

## مقایسه رفتار سازه‌های جداسازی شده بر روی انواع جداگرهای اصطکاکی تحت زلزله‌های حوزه نزدیک

حامد تجملیان<sup>۱\*</sup>، رضامحمودی سرخونی<sup>۲</sup>

1-استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه یزد، یزد، ایران

2-کارشناسی ارشد، دانشگاه علم و هنر

### چکیده

در این مطالعه به مقایسه رفتار لرزه‌ای روسازه‌های جداسازی شده با انواع جداگرهای آونگی اصطکاکی تحت تاثیر رکوردهای زلزله حوزه نزدیک پرداخته شده است. جهت بررسی و مقایسه رفتار لرزه‌ای جداگرهای مختلف دو پارامتر مهم که در آیین نامه‌های طراحی مورد استفاده قرار می‌گیرد، یعنی زمان تناوب موثر و میرایی موثر به عنوان معیار اصلی در نظر گرفته شده و جداگرها به گونه‌ای طراحی شده‌اند که دارای پیوند جداسازی و میرایی موثر مشخص باشند تا بتوان پاسخ لرزه‌ای آن‌ها را مقایسه نمود. سازه‌ها به صورت خطی و سه‌بعدی دارای سه، شش و نه طبقه فلزی از نوع قاب خمشی و همچنین جداگرها از نوع آونگی اصطکاکی تکی، دوگانه و سه‌گانه بوده‌اند که به صورت غیرخطی در نرم افزار **SAP2000** مدل‌سازی شده‌اند با انجام تحلیل‌های تاریخچه زمانی بر روی مدل‌ها و با بررسی پاسخ‌های مختلف سازه از جمله حداکثر شتاب بام، برش پایه، جابجایی در تراز بالای جداگر و دریافت روسازه مشخص گردید سازه‌های جداسازی شده با جداگر آونگی اصطکاکی سه‌گانه نسبت به سازه‌های جداسازی شده با جداگرهای تکی و دوگانه موثرتر و بهتری خواهند داشت. این نتیجه نشان از توانایی این جداگر سه‌گانه در کنترل بهتر رفتار سازه به خاطر طولانی‌تر بودن منحنی سه خطی نرم شونده و همچنین رفتار سخت شونده در فازهای انتهایی حرکت دارد که با افزایش تعداد طبقات همچنان این خاصیت را حفظ نموده است. همچنین مقایسه عملکرد انواع جداگرهای طراحی شده حاکی از برتری جداگر آونگی اصطکاکی سه‌گانه نسبت به دو نوع دیگر در کنترل جابجایی تراز جداسازی، شتاب و دریافت روسازه بوده است.

کلمات کلیدی: جداگرهای اصطکاکی، زلزله حوزه نزدیک، دریافت سازه، شتاب بام، جابجایی جداگر، برش پایه

سابقه مقاله:

شناسه دیجیتال:

doi:	10.22065/jsce.2018.114655.1436	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
حامد تجملیان						
*نویسنده مسئول:						
پست الکترونیکی:						
h.tajammolian@yazd.ac.ir						

# Comparison of the behavior of isolated structures mounted on different types of friction isolators subjected to near-field earthquakes

Hamed Tajammolian<sup>1</sup> reza mahmoodi sarkhoni<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Assistant Professor, Faculty of Civil Engineering, Yazd University, Yazd, Iran

<sup>2</sup> MSc Graduate, University of Science and Arts of Yazd

## ABSTRACT

*In this study, seismic behavior of isolated structures supported on different types of friction pendulum bearings namely SFP, DCFP and TCFP subjected to seven records of near fault ground motion have been compared. To investigate the results of different isolators, they are designed in a way to have the same effective period and effective damping as two important parameters. Three-dimensional linear models of three, six and nine story steel moment frames supported on nonlinear FPS, DCFP and TCFP isolators are constructed in the SAP2000 software. By performing nonlinear dynamic analysis and investigating various structural responses such as maximum acceleration of the roof, isolators displacement, base shear and drift of the superstructure, it is showed that the isolation with the TCFP bearing are more efficient than isolation with DCFP and FPS ones. The main reason of this good behavior is five-regime backbone curve of this isolator in which the two last stages of the motion have hardening behavior. In addition, the comparison of the performance of the different isolators suggests the superiority of the TCFP bearing in controlling the displacement of the isolator, acceleration of the roof, and drift of the superstructure. The advantages of TCFP isolator are observed in all the studied superstructures with three, six and nine stories.*

## ARTICLE INFO

**Receive Date:** 14 January 2018

**Revise Date:** 05 April 2018

**Accept Date:** 04 May 2018

### Keywords:

*Friction pendulum isolators, Near-fault ground motion, drift of superstructure, Roof acceleration, Isolator displacement, Base shear*

