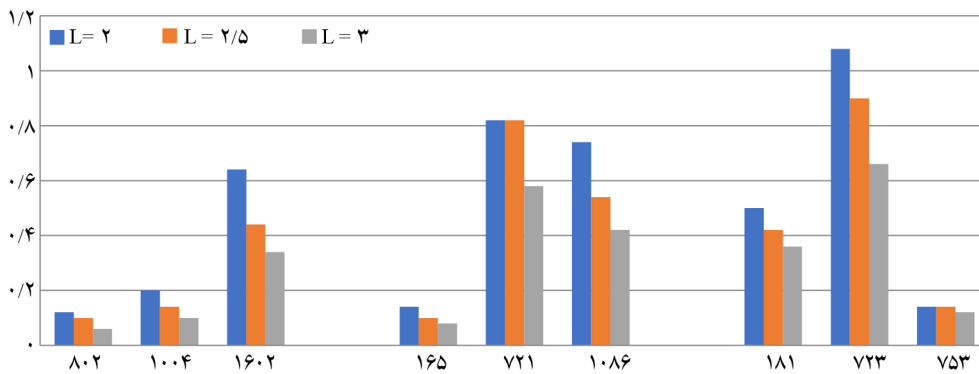
شکل (۲۴): حداکثر جابه‌جایی بام سازه نسبت به پی بر حسب سانتی‌متر در قاب یک طبقه.



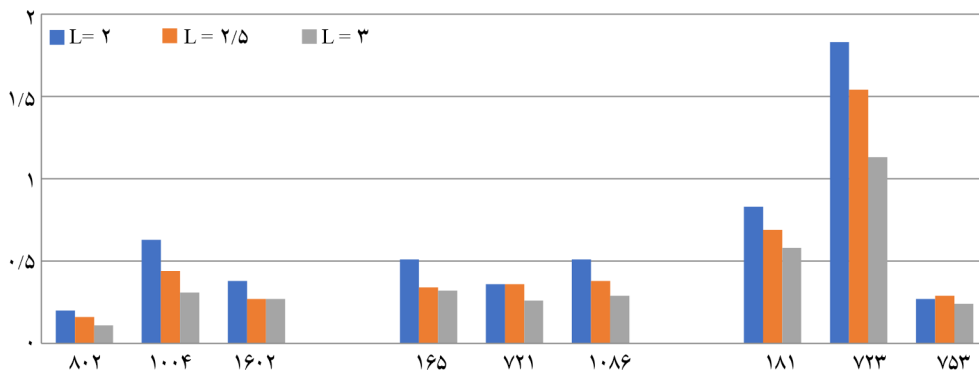
شکل (۲۵): نسبت حداکثر شتاب مطلق بام سازه جداسازی شده به بام سازه بدون جداسازی در قاب یک طبقه.



شکل (۲۶): نسبت حداکثر دررفت بام سازه جداسازی شده به حداکثر دررفت بام سازه بدون جداسازی در قاب یک طبقه.



شکل (۲۷): حداکثر دررفت بام جداسازی شده بر حسب سانتی متر در قاب یک طبقه.



شکل (۲۸): نسبت حداکثر شتاب مطلق بام سازه جداسازی شده به حداکثر شتاب زمین در قاب یک طبقه.

فرکانس سیستم و ایجاد حالت تشدید دانست. با توجه به نتایج سیستم یک طبقه روی جداساز ملاحظه شد که در اغلب موارد می‌توان با کمک سیستم پیشنهادی جابه‌جایی بام سازه نسبت به پی را در حد ۴۰ سانتی‌متر محدود نمود. به علاوه بر اساس شکل ۲۵ به کارگیری سیستم جداساز باعث کاهش بیش از ۷۰ درصد شتاب مطلق سازه می‌گردد. همچنین طبق شکل ۲۶ می‌توان گفت نسبت دریافت بیشینه در سازه جداسازی شده نسبت به سازه بدون جداساز در اغلب موارد کمتر از ۰,۲ است.

در مواردی که پاسخ سیستم جداسازی شده از مقادیر متوسط فوق‌الذکر به‌طور قابل ملاحظه‌ای بیشتر است، استفاده از سیستم جداساز بدون کمک گرفتن از جاذب‌های انرژی توصیه نمی‌شود. در چنین شرایطی استفاده از میراگرها بین قطعه پاندولی و بدنه بتنی پدستال می‌تواند به‌عنوان راهکاری جهت کاهش پاسخ مورد توجه قرار گیرد. شایان ذکر است که در معادلات ارائه شده در این پژوهش استفاده از میراگرها در تراز جداساز پیش‌بینی شده است و با انتخاب مقادیر مناسب میرایی می‌توان مقادیر پاسخ لرزه‌ای را در حد مطلوب کاهش داد. توجه به این نکته نیز لازم است که به دست آوردن مقدار مناسب برای هر جداساز بسته به فرکانس غالب زلزله‌های اعمالی مستلزم انجام آزمون و خطای مکرر است.

