

## بررسی سه بعدی جداساز لرزه ای جفت غلتکهای متعامد بر بستر کاو

علی امیدعلی

دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی سازه، گروه عمران، دانشکده فنی مهندسی، واحد علوم و تحقیقات کرمانشاه، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمانشاه، ایران.  
[aliomidali.civileng@gmail.com](mailto:aliomidali.civileng@gmail.com)

مهرزاد تحملی رودسری

استاد یار، گروه عمران، دانشکده فنی مهندسی، واحد کرمانشاه، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمانشاه، ایران.  
[tahamouli@iauksh.ac.ir](mailto:tahamouli@iauksh.ac.ir)

محمود حسینی

دانشیار، پژوهشکده مهندسی زلزله، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران.  
[hosseini@iiees.ac.ir](mailto:hosseini@iiees.ac.ir)

کلید واژه‌ها: جداساز لرزه ای، جفت غلتکهای متعامد، آنالیز سه بعدی با نرم افزار MATLAB، لغزش

### چکیده

در این مقاله توسط کد نویسی در محیط نرم افزار MATLAB و استفاده از روش رونگه کوتا مرتبه چهار به حل عددی معادلات غیرخطی حرکت سیستم جداساز زوج غلتک متعامد بر بستر مقعر در سه بعد بصورت تغییر شکل بزرگ پرداخته شده است. در این مطالعه مواردی از قبیل تفاوت تحلیل دو بعدی و سه بعدی، تاثیر جرم غلتک در پیوند سیستم، بررسی لرزه ای سیستم بصورت سه بعدی تحت شتاب نگاشت زلزله El Centro و لغزش سیستم مورد بررسی قرار گرفته است و نتایج حاکی از لزوم تحلیل سه بعدی بدون ساده سازی و در نظر گرفتن لغزش و مقاومت غلتشی در معادلات سیستم می باشد.

### مقدمه

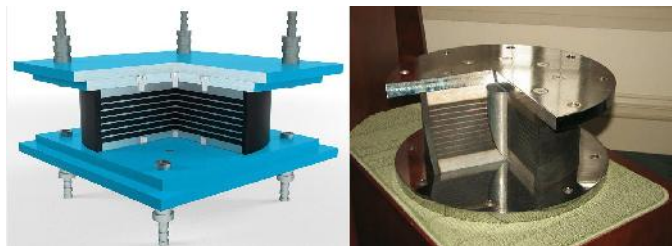
از آنجایی که پدیده زلزله در سراسر دنیا یکی از عوامل پر خطر برای ساختمان ها محسوب می شود لذا در آیین نامه های ساختمانی روشهای مختلفی جهت پایداری بخشیدن به ساختمان ها در مواجهه با زلزله، بررسی و تدوین گردیده است. با توجه به ماهیت زلزله و ناگزیر بودن جرم ساختمان که موجب حاصل شدن نیروی اینرسی و به طبع آن نیروهای سختی و میرایی در سازه می گردد، بسته به شرایط دینامیکی سازه موجب تغییرات نسبی در جابجایی طبقات که یکی از عوامل اصلی مخرب در ساختار ساختمان است می شود؛ با در نظر داشتن مطلب فوق این سوال پیش می آید که چگونه می توان ساختمان را از لرزش زمین جدا کرد، این فکر اولین بار در اوت ۱۹۰۹، به ذهن ج.ا. کلانتارینتز (نعیم و کلی، ۱۳۸۱) رسید و بدین گونه فلسفه طراحی مقاوم لرزه ای یا همان جدا ساز لرزه ای آغاز شد. جدا سازهای لرزه ای به دلیل سختی جانبی کم نسبت به سازه که باعث کاهش مقدار شتاب انتقالی به ساختمان و همچنین افزایش جابجایی نسبی در جداگر می شود، می توانند جابجایی نسبی طبقات را کاهش دهند.

### مروری بر مطالعات گذشته

به دلیل عملکرد غیر متعارف جداسازها نسبت به عناصر سازه تا کنون انواع مختلفی از سیستم جداساز لرزه ای چه از لحاظ هندسه و چه از لحاظ عملکرد طرح و بررسی گشته است. از انواع جداسازهای پایه می توان به موارد زیر اشاره کرد. الف) سیستم‌های الاستومر (شکل ۱) شامل: نشیمن‌های لاستیک با هسته سربی (Lead-Rubber Bearing- LRB) که در سال ۱۹۷۵ در نیوزلند اختراع شده و به طور گسترده‌ای در نیوزلند، ژاپن و ایالات متحده مورد استفاده قرار گرفته‌اند. نشیمن‌های لاستیک طبیعی با میرایی بالا