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/jsce.2018.114655.1436

\*Corresponding author: Hamed Tajammolian

Email address: h.tajammolian@yazd.ac.ir

## ۱- مقدمه

روش مرسوم طراحی لرزه‌ای سازه‌ها مبتنی بر افزایش ظرفیت سازه است. در این رویکرد طراحی لرزه‌ای، ایجاد ظرفیت باربری جانبی در سازه، با افزایش مقاومت و تأمین شکل‌پذیری آن صورت می‌گیرد. در نتیجه اجرای این روش، ابعاد اعضای سازه‌ای و اتصالات افزایش یافته و در سازه، اعضای مهاربند جانبی همچون بادبند یا دیوار برشی یا سایر اعضای سخت‌کننده در نظر گرفته می‌شود. افزایش سختی سازه که جذب نیروی بیشتر ناشی از زلزله را به دنبال داشته موجب کاهش ارزش اقتصادی پروژه می‌گردد. همچنین پیشرفت دانش فنی و ضوابط و معیارهای طراحی و ارزیابی سازه‌ها باعث شده تا بسیاری از سازه‌های موجود طی ارزیابی‌های مجدد در حاشیه‌ی نامن قرار گیرند. جداسازی لرزه‌ای، با هدف کاستن آسیب لرزه‌ای در طراحی و ساخت سازه‌ها و بهسازی لرزه‌ای پیشنهاد می‌گردد. با استفاده از این روش، رفتار دینامیکی سازه در حد امکان، در محدوده‌ی از قبل پیش بینی شده قرار گرفته و میزان آسیب‌های لرزه‌ای به اجزای سازه‌ای و غیر سازه‌ای کاهش می‌یابد. در این روش، سازه از تکیه گاه‌های خود جدا گردیده و بر روی تکیه گاه‌هایی که قابلیت تغییرشکل جانبی زیادی دارند، قرار می‌گیرد. در این وضعیت در صورت وقوع زلزله، عمده تغییرشکل‌ها در تکیه گاه رخ داده و سازه مانند جسم صلب با تغییرشکل‌های کوچکی ارتعاش می‌کند. همچنین با استفاده از این تکنیک در بهسازی لرزه‌ای سازه‌ها، بجای افزایش ظرفیت باربری سازه تحت نیروهای جانبی، می‌توان نیروهای وارد بر آن را کاهش داد [۱].

مطابق نتایج تحلیلی و آزمایشگاهی، سامانه‌های سازه‌ای مجهز به این فناوری پاسخ لرزه‌ای کمتری نسبت به سازه‌های معمول خواهند داشت. از آنجایی که این کاهش خرابی باعث افزایش قابلیت بهره‌برداری بی‌وقفه سازه در هنگام وقوع زمین لرزه‌های شدید می‌شود، استفاده از سیستم جداساز لرزه‌ای کاربرد فراوانی در سازه‌هایی که کاربری آنها پس از زلزله اهمیت زیادی دارد یافته است. علیرغم وجود انواع مختلفی از جداسازهای لرزه‌ای که تاکنون پیشنهاد شده است می‌توان آنها را به دو دسته الاستومری و اصطکاکی تقسیم نمود. جداگرهای آونگی اصطکاکی تکی ۱، آونگی اصطکاکی دو گانه ۲ و آونگی اصطکاکی سه گانه ۳ از انواع جداگرهای اصطکاکی می‌باشد [۲].

سیستم اصطکاکی-پاندولی FPS یک سیستم اصطکاکی می‌باشد که رفتار اصطکاکی و بازگرداندگی را به واسطه‌ی هندسه‌ی خود با هم ترکیب نموده است. در این سیستم از بالا رفتن لغزنده در سطح لغزشی کروی شکل برای ایجاد نیروی برگردان و از اصطکاک بین لغزنده و سطح لغزشی جهت استهلاک انرژی زلزله استفاده می‌شود. در شکل ۱.a برشی از یک جداگر تک قوسی ارائه شده است. در این جداگر حرکت لغزنده فقط بر روی یک سطح اصطکاکی انجام شده و دارای منحنی هیسترسیس دو خطی می‌باشد [۲، ۳]. همان طور که در شکل ۱.b دیده می‌شود جداگرهای لرزه‌ای پاندول اصطکاکی دو قوسی یا DCFP شامل دو سطح مقعر از جنس فولاد ضد زنگ می‌باشد که توسط یک لغزنده مفصلی از هم جدا شده‌اند. صفحات بالایی و پایینی دارای شعاع انحنا  $R_1$  و  $R_2$  می‌باشند و ضرایب اصطکاکی این صفحات را با  $\mu_1$  و  $\mu_2$  نشان می‌دهیم. با توجه به انتخاب ضرایب اصطکاک دو سطح، جداگر می‌تواند رفتار دو خطی مانند FPS یا سه خطی

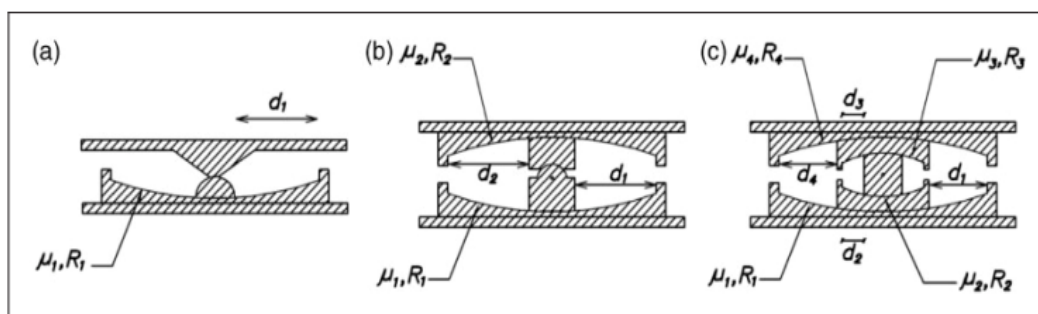
داشته باشد. ظرفیت جابجایی اسمی هر کدام از سطوح بالایی و پایینی به ترتیب  $d_1$  و  $d_2$  می‌باشد که باعث ایجاد ظرفیت جابجایی اسمی  $d_1 + d_2$  برای کل سیستم می‌شود [۲، ۳]. یکی از جدیدترین انواع جداگرهای اصطکاکی، جداگر پاندولی اصطکاکی سه قوسی نامیده می‌شود. جداگر TCFP که مقطع آن در شکل ۱.c قابل مشاهده است از دو صفحه مقعر قرار گرفته در مقابل هم تشکیل شده است. این دو صفحه توسط یک مجموعه لغزنده که در میان آنها قرار گرفته از هم جدا شده است. مجموعه مذکور خود متشکل از دو صفحه لغزنده و یک جسم صلب نوسان کننده در میان آنهاست. از آنجا که لغزنده میانی تقریباً صلب است، مجموعه میانی می‌تواند بچرخد تا چرخش‌های دیفرانسیلی صفحات بالا و پایین را تحمل کند. سطح تماس هر یک از صفحات با صفحه دیگر با یک ماده غیر فلزی پوشانده می‌شود و با تنظیم دقیق شعاع مؤثر و ضرایب اصطکاک صفحات می‌توان انتظار رفتاری ۵ خطی را از این جداگر داشت. این رفتار که با رژیم‌های حرکتی

<sup>1</sup> Friction Pendulum System (FPS)

<sup>2</sup> Double Concave Friction Pendulum (DCFP)

<sup>3</sup> Triple Concave Friction Pendulum (TCFP)

۱ تا ۵ مشخص می‌گردد، در سه فاز اول بصورت نرم شونده و در فازهای چهارم و پنجم بصورت سخت شونده است. بنابراین می‌توان از این جداگر توقع تغییر مکان کمتر نسبت به انواع دیگر جداگرهای اصطکاکی در زلزله‌های با سطوح خطر بالاتر را انتظار داشت [۲، ۳].