## References

- Albin, M., & Pillon, D.B. (1984). U.S. Patent No. 4,462,955. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- Azizi, A., Barghian, M., Hadidi, A., & Yaghmaei-Sabegh, S. (2024). Investigation of structures' seismic behavior when using the "pendulum column" as an isolator. *Asian Journal of Civil Engineering*, 25(3), 2355-2366.
- Barghian, M., & Shahabi, A. (2007). A new approach to pendulum base isolation. *Structural Control and Health Monitoring: The Official Journal of the International Association for Structural Control and*

با توجه به شکل (۲۴) ملاحظه می‌شود که در اغلب موارد می‌توان با کمک سیستم پیشنهادی جابه‌جایی بام سازه نسبت به پی را در حد ۴۰ سانتی‌متر محدود نمود، به علاوه بر اساس شکل (۲۶) به کارگیری سیستم جداساز باعث کاهش بیش از ۷۰ درصد شتاب مطلق سازه می‌گردد. همچنین طبق شکل (۲۷) می‌توان گفت نسبت دریافت بیشینه در سازه جداسازی شده نسبت به سازه بدون جداساز در اغلب موارد کمتر از ۰,۲ می‌باشد.

## ۵- نتایج پژوهش

در این پژوهش پس از استخراج معادلات حرکت حاکم بر سیستم جداساز پیشنهادی، عملکرد آن در جداسازی لرزه‌ای برای یک قاب دو بعدی یک طبقه با رکوردهای فرکانس بالا، متوسط و پایین بررسی و نتایج زیر استخراج شد:

- در حالتی که از سیستم پیشنهادی برای جداسازی سازه یک‌درجه‌آزاد استفاده شود، صرف‌نظر از نوع رکورد تحریک زمین‌لرزه (در همه حالات رکوردهای با فرکانس بالا، متوسط و پایین) با افزایش طول پاندول از ۲ به ۲/۵ یا ۳ متری شتاب مطلق سازه جداسازی شده بیشتر کاهش می‌یابد.
- در حالت جرم متمرکز روی جداساز بدون حضور مقاومت غلتشی پاسخ جداساز به جرم روی جداساز وابسته نیست.
- با توجه به نتایج سیستم جرم متمرکز روی جداساز مشاهده شد که عموماً با افزایش طول پاندول پاسخ‌های جابه‌جایی و شتاب جداساز هر دو کاهش می‌یابد (به‌استثنای مواردی اندک در پاسخ جابه‌جایی). دیگر نکته قابل ملاحظه در این اشکال این است که با کاهش فرکانس غالب زلزله‌های اعمال شده مقادیر پاسخ عموماً افزایش می‌یابد (به‌استثنای یک مورد در زلزله فرکانس پایین). با توجه به اکثر زلزله‌ها به جز دو مورد از زلزله‌های فرکانس پایین سیستم جداساز منجر به ۷۰ درصد کاهش در شتاب سیستم گردید. در مورد زلزله ۷۲۳ که استثنای سیستم جداساز باعث افزایش پاسخ شده است، علت را می‌توان نزدیکی فرکانس غالب زلزله به

Lu, L., Hu, Y., & Zhang, H. (2019). Shaking table tests for base-suspended pendulum isolation structures. *Journal of Vibration and Shock*, 38(5), 71-79.

Oka, R. (1932). *Base Isolation Device for Structures*. Japanese Patent, (95076).

Shahabi, A.B., Ahari, G.Z., & Barghian, M. (2019). Suspended Columns for Seismic Isolation in Structures (SCSI): A preliminary analytical study. *Earthquakes and Structures*, 16(6), 743-755.

Tayaran, A., & Hosseini, M. (2015a). Derivation of Equation of Motion for the Pillow-Shape Seismic Base Isolation System. *Journal of Structural Engineering and Geo-Techniques*, 5(3), 33-40.

Tayaran, A., & Hosseini, M. (2015b). Pillow-shape base isolation system and its seismic behavior. *Journal of Structural Engineering and Geo-Techniques*, 5(2), 25-34.

Zayas, V.A., Low, S.A., Bozzo, L., & Mahin, S.A. (1989). *Feasibility and Performance Studies on Improving the Earthquake Resistance of New and Existing Buildings Using the Friction Pendulum System*. Berkeley, CA, USA: Earthquake Enginee.

#### واژه‌نامه

۱- سیستم پاندولی لغزشی یا اصطکاکی  
Friction Pendulum System (FPS)

۲- جداسازی پاندولی معلق از  
Bas-Suspended Pendulum Isolation (BSPI)

پایه

۳- ستون‌های معلق  
Suspended Columns

۴- کلید برشی  
Shear Key

*Monitoring and of the European Association for the Control of Structures*, 14(2), 177-185.

Beirami Shahabi, A., Zamani Ahari, G., & Barghian, M. (2020). Base isolation systems—A state of the art review according to their mechanism. *Journal of Rehabilitation in Civil Engineering*, 8(2), 37-61.

Buckle, I.G., & Mayes, R.L. (1990). Seismic isolation: history, application, and performance—a world view. *Earthquake Spectra*, 6(2), 161-201.