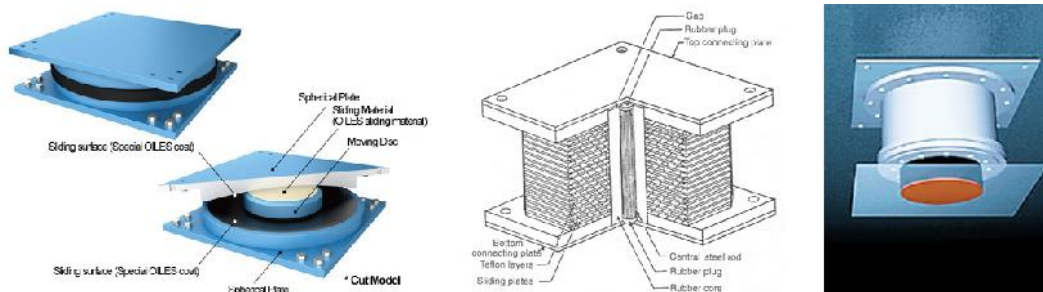


(High-damping Rubber Bearing - HDR)؛ در سال ۱۹۸۲، شرکت انگلیسی مؤسسه تحقیقات سازندگان مالزیایی لاستیک، یک ترکیب لاستیک طبیعی ابداع کرد که میرایی ذاتی آن به حدی بود که نیاز به استفاده از اجزای میراکننده اضافی را از بین برد (نعیم و کلی، ۱۳۸۱).



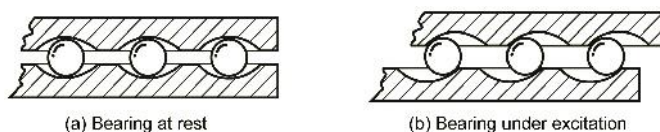
شکل ۱- از راست به چپ به ترتیب: جداساز الاستومری با هسته سربی- جداساز الاستومری با میرایی زیاد

ب) سیستم های اصطکاکی (شکل ۲) شامل: سیستم تاس (The Hybrid Taisei Shake Suppression System- TASS) به وسیله گروه تاییسی ژاپن توسعه یافته است. در این سیستم تمام بار قائم به وسیله المانهای تفلون- فولاد ضد زنگ حمل می شود. به علاوه از نشیمن های لایه‌ای نئوپرنی که باری به آنها وارد نمی شود به منظور ایجاد نیروهای بازگرداننده استفاده می شود. سیستم جداساز اصطکاکی پس جهنده (Resilient-Friction Base Isolation System- R-FBI) که با استفاده از سطوح مشترک لغزنده متعدد در یک نشیمن، سرعت بین بالا و پائین نشیمن بر تعداد لایه ها تقسیم شده و در نتیجه سرعت هر لایه آنقدر کوچک می شود که ضریب اصطکاک پائین حاصل شود. سیستم آونگ اصطکاکی (Friction Pendulum System- FPS) سیستم جداسازی اصطکاکی است که به وسیله هندسه خاص خود، عمل لغزش و نیروی بازگرداننده را فراهم می کند. این جداساز دارای یک قسمت لغزنده مفصلی است که بر روی یک سطح کرومی از جنس فولاد ضد زنگ می لغزد. سطحی از این قسمت لغزنده مفصلی که در تماس با سطح کرومی است، با موادی با اصطکاک کم پوشیده شده است. سطح دیگر این لغزنده نیز کرومی بوده و با لایه ای از فولاد ضد زنگ پوشیده شده است. این سطح در یک شیار کرومی که آن هم از ترکیباتی با اصطکاک کم پوشیده شده قرار می گیرد. با حرکت قسمت لغزنده از روی سطح کرومی، جرم موجود از روی آن بلند شده که این امر سبب ایجاد نیروی بازگرداننده در سیستم می شود. اصطکاک بین سطح لغزنده مفصلی و سطح کرومی نیز سبب ایجاد میرایی در جداسازها می شود. سختی مؤثر جداساز و دوره تناوب سازه جداسازی شده به وسیله شعاع انحناى سطح محدب کنترل می شود (نعیم و کلی، ۱۳۸۱).



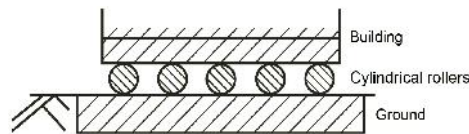
شکل ۲- از راست به چپ به ترتیب: سیستم تاس- جداساز اصطکاکی پس جهنده- سیستم آونگ اصطکاکی

ج) سیستم های غلتشی (Sloped Rolling-Type Bearing- RTB)، وجود یک سطح منحنی لغزشی در سیستم FPS با استفاده از وزن روسازه ایجاد یک نیروی ذخیره شونده در سیستم می نماید، هرچند که وجود نیروی اصطکاک لغزشی سبب انتقال نیروی افقی به روسازه می شود. یک راه حل مؤثر برای کاهش بیشتر این نیروی منتقل شده، استفاده از سیستم غلتشی به جای سیستم لغزشی است، زیرا مقدار مقاومت غلتشی معمولاً بسیار کمتر از مقاومت لغزشی است (حسینی و سرور، ۱۳۸۸). از اشکال مختلف این سیستم می توان به موارد زیر اشاره کرد. - گوی غلتان میان دو سطح مقعر (شکل ۳) که می توان از آن به عنوان اولین سیستم غلتشی یاد کرد در سال ۱۸۷۰ توسط تایلون طرح و ثبت اختراع گردید (Lee et al., 2007).