شکل ۱: برشی از جداگرهای اصطکاکی (a) FPS، (b) DCFP، (c) TCFP [۴]

جداسازهای اصطکاکی آونگی از خصوصیت آونگی برای افزایش دوره تناوب سازه و جلوگیری از تشدید نیروهای زلزله استفاده می‌کنند. دوره تناوب این جداساز به سادگی با انتخاب شعاع انحنا سطح مقطع بدست می‌آید و مستقل از جرم است. همچنین در جداسازهای اصطکاکی ضریب اصطکاک مناسب عامل کنترل نیروی انتقالی به روسازه و همچنین کنترل تغییر مکان جانبی سازه خواهد بود.

هدف آیین‌نامه‌ها از طراحی جداساز لرزه‌ای، تضمین مقاومت سازه فوقانی در برابر برش انتقالی ناشی از زلزله طرح<sup>۴</sup> (DE) و همچنین ظرفیت مناسب جابجایی برای تأمین نیاز بیشترین سطح زلزله<sup>۵</sup> (MCE) می‌باشد که حصول هم زمان آنها در جداسازهای لرزه‌ای غیر تطبیق پذیر، امکان پذیر نمی‌باشد. در حقیقت، کاهش میزان جابجایی ناشی از زلزله MCE با افزایش سختی و میرایی قابل دستیابی است که این خود باعث افزایش سطح شتاب و کاهش عملکرد بهینه در شرایط زلزله DE می‌شود و بالعکس. در این شرایط، تأمین هم زمان هر دو هدف با توجه به ملزومات آیین‌نامه‌ای در مورد این دو سطح از زلزله، دشوارتر هم می‌شود. جداگرهای لرزه‌ای پاندولی اصطکاکی سه‌گانه راه حلی برای مشکلات مورد اشاره می‌باشند، به طوری که رفتار تطبیقی آنها باعث می‌شود تا سیستم جداساز تحت شدت‌های مختلف زلزله بهینه‌ترین رفتار را ارائه دهند. به این صورت که در برابر زلزله‌های کوچک بسیار سخت بوده و میرایی کمی از خود نشان دهد و در برابر زلزله‌های طرح کمی نرم و با میرایی بیشتر و در زلزله‌های ماکزیمم کاملاً سخت و با میرایی زیادتر عکس العمل نشان دهد [۴].

## ۲- طراحی جداگر و روسازه

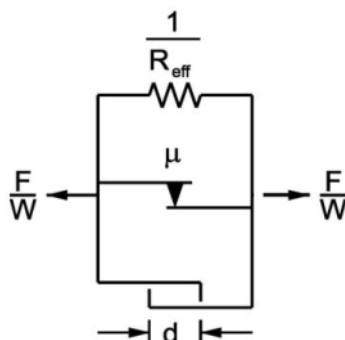
در این مطالعه مدلسازی روسازه به صورت خطی انجام شده و جداگر FPS نیز با استفاده از المان مربوط که در برنامه به صورت پیش فرض وجود دارد مدل شده است. برای مدل سازی جداگر TCFP و DCFP دو رویکرد در مدل سازی می‌تواند مورد بررسی قرار گیرد. روش اول این است که مدل سازی بر اساس روابط حاکم بر منحنی هیستریسیس انجام گیرد. روش دوم که بر اساس تحقیقات فنز و کنستانتینو [۵] قرار دارد، این است که رفتار این جداگر توسط ترکیبی از المان‌های ساده‌تر، به شکلی که از ترکیب آنها رفتار مورد نظر حاصل شود، مدل سازی گردد. در این پژوهش رفتار این جداگرها با توجه به روش المان‌های سری ارائه شده توسط فنز و کنستانتینو، توسط دو جداگر تک‌قوسی و سه‌جداگر تک‌قوسی سری شده برای جداگر DCFP، TCFP و به همراه تعدادی المان گپ مدل گردیده و پارامترهای این جداگرهای تک‌قوسی بر اساس مشخصات جداگرهای دوگانه و سه‌گانه بدست آمده‌اند [۵، ۶]. هر جداگر اصطکاکی تک قوسی (شکل ۲)، به صورت ترکیبی از سه جزء موازی تشکیل شده است که این اجزا عبارتند از [۷]:

- یک فنر خطی الاستیک برای ایجاد نیروی ناشی از انحنای سطوح
- یک المان اصطکاکی پلاستیک سخت با وابستگی ضریب اصطکاک به سرعت

<sup>4</sup> Design Earthquake

<sup>5</sup> Maximum Considered Earthquake

- یک المان فاصله برای محدود کردن میزان جابجایی هر یک از جداگرهای تک قوسی



شکل ۲: مدل تحلیلی برای جداگر FPS [۸]