Foti, D. (2019). Rolling devices for seismic isolation of lightweight structures and equipment. Design and realization of a prototype. *Structural Control and Health Monitoring*, 26(3), e2311.

Foutch, D.A., Gambill, J.B., & Garza-Tamez, F. (1993). Investigation of a seismic base isolation system based on pendular action. *Civil Engineering Studies SRS-578*.

Ginell, W.S. (1988). A pendulum: type base isolation system. In *Proceedings of the 1<sup>st</sup> International Seminar on Modern Principles in Conservation and Restoration of Urban and Rural Cultural Heritage in Seismic-Prone Regions*. Skopje, 383-386.

Helary, J.L.E., & Grenon, P. (1987). U.S. Patent No. 4,687,174. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.

Hosseini, M., & Soroor, A. (2011). Using Orthogonal Pairs of Rollers on Concave Beds (OPRCB) as a base isolation system—part i: analytical, experimental and numerical studies of OPRCB isolators. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 20(8), 928-950.

Hosseini, M., & Soroor, A. (2013). Using orthogonal pairs of rollers on concave beds (OPRCB) as a base isolation system—part II: application to multi-story and tall buildings. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 22(2), 192-216.

Jangid, R., & Londhe, Y. (1998). Effectiveness of elliptical rolling rods for base isolation. *Journal of Structural Engineering*, 124(4), 469-472.

Kelly, J.M. (1979, August). A seismic base isolation: a review. In *Proceedings of the 2<sup>nd</sup> US National Conference on Earthquake Engineering*, 823-837.

Kelly, J.M. (1986). A seismic base isolation: review and bibliography. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 5(4), 202-216.

## Introducing Saddle-Stirrups Pendulum Seismic Isolator and Numerical Investigation of Its Efficiency

Nader Ghorbani<sup>1</sup>, Mahmood Hosseini<sup>2\*</sup> and Hadi Azizian<sup>3</sup>

1. Ph.D. Student, Department of Civil Engineering, Mah.C., Islamic Azad University, Mahabad, Iran
2. Professor, Department of Civil Engineering, Eastern Mediterranean University (EMU), Famagusta 99628, Northern Cyprus via Mersin 10, Türkiye, \*Corresponding Author, email: mahmood.hosseini@emu.edu.tr,
3. Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Mah.C., Islamic Azad University, Mahabad, Iran

In this study, a new seismic isolation system, based on pendulum behavior, has been introduced and proposed. The system comprising two orthogonal pairs of saddle-stirrups pendulums (SSPs), of specific shape, is proposed in which each SSP has a horizontal upper part that can roll slightly on a flat seat and two vertical hanging stirrup-wise parts that can have pendulum motion, associated with the rolling motion of the upper horizontal part. This way, a kind of pendulum motion-based seismic isolation system is created with a natural oscillation period, which can be easily increased to 2 seconds or more by adjusted an appropriate length of the hanging parts of the SSP, and as a result, the input acceleration to the building is remarkably decreased. To evaluate the system's performance and efficiency, after a set of finite element analyses for making sure about the appropriate load bearing conditions of system's parts, the equation of motion of a single-degree-of-freedom (SDOF) system, equipped with the proposed isolator, was derived, based on Lagrange method, considering pendulums' geometric nonlinearity, and solved numerically, by Runge-Kutta-Nystrom technique, using the MATLAB platform. Several accelerograms of low-, mid- and high-frequency earthquakes were considered, and the seismic responses of isolated and non-isolated SDOF systems, including the maximum drift and maximum absolute acceleration, were compared. For verification of the formulation and the MATLAB code, developed by the authors for the nonlinear time history analysis (NLTHA), three cases were considered. In the first case, the isolated system response to a sinusoidal input with the initial frequency of the system was obtained and checked against the response values obtained by using the exact solution. In the second case, the length of the pendulum was assumed to be very large, resulting in a very long period of the isolated system, so that its absolute acceleration response approached zero, and its relative displacement response became almost the negative values of the ground displacement at each time instant. In the third case, a very short length, almost zero, was considered for the pendulum, and the isolated system responses were very close to those of non-isolated system, as expected. Results of conducted series of NLTHA show that the proposed SSP isolation system reduces the maximum values of absolute acceleration, base shear, and story drift of the buildings around 70% on average. Results also show that the maximum displacement above the isolation level is around 40 cm, on average, and decreases with increasing the pendulum length from 2.0 m to 3.0 m. Based on the structure and the main components of the proposed SSP isolator, and the obtained numerical results, it can be claimed that the SSP isolator is a low-tech low-cost type seismic isolator with high efficiency in response reduction of buildings. As such its application in short to medium buildings can be strongly recommended, particularly in underdeveloped and developing, and even developed countries, located in seismic regions. For application of the proposed system in relatively tall building further studies are required, which are presently at hand by the authors, and would be accomplished hopefully soon.

**Keywords:** Lagrange Method; High-, Medium-and Low-Frequency Earthquake Excitations; Story Drift; Base Shear; Nonlinear Time History Analysis; Runge-Kutta-Nystrom Technique.