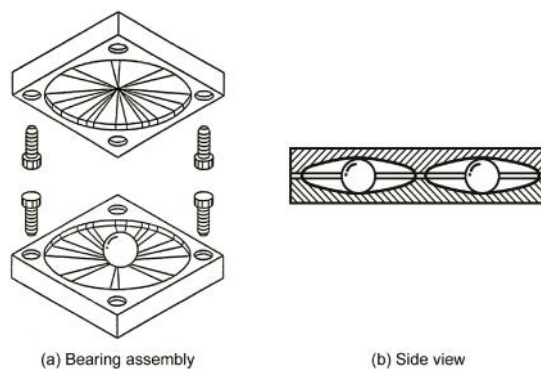
شکل ۳- سیستم جداساز گوی غلتان میان دو سطح مقعر (Lee et al., 2007)

- غلتک با مقطع دایره بر بستر تخت (شکل ۴) که در سال ۱۹۹۳ توسط لین وهان (Lin and Hone, 1993) بررسی گردید که سختی جانبی صفر را نتیجه داد ولی به علت عدم وجود نیروی بازگرداننده در جداساز پیشنهادی، با توجه به کدهای فعلی ساختمان یا مشخصات پل برای طراحی جداسازی لرزه ای مطابق با آیین نامه های (CBC 2001 and AASHTO 2000) غیر قابل قبول می باشد (Lee et al., 2007) در سال ۲۰۰۰ جنگید این سیستم را با الحاق قطعات بازگرداننده بررسی کرد (Jangid, 2000).



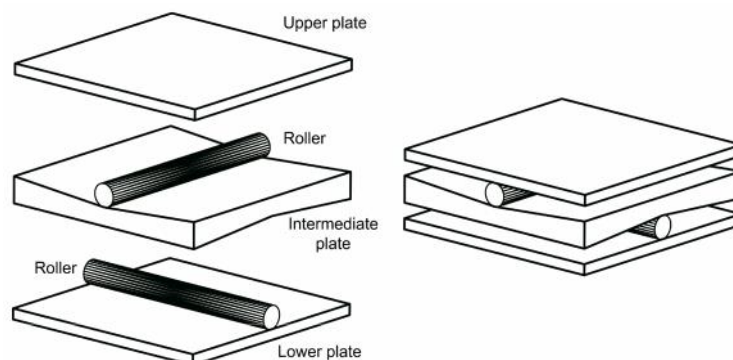
شکل ۴- سیستم جداساز غلتک بر بستر تخت (Lee et al., 2007)

- گوی غلتان بر بستر مخروطی (شکل ۵) در سال ۱۹۹۷ توسط کمینی اختراع گردید. در این جداساز اگر زاویه شیب سطوح مخروطی کوچک باشد سختی جانبی سیستم به صفر نزدیک می گردد. علاوه بر این با توجه به سطح شیب دار و گرانش زمین عمل بازگشت به مرکز نیز در این سیستم انجام می گیرد. با این حال، با توجه به ماهیت تماس نقطه‌ای، ظرفیت باربری قائم سیستم کاهش می‌یابد (Lee et al., 2007).



شکل ۵- سیستم گوی غلتان بر بستر مخروطی (Lee et al., 2007)