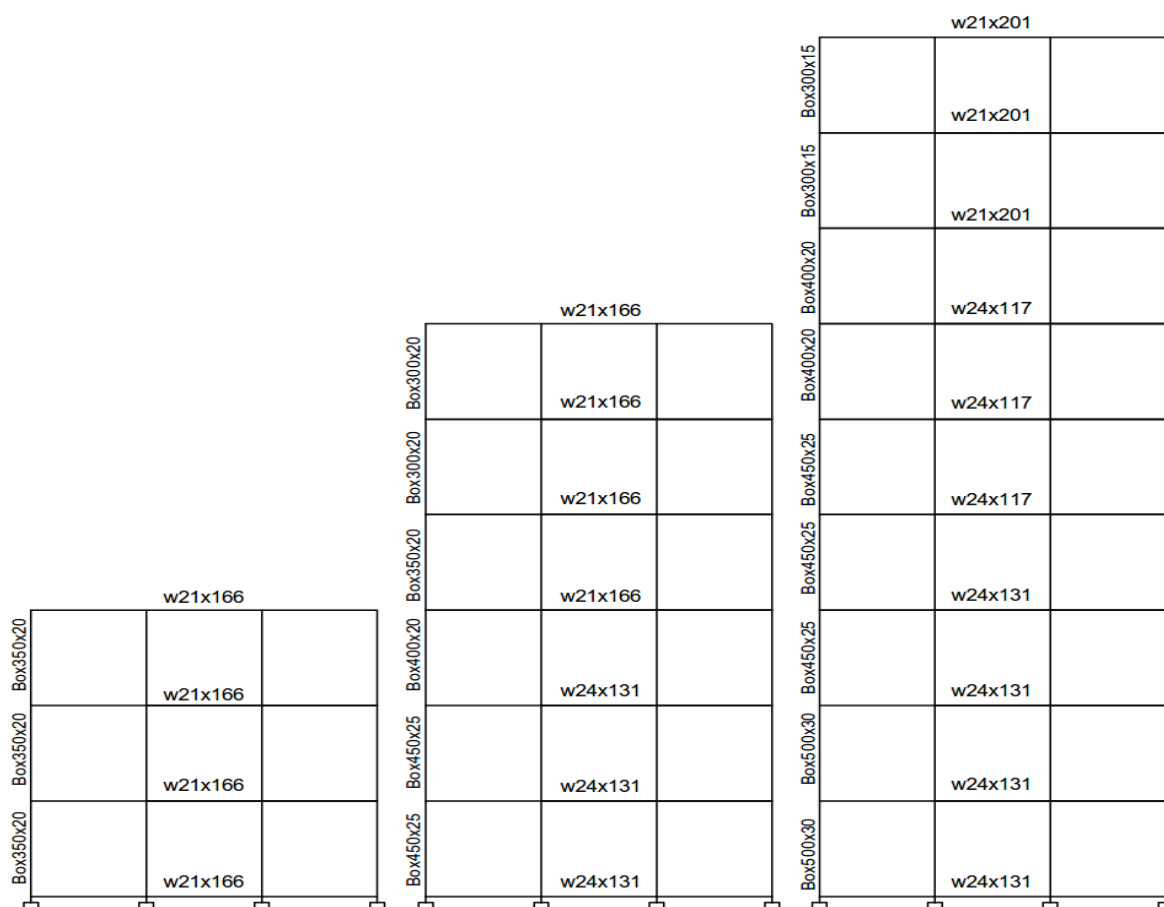
جهت بررسی و مقایسه رفتار لرزه‌ای جداگرهای مختلف ابتدا لازم است که با مبنای طراحی مشخصی، سه نوع جداگر DCFP، TCFP و FPS طراحی شده تا بتوان پس از آنالیز پاسخ‌ها، آن‌ها را مقایسه نمود. دو پارامتر مهم که برای طراحی جداگرها در آیین‌نامه‌های طراحی استفاده می‌شود شامل زمان تناوب موثر ( $T_{eff}$ ) و میرایی موثر ( $\xi_{eff}$ ) می‌باشد. در این بررسی این دو پارامتر به عنوان معیار اصلی طراحی در نظر گرفته شده است. در مطالعات بکر، کنستاننیتینو و فادی هم از این دو پارامتر برای طراحی و مقایسه استفاده گردیده است [۹، ۱۰]. زمان تناوب و میرایی موثر به ترتیب از روابط زیر بدست می‌آیند:

$$T_{eff} = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{W}{k_{eff} g}} \quad (1)$$

$$\xi_{eff} = \frac{1}{2} \left[ \frac{E_{loop}}{k_{eff} D_{Max}} \right] \quad (2)$$

که در روابط بالا  $k_{eff}$  سختی مؤثر،  $W$  نیروی قائم وارد بر جداگر،  $E_{loop}$  انرژی تلف شده در هر چرخه منحنی هیسترسیس و  $D_{max}$  ماکزیمم جابجایی جداگر در سطح مورد نظر خواهد بود [۱۱]. در این پژوهش مقایسه در سطح MCE انجام شده است تا تفاوت عملکرد جداگرهای مختلف در بیشترین سطح زلزله مشخص گردد. بنابراین با در نظر گرفتن مقدار جابجایی مناسب در سطح زلزله MCE مقدار پارامتر سختی مؤثر و میرایی مؤثر قابل محاسبه خواهد بود. روابط کاملتر برای محاسبه این دو خصوصیت در جداگرهای اصطکاکی مختلف در مرجع [۳] قابل دسترسی است.

روسازه مورد مطالعه در این تحقیق دارای پلان مربعی با سه دهانه در هر طرف بوده است. ابعاد تمامی دهانه‌های پلان در دو طرف ۶ متر و ارتفاع هر طبقه ۳/۲۰ متر در نظر گرفته شده است. برای پوشش دادن محدوده نسبتاً وسیعی از روسازه‌ها سه روسازه با پلان مربعی ۱۸×۱۸ متر و تعداد طبقات سه، شش و نه طبقه به ارتفاع ۹/۶، ۱۹/۲ و ۲۸/۸ طراحی گردیده است. طراحی روسازه فلزی از نوع قاب خمشی ویژه و بر مبنای آیین‌نامه AISC 360-05 صورت گرفته است [۱۲]. مقاطع مورد استفاده برای تیرها از مقاطع W استاندارد و مقاطع ستون‌ها از باکس فلزی انتخاب گردیده است. برای سهولت مدل‌سازی و مقایسه مدل‌ها در هر طبقه تنها یک نوع مقطع تیر و ستون استفاده شده است. مقاطع اختصاص یافته به قاب‌های روسازه‌ها با تعداد طبقات سه، شش و نه طبقه در شکل ۳ مشاهده می‌گردد. از آنجا که قاب‌های مورد نظر از نوع خمشی ویژه بوده‌اند، ضوابط لرزه‌ای استاندارد AISC 341-10 نیز در طراحی آن‌ها لحاظ شده است [۱۳].