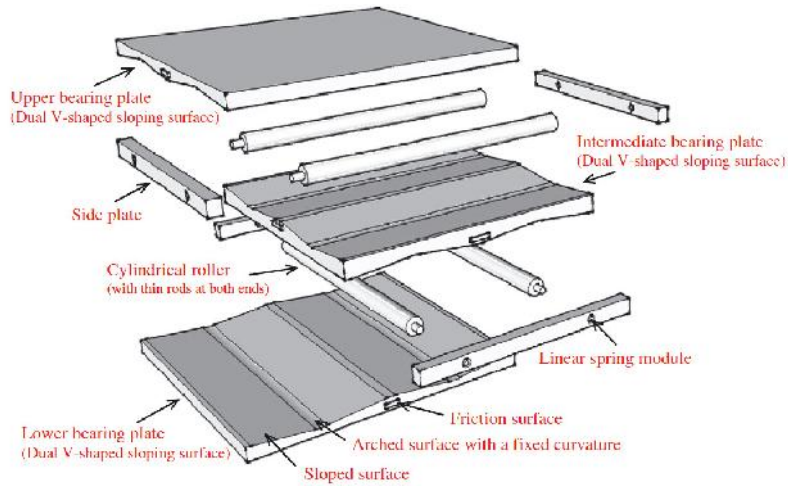
- غلتک با مقطع بیضوی بر بستر تخت که در سال ۱۹۹۸ توسط جنگید و لاندھی (Jangid and Londhe, 1998) بررسی شد. این سیستم به علت بیضوی بودن مقطع غلتک‌ها نیروی بازگرداننده را تامین می‌نماید ولی مقداری شتاب قائم در روبنا ایجاد می‌کند (حسینی و سرور، ۱۳۸۸).  
- تک غلتک‌های متعامد بر بستر V شکل که در سال ۲۰۰۶ توسط تسائی و همکاران (Tsai et al., 2006) پاسخ لرزه ای این سیستم را جهت جدا سازی پل با مقیاس ۷.۵ برابر کوچکتر آزمایش و بررسی کردند (حسینی و سرور، ۱۳۸۸). همچنین لی و همکاران در سال ۲۰۰۷ (Lee et al., 2007) جهت جداسازی پل‌ها بزرگراه سیستم مشابه ای (شکل ۶) را طرح و بصورت تحلیلی، عددی و آزمایشگاهی بررسی کردند.



شکل ۶- سیستم ارائه شده توسط لی و همکاران (Lee et al., 2007)

- جفت غلتک‌های متعامد بر بستر V شکل در سال ۲۰۱۴ توسط هانگ و همکاران (Wang et al., 2014) طرح و بررسی گردید. این سیستم از نظر هندسه شبیه ترین جداساز به سیستم جفت غلتک‌های متعامد بر بستر مقعر می باشد. اما به دلیل خطی بودن سطوح شیبدار عملکردی خطی داشته و سختی جانبی سیستم در طی غلتیدن غلتک بر روی سطوح شیبدار ثابت می ماند (شکل ۷).





شکل ۷- سیستم جفت غلتکهای متعامد بر بستر V شکل (Wang et al., 2014)

### معرفی سیستم جفت غلتکهای متعامد بر بستر مقعر

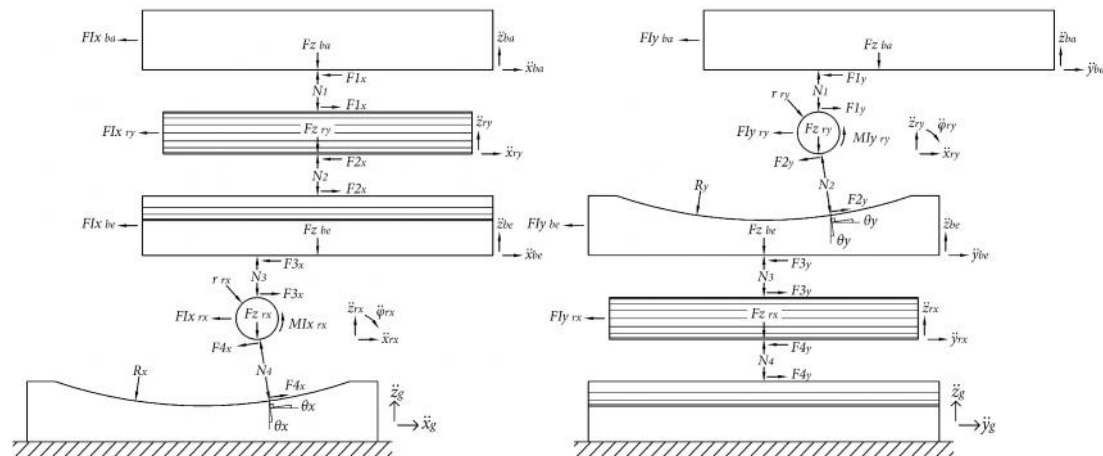
جداساز جفت غلتکهای متعامد بر بستر مقعر (Orthogonal Pairs of Rollers on Concave Beds - OPRCB) برای اولین بار در سال ۲۰۰۷ توسط حسینی و کنگرلو طرح و بررسی و در سال ۲۰۱۰ توسط حسینی و سرور مجدداً همراه با رو بنا به صورت سازه دو بعدی جدا سازی شده بررسی گردید. نمونه اولیه ساخته شده این سیستم در (شکل ۸) نشان داده شده است. در تکمیل نمونه آزمایشگاهی به جهت هماهنگ کردن حرکت جفت غلتک آنها را به وسیله اتصال دو صفحه انتهایی همراه با اتصال بالبرینگ به هم متصل نمودند. در این سیستم صفحه فوقانی جفت غلتک می تواند بصورت آزاد در یک جهت افقی حرکت کند و ترکیب متعامد جفت غلتکها حرکت آزادانه صفحه فوقانی را در دو جهت افقی میسر می سازد. همچنین بستر مقعر با وجود گرانش زمین نیروی بازگرداننده سیستم را تامین می نماید.