شکل ۳: مقاطع طراحی شده برای قاب‌ها سه، شش و نه طبقه

بارگذاری روسازه فولادی با فرض پای ثابت و مطابق آیین‌نامه ASCE 7-2010 انجام شده است. مقدار بار مرده و زنده کف‌ها به ترتیب ۸۰۰ و ۴۰۰ کیلوگرم بر مترمربع در نظر گرفته شده و بصورت مساوی بین گره‌های هر طبقه توزیع شده است. بار زلزله نیز به روش استاتیکی معادل همین آیین‌نامه محاسبه برای انجام تحلیل دینامیکی از نرم افزار SAP2000 استفاده شده است. برای انجام طراحی جداگرها و همچنین برش پایه طراحی روسازه از روابط فصل ۱۷ آیین‌نامه ASCE 7-10 استفاده شده است. از آنجایی که جداگرهای مورد استفاده همگی دارای زمان تناوب بیش از ۳ ثانیه هستند و روسازه‌های طراحی شده دارای ۳ و ۶ و ۹ طبقه‌اند، مطابق ضوابط آیین‌نامه استفاده از روش استاتیکی معادل در طراحی جداگرها قابل قبول نیست؛ بنابراین پس از طراحی اولیه جداگرها به روش استاتیکی معادل تمامی ضوابط تحلیل طیفی این آیین‌نامه کنترل گردیده است. برای استفاده از پارامترهای طراحی آیین‌نامه ASCE فرض شده ساختگاه قرارگیری سازه دارای  $T_L=8s$ ,  $S_s=1.5g$ ,  $S_1=0.6g$  و خاک نوع D بوده است [۱۴].

لازم بذکر است با توجه به محاسبات آیین‌نامه‌ای صورت گرفته ظرفیت تغییرمکان جداگرها برابر با ۹۰۰ میلیمتر در نظر گرفته شده است. برای پوشش طیف وسیعی از جداگرها در این پژوهش، زمان تناوب موثر جداگرها در جابجایی حداکثر برابر با ۳، ۴ و ۵ ثانیه و میرایی موثر برابر با ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ درصد انتخاب شده است.

در این مطالعه از ۷ رکورد زمین لرزه که مشخصات آن‌ها در جدول ۱ آورده شده استفاده گردیده است. از آنجا که جداگرهای اصطکاکی بخصوص در نوع TCFP به گونه‌ای طراحی شده‌اند که در زلزله‌های سطوح سرویس، طراحی و حداکثر متحمل کارایی داشته باشند؛ باید رکوردها را به گونه‌ای انتخاب نمود که پاسخ سازه در سطوح بالا را نیز در پی داشته باشد و از این طریق بتوان از حداکثر قابلیت جداگر استفاده نمود. بدین منظور در این مطالعه تصمیم گرفته شد تا تمامی رکوردها از نوع حوزه نزدیک انتخاب شوند.

رکوردهای حوزه نزدیک دارای مشخصات ویژه‌ای هستند که آن‌ها را از رکورد حوزه دور متمایز می‌سازد. محتوای فرکانسی بالا و پالس‌های سرعت با زمان تناوب زیاد دو مشخصه مهم این رکوردها هستند. مطالعات تجملیان [۲] نشان می‌دهد که رکوردهای حوزه نزدیک پاسخ‌های تغییر مکان بزرگتری را در جداگرهای TCFP نسبت به رکوردهای حوزه دور ایجاد می‌کند، حال آنکه نتیجه استفاده از این دو رکورد در بدست آوردن شتاب بام روسازه تقریباً یکسان است. از آنجایی که طراحی جداگرها مطابق آیین نامه ASCE 7 برای سطح MCE صورت می‌گیرد، رکوردهای انتخاب شده نیز برای همین سطح مطابق دستور العمل ASCE 7-10 مقیاس شده‌اند [۱۴]. تمامی رکوردهای مورد استفاده در این مطالعه از سایت PEER استخراج شده‌اند [۱۵].

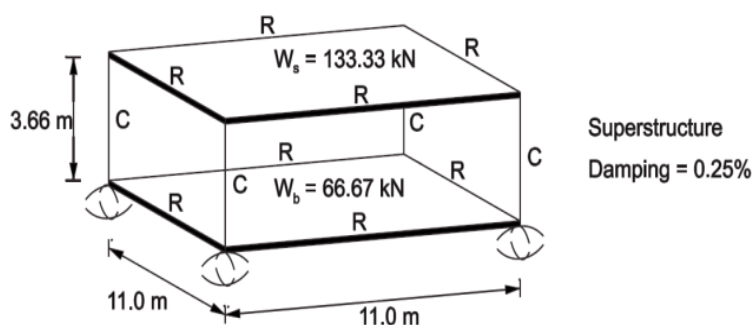
جدول ۱: رکوردهای زلزله حوزه نزدیک مورد استفاده در این مطالعه [۱۵]

No.	Record	Station	Soil Type	Epicentral (km)	PGA (g)	PGV (cm/s)
1	Cape Mendocino	Petrolia	C	4.5	0.662	82.1
2	Duzce	Duzce	D	1.6	0.535	83.5
3	Imperial Valley-06	Elcentro#7	D	27.6	0.463	108.8
4	Kobe	Takatori	D	13.1	0.616	169.6
5	Landers	Lucerne	C	44.0	0.789	140.3
6	Loma Prieta	Saratoga	C	27.2	0.512	55.6
7	Northridge-01	Sylmar-Olive view	C	16.8	0.843	122.7

لازم به ذکر است برای افزایش دقت مدل‌سازی و جلوگیری از مشکلات مربوط به ناپایداری مدل جداگرهای ترکیبی در SAP2000، روسازه بصورت کامل سه‌بعدی مدل گردیده است هرچند زلزله‌های مورد نظر به صورت تک‌بعدی و در جهت طولی به سازه وارد شده‌اند [۱۶].

### ۳- صحت مدل ساخته شده در نرم افزار SAP2000

برای بررسی صحت مدل سازی با المان‌های سری در برنامه SAP2000، مدل بررسی شده توسط فنز و کنستانتینو که بر روی جداگرهای TCFP قرار داشته با مشخصات داده شده در مقاله مربوطه ساخته شده است. این مدل سازه‌ای یک طبقه با وزن روسازه 133.34 KN، وزن دال کف 66.67 KN، پی‌یود روسازه 0.2 Sec و میرایی روسازه 0.25٪ بوده است (شکل ۴) [۶]. مشخصات جداگرهای مورد استفاده در این مطالعه در جدول ۲ نشان داده شده است. پارامترهای بکار رفته در این جدول یعنی  $\mu$ ،  $\mu_{Reff}$  و  $d$  به ترتیب شعاع موثر، ضریب اصطکاک و ظرفیت تغییر مکان سطوح مختلف جداگر TCFP هستند که در شکل ۱ نمایش داده شده است. پارامتر  $a$  نیز ضریبی است که نرخ تغییرات ضریب اصطکاک بر حسب سرعت لغزش را کنترل می‌کند. در قسمت دوم جدول ۲ نیز پارامترهای مربوط به مدل سری معادل در SAP2000 نشان داده شده که ارتباط آنها با مدل اصلی در مرجع [۷] قابل دسترسی است. لازم بذکر است در مدل ارائه شده توسط فنز و کنستانتینو [۵] دو سطح داخلی جداگر TCFP یعنی سطوح ۲ و ۳ با یک المان (FPS) المان (۱) مدل شده و سطوح خارجی ۱ و ۴ توسط المان‌های ۲ و ۳ نمایندگی می‌شوند.



Section Property	Area (mm <sup>2</sup> )	Moments of Inertia (mm <sup>4</sup> )	Torsion Constant (mm <sup>4</sup> )	Shear Area (mm <sup>2</sup> )	Mass (kg)	Weight (kN)
"Column" (C)	$5.0 \times 10^6$	$6.851 \times 10^7$	$1.0 \times 10^8$	$5.0 \times 10^6$	0	0
"Rigid" (R)	$5.0 \times 10^6$	$1.0 \times 10^{11}$	$1.0 \times 10^8$	$5.0 \times 10^6$	0	0

شکل ۴: مشخصات مدل فنز و کنستانتینو [۶]

جدول ۲: مشخصات جداگرهای TCFP و المانهای سری معادل آن در SAP2000 [۶]

## مشخصات واقعی جداگرهای TCFP

Surface 1	$R_{eff1} = 435 \text{ mm}$	$\mu_1 = 0.02 - 0.04$	$d_1 = 64 \text{ mm}$	$a_1 = 0.1 \text{ sec/mm}$
Surface 2	$R_{eff2} = 53 \text{ mm}$	$\mu_2 = 0.01 - 0.02$	$d_2 = 19 \text{ mm}$	$a_2 = 0.1 \text{ sec/mm}$
Surface 3	$R_{eff3} = 53 \text{ mm}$	$\mu_3 = 0.01 - 0.02$	$d_3 = 19 \text{ mm}$	$a_3 = 0.1 \text{ sec/mm}$
Surface 4	$R_{eff4} = 435 \text{ mm}$	$\mu_4 = 0.06 - 0.13$	$d_4 = 64 \text{ mm}$	$a_4 = 0.1 \text{ sec/mm}$

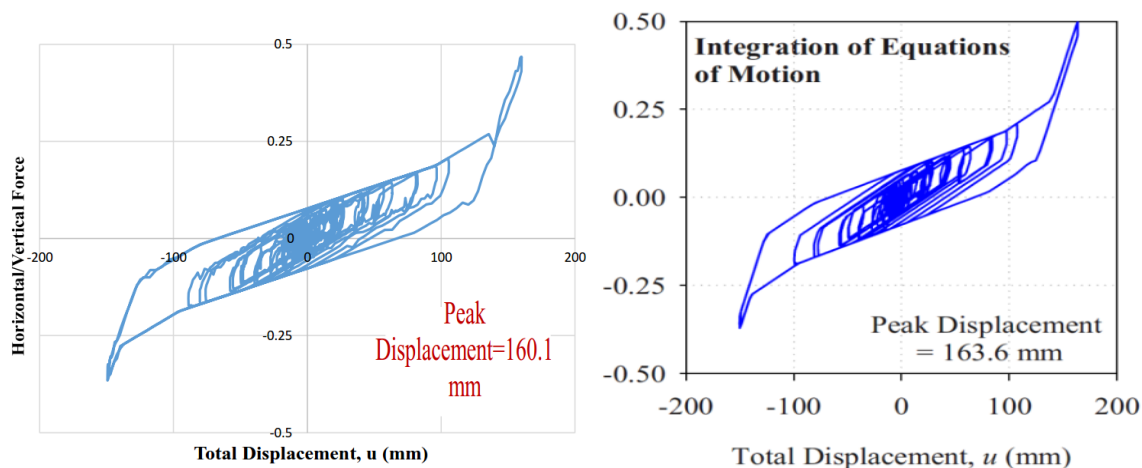
## مشخصات المانهای سری معادل در SAP2000

Element 1	$\bar{R}_{eff1} = 106 \text{ mm}$	$\bar{\mu}_1 = 0.01 - 0.02$	$\bar{d}_1 = -$	$\bar{a}_1 = 0.05 \text{ sec/mm}$
Element 2	$\bar{R}_{eff2} = 382 \text{ mm}$	$\bar{\mu}_2 = 0.04 - 0.04$	$\bar{d}_2 = 56.2 \text{ mm}$	$\bar{a}_2 = 0.11 \text{ sec/mm}$
Element 3	$\bar{R}_{eff3} = 382 \text{ mm}$	$\bar{\mu}_3 = 0.06 - 0.13$	$\bar{d}_3 = 56.2 \text{ mm}$	$\bar{a}_3 = 0.11 \text{ sec/mm}$