شکل ۸- مدل آزمایشگاهی اولیه (کنگرلو و حسینی ۱۳۸۶)

### مطالعه تحلیلی سیستم

به دلیل پیچیدگی مسئله و ماهیت غیر خطی هندسه و عملکرد این جداساز در این مطالعه به بررسی دقیقتر این سیستم بصورت سه بعدی پرداخته شده است. این سیستم با فرض عدم لغزش بین اجزا (غلتش خالص) در حالت دو بعدی دارای حداقل یک درجه آزادی مستقل ( $Y$ ) می باشد؛ جابجایی در راستای  $Z$  را می توان برحسب  $Y$  نوشت. اما در حال سه بعدی سیستم دارای دو درجه آزادی غیر متعامد  $X$  و  $Y$  می باشد. به عبارت دیگر هر دو درجه آزادی  $X$  و  $Y$  بر حرکت قائم سیستم ( $Z$ ) تاثیر گذاشته و متعاقباً تاثیر می پذیرند. در نتیجه درجات آزادی  $X$  و  $Y$  بر هم تاثیر گذارند. در شکل ۹ نمودار جسم آزاد برای یکی از غلتکهای متعامد نشان داده شده است. در این شکل  $F1$  تا  $F4$  نیروهای مماس بر سطح،  $N1$  تا  $N4$  عکس العمل عمود بر سطح،  $F1$  نیروی اینرسی افقی،  $M1$  لنگر اینرسی غلتک،  $FZ$  وزن بعلاوه نیروی اینرسی قائم، دوران حول مرکز دایره کمان بستر، دوران غلتک حول مرکز خودش،  $R$  شعاع کمان بستر،  $r$  شعاع غلتک می باشد؛ همچنین پسوندهای  $ba$  به معنای بیس ( $Base$ )،  $be$  بستر ( $Bed$ )،  $r$  غلتک ( $Roller$ )،  $x$  و  $y$  راستای حرکت می باشند.

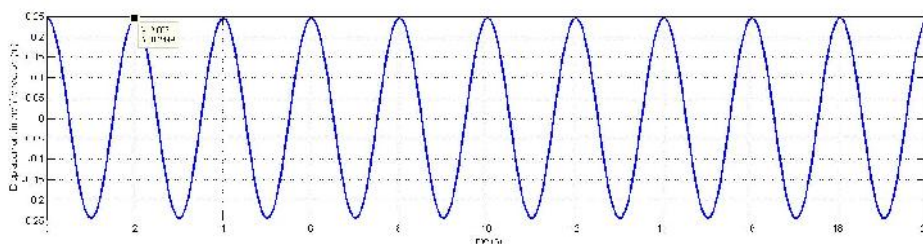


شکل ۹- نمودار جسم آزاد تک غلتکهای متعامد از جفت غلتکهای متعامد سیستم OPRCB در دو صفحه  $YZ$  و  $XZ$

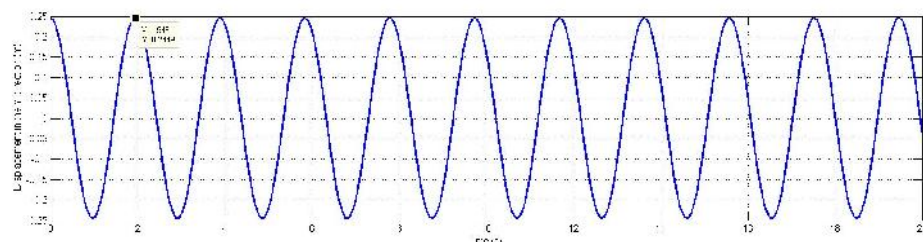
این سیستم جداساز به لحاظ هندسه غیر خطی دارای دستگاه معادلات دینامیکی غیر خطی می باشد که بصورت تغییر شکل بزرگ بررسی می گردد، بمنظور حل این معادلات می بایست از روش عددی بهره جست، یکی از بهترین روشهای عددی برای حل معادلات غیرخطی روش رونگه کوتا مرتبه چهار (Kreyszig, 2010) می باشد که در این مطالعه از این روش استفاده شده است.

### خروجی نرم افزار نوشته شده در MATLAB

حال با استفاده از نرم افزار نوشته شده در مطلب برای حل عددی معادلات غیر خطی سیستم و مقدار دهی ابعادی و جرمی مطابق با نمونه آزمایشگاهی جداساز، نسبت به دریافت خروجی نرم افزار اقدام شده است. در شکل ۱۰ و ۱۱ نمودار حرکت ارتعاش آزاد سیستم برای حرکت افقی تراز بیس در راستای  $Y$  بصورت حرکت دو بعدی با و بدون در نظر گرفتن جرم غلتک نمایش داده شده است.