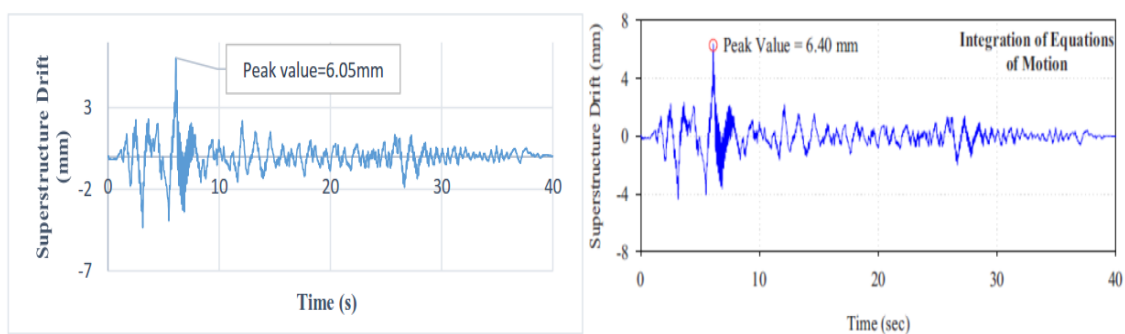
سازه مورد نظر تحت رکورد زلزله ۱۸۰ درجه ال سنترو سال ۱۹۴۰ با  $PGA=0.3g$  آنالیز تاریخیچه زمانی شده است. ضریب مقیاس زلزله برای اینکه جداگر تمامی فازهای حرکت را دارا باشد  $2/15$  انتخاب شده و لازم به ذکر است در این مقاله فقط آنالیز تحت مؤلفه افقی نیروی زلزله انجام شده است. منحنی هیسترسیس، منحنی تاریخیچه زمانی دریافت و شتاب این سازه به نقل از مقاله فنز و



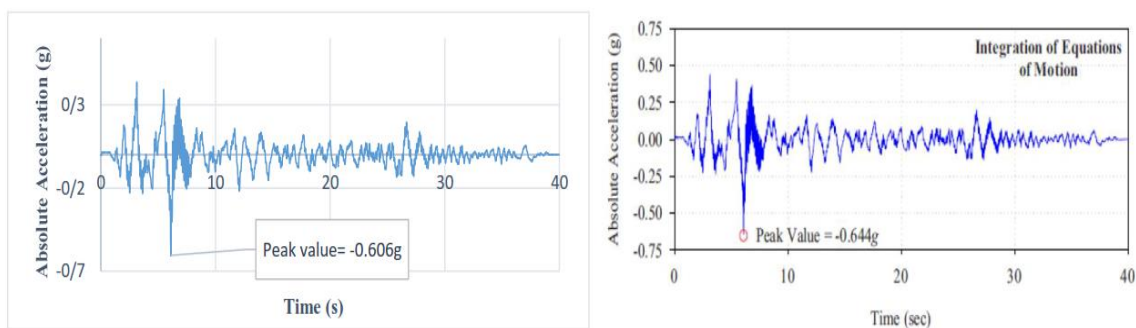
کنستانتینو که با انتگرال گیری عددی معادلات حرکت بدست آمده، همچنین نمودارهای مشابه بدست آمده در این مطالعه در شکل های ۵، ۶ و ۷ نشان داده شده است [۶].



شکل ۵: مقایسه منحنی هیستریسیس بدست آمده از برنامه SAP2000 (سمت چپ) و مقاله فنز و کنستانتینو (سمت راست [۶])



شکل ۶: مقایسه تاریخچه زمانی دررفت روسازه دارای جداگر TCFP از برنامه SAP2000 (سمت چپ) و مقاله فنز و کنستانتینو (سمت راست [۶])



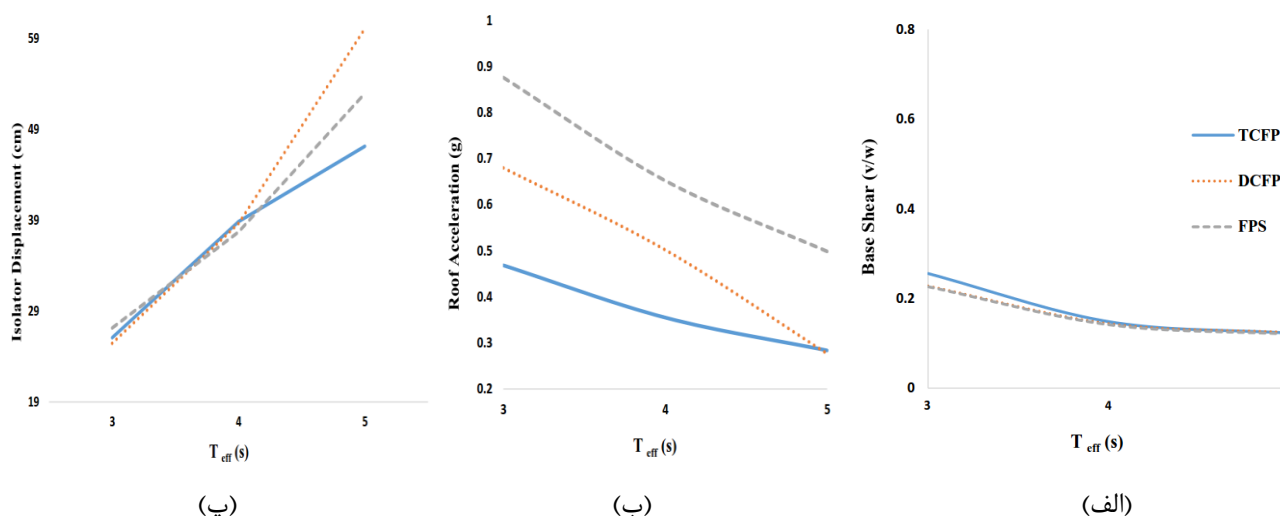
شکل ۷: مقایسه تاریخچه زمانی شتاب روسازه دارای جداگر TCFP از برنامه SAP2000 (سمت چپ) و مقاله فنز و کنستانتینو (سمت راست [۶])

مقایسه نمودارهای ارائه شده در مقاله فنز و کنستانتینو با نمودارهای مدل ساخته شده در این پژوهش نشانگر آن است که مدل سازی سری جداگر TCFP در نرم افزار SAP2000 از دقت کافی برای انجام تحلیل های مورد نظر برخوردار است. حداکثر اختلاف موجود بین نمودارهای مقایسه شده ۲/۱۴ درصد در نمودار مربوط به رفتار هیستریسیس بوده است. با توجه به اینکه مدل سازی جداگرهای DCFP و FPS ساده تر از مدل سازی TCFP بوده، برای جلوگیری از طولانی شدن بحث از ارائه نتایج صحت سنجی مدل آن ها خودداری شده است.

#### ۴- ارائه نتایج:

#### ۴-۱- تاثیر دوره تناوب سازه بر جابجایی، برش پایه و شتاب بام

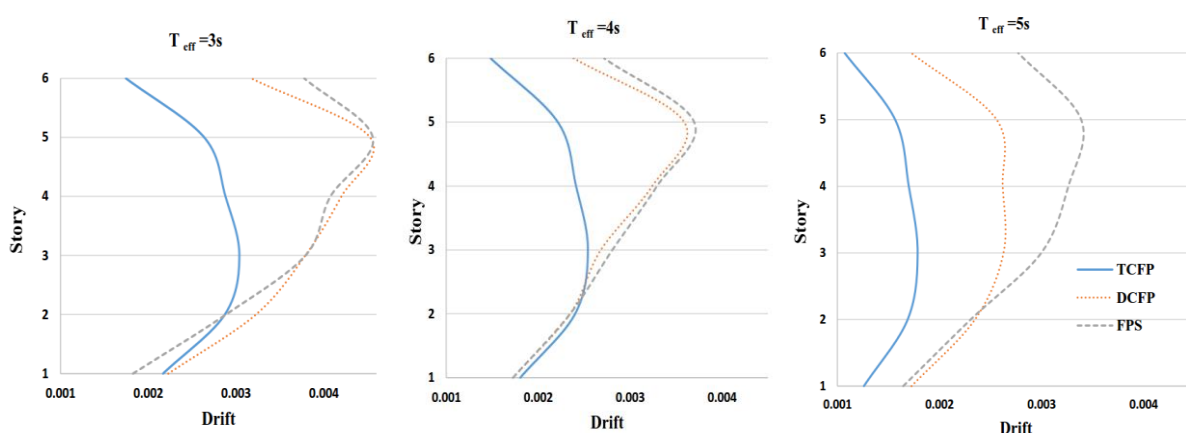
در نمودارهای نشان داده شده در شکل ۸ میانگین پاسخ های بدست آمده برش پایه نرمال شده (برش پایه / وزن سازه)، جابجایی در تراز بالای جداگر و شتاب بام سازه تحت هفت رکورد زلزله جدول ۱ برای زمان تناوب های موثر مختلف جداساز ترسیم شده است. با توجه به نمودار برش پایه (شکل ۸-الف) می توان نتیجه گرفت با افزایش دوره تناوب جداگر از ۳ ثانیه به ۵ ثانیه سازه رفتار نرم تری پیدا کرده و برش پایه کاهش می یابد. در این نمودار رفتار سه جداگر از لحاظ برش پایه تقریباً بر یکدیگر منطبق شده است. بر اساس نمودار شکل ۸-ب میانگین پاسخ های بدست آمده شتاب بام با افزایش دوره تناوب رو به کاهش بوده که جداگر سه قوسی نسبت به دیگر جداگرها رفتاری بهتری در کنترل شتاب از خود به نمایش در آورده است. برعکس این موضوع جداگر تک قوسی رفتاری نامطلوب داشته و میزان شتاب بام در آن نسبت به سازه هایی که دارای جداگر TCFP و DCFP بوده بسیار بیشتر است. بر اساس نمودار نشان داده شده در شکل ۸-پ برای پاسخ های بدست آمده جابجایی در تراز بالای جداگر مشاهده خواهیم کرد که با افزایش دوره تناوب جابجایی بیشتر شده که با توجه به نرم تر شدن رفتار جداگر طبیعی است. همچنین جابجایی جداگر TCFP در زمان تناوب های بالاتر کمتر از جداگر DCFP و FPS بوده که نشان از توانایی این جداگر در کنترل بهتر رفتار سازه به خاطر طولانی تر بودن منحنی سه خطی نرم شونده آن و همچنین رفتار سخت شونده آن در فازهای انتهایی حرکت دارد. به بیان دیگر همانطور که مشاهده می شود با افزایش پریمود موثر جداساز میزان فاصله پاسخ ها بیشتر شده و تاثیر استفاده از جداگر سه قوسی بیشتر خواهد شد. دلیل تاثیر بیشتر عملکرد TCFP در زمان تناوب های بالاتر این است که با افزایش  $(T_{eff})$  میزان  $(K_{eff})$  کاهش می یابد