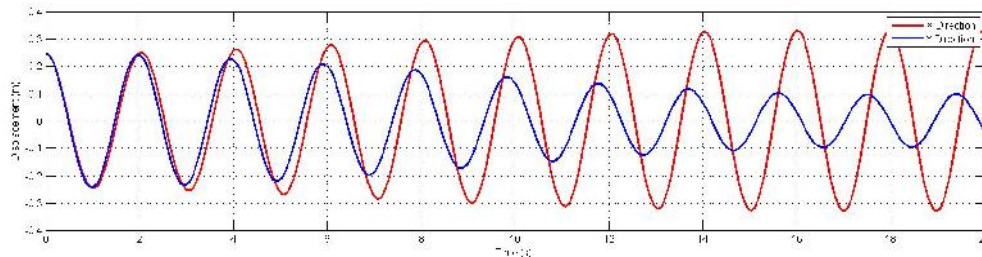
شکل ۱۰- نمودار حرکت بیس در راستای  $Y$  تحت ارتعاش آزاد دو بعدی سیستم با ۰.۵ رادیان دوان اولیه بدون در نظر گرفتن جرم غلتک



شکل ۱۱- نمودار حرکت بیس در راستای  $Y$  تحت ارتعاش آزاد دو بعدی سیستم با ۰.۵ رادیان دوان اولیه با در نظر گرفتن جرم غلتک

پریود حرکت در حالتی که از جرم غلتک صرف نظر شده است (Hosseini and Soroor, 2011) برابر با 2.006 ثانیه و در حالتی که جرم غلتک در معادلات تعادل سیستم در نظر گرفته شده است برابر 1.948 ثانیه می باشد. که نشان دهنده تاثیر نیرو و لنگر اینرسی غلتک در معادلات غیر خطی مسئله می باشد. لازم به ذکر است پریود سیستم مستقیماً به شعاع غلتک و بستر مقعر بستگی دارد. در شکل ۱۲ نمودار حرکت ارتعاش آزاد سیستم برای حرکت افقی تراز بیس در دو راستای  $X$  و  $Y$  بصورت حرکت سه بعدی با در نظر گرفتن جرم غلتک نمایش داده شده است. همانگونه که در شکل مشاهده می شود دامنه و پریود حرکت افقی بیس در هر دو راستا در طول زمان متغیر است این درحالی است که، در حرکت دو بعدی دامنه و پریود حرکت در طول زمان ثابت می باشد و این مطلب تاثیر درجات آزادی سیستم بر یکدیگر را در حرکت سه بعدی نشان می دهد.

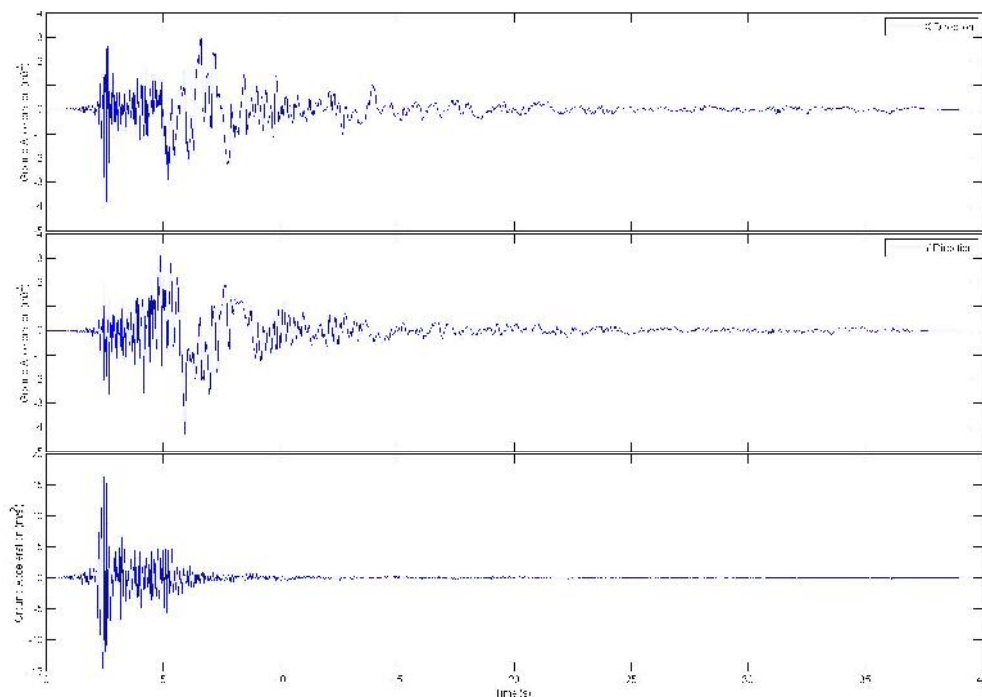




شکل ۱۲- نمودار حرکت بیس در راستای  $Y$  و  $X$  تحت ارتعاش آزاد سه بعدی سیستم با  $0.5\%$  رادبان دوان اولیه برای هر جهت

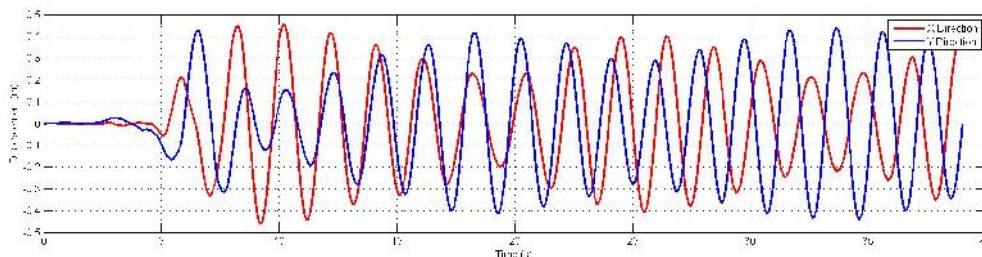
## بررسی لرزه ای

در بررسی لرزه ای این سیستم جداساز از سه مولفه شتاب زلزله (El Centro, Imperial Valley 1979) در راستاهای  $X$ ،  $Y$  و  $Z$  استفاده شده است (شکل ۱۳).

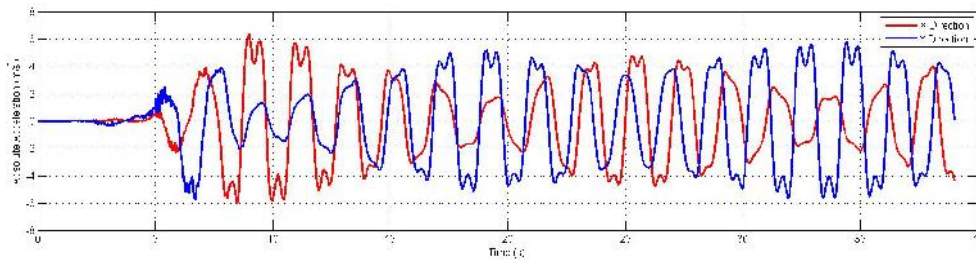


شکل ۱۳- شتاب نگاشت زلزله El Centro به ترتیب از بالا به پایین برای راستای  $X$ ،  $Y$  و  $Z$

اشکال ۱۴ و ۱۵ به ترتیب جابجایی نسبی و شتاب مطلق بیس در دو راستای  $Y$  و  $X$  را نشان می دهد. در این مطالعه معادلات سیستم جداساز بدون در نظر گرفتن مقاومت غلتشی نوشته و تحلیل گردیده است، بنابراین هیچگونه میرایی در سیستم وجود نداشته و همانگونه که در شکل ۱۵ مشهود است سیستم مقداری دچار تشدید شده است. همچنین می توان تاثیر دو درجات آزادی را بر یکدیگر که تا حدی باعث تقسیم برآیند کلی شتاب بیس ما بین دو درجه آزادی شده را مشاهده نمود.



شکل ۱۴- نمودار جابجایی افقی بیس نسبت به زمین در دو راستای  $Y$  و  $X$

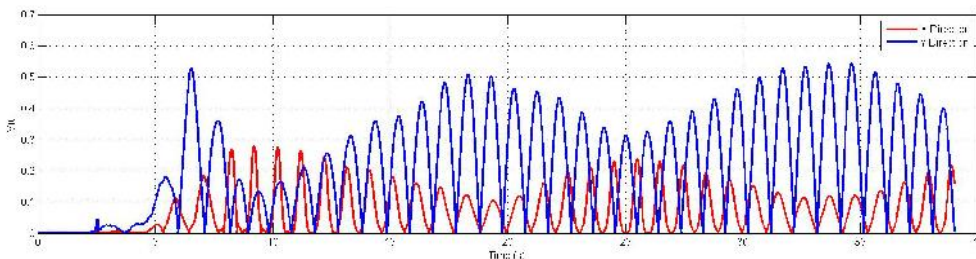


شکل ۱۵- نمودار شتاب افقی مطلق بیس در دو راستای  $X$  و  $Y$

## لغزش سیستم

لغزش زمانی رخ خواهد داد که میزان نیروی مماس بر سطح  $F$  از مقدار نیروی اصطکاک ایستایی بیشتر شود، که این حالت با کاهش عکس‌العمل عمود بر سطح  $N$  نیز میسر می‌گردد. در این سیستم با توجه به هندسه هر چه غلتک جابجایی افقی بیشتری داشته باشد در زاویه شیب بیشتری قرار خواهد گرفت که این امر با توجه به معادلات تعادل سبب افزایش نیروی مماسی و کاهش عکس‌العمل عمود بر سطح می‌گردد البته نیروی عکس‌العمل عمود بر سطح متأثر از نیروی گریز از مرکز با توجه به سرعت دورانی غلتک حول مرکز کمان بستر می‌باشد. در صورت بروز لغزش سیستم از حالت یک درجه آزاد در حرکت دو بعدی و دو درجه آزاد در حرکت سه بعدی خارج شده و به ازاء هر جدانشدگی لغزشی حداقل یک درجه آزادی به مسئله اضافه می‌گردد.

در نمودار شکل ۱۶ مقدار ضریب اصطکاک مورد نیاز به جهت عدم لغزش در طی بررسی لرزه ای سه بعدی سیستم با تحریک سه مولفه شتاب نگاشت زلزله El Centro نشان داده شده است. با توجه به اینکه در نمونه آزمایشگاهی مقدار ضریب اصطکاک ایستایی برابر ۰.۳۵ می‌باشد (Hosseini and Soroor, 2011) می‌توان گفت سیستم در راستای  $Y$  دچار لغزش شده است. این مطلب لزوم در نظر گرفتن لغزش و تشکیل معادلات لغزشی با درجات آزادی بیشتر را نشان می‌دهد.



شکل ۱۶- نمودار ضریب اصطکاک ایستایی مورد نیاز در طی بررسی لرزه ای با زلزله El Centro

## نتیجه‌گیری

در این مقاله با مقایسه تحلیل دو بعدی و سه بعدی در حالت تغییر شکل بزرگ می‌توان به لزوم بررسی سه بعدی مسئله، همچنین غیر متعامد بودن درجات آزادی و تاثیر متعاقب آنها به واسطه جابجایی قائم سیستم بر یکدیگر پی برد. همچنین به منظور بررسی دقیق تر سیستم می‌بایست جرم غلتک و بستر مقعر را در معادلات سیستم مخصوصاً در زمانی که بررسی لغزشی مد نظر باشد در نظر گرفت. لزوم در نظر گرفتن مقاومت غلتشی در معادلات تعادل دینامیکی سیستم به جهت کاهش احتمال تشدید و واقع بینانه تر کردن پاسخ سیستم، و همچنین به علت بروز لغزش در این سیستم جداساز، نوشتن معادلات سیستم در حالت چند درجه آزادی به منظور در نظر گرفتن لغزش، احساس می‌گردد که در مطالعات بعدی بررسی خواهد گردید. در بررسی لرزه ای این سیستم، تاثیر پذیری درجات آزادی افقی از مولفه قائم زلزله موضوعی است که در مطالعات آینده می‌تواند مورد بررسی قرار گیرد.

## مراجع

- حسینی م و سرور ا، (۱۳۸۸)، معرفی جفت غلتکهای متعامد بر بسترهای کاو با قوس دایره‌ای به عنوان جداساز لرزه‌ای: بررسیهای عددی و آزمایشگاهی، مجله ترویجی پژوهشگاه بین المللی زلزله، دوره بهار و تابستان ۱۳۸۸، تهران، ایران.
- کنگرلو ک و حسینی م، (۱۳۸۶)، بررسی جداساز لرزه ای بصورت غلتکهای متعامد، مجموعه مقالات پنجمین کنفرانس زلزله شناسی و مهندسی زلزله (SEE5)، پژوهشگاه زلزله شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران.

- نعیم ف و کلی ج م، (۱۳۸۱). طراحی ساختمانها با جداسازهای لرزه ای از تئوری تا عمل، ترجمه غفوری آشتیانی م و همایون شاد ف، انتشارات پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران.

Hosseini M and 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, 928–950

Jangid RS (2000) Stochastic seismic response of structures isolated by rolling rods, *Engineering Structures*, 22, 937–946

Jangid RS and Londhe YB (1998) Effectiveness of elliptical rolling rods for base isolation, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 124, 469-72

Kreyszig E (2010) Advanced Engineering Mathematics 10th Edition, John Wiley & Sons, ISBN 978-0-470-45836-5

Lee GC, Ou YC, Liang Z, Niu T and Song J (2007) Principles and Performance of Roller Seismic Isolation Bearings for Highway Bridges, Technical Report MCEER-07-0019, ISSN 1520-295X, University at Buffalo, The State University of New York

Lin T and Hone C (1993) *Base isolation by free rolling rods under basement*, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 22, 261-273

Tsai MH, Chang KC and Wu SY (2006) *Seismic Isolation of a Scaled Bridge Model using Rolling-Type Bearings*, 4<sup>th</sup> International Conference on Earthquake Engineering, Taipei, Taiwan

Wang SJ, Hwang JS, Chang KC, Shiau CY, Lin WC, Tsai MS, Hong JX and Yang YH (2014) Sloped multi-roller isolation devices for seismic protection of equipment and facilities, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 43:1443–1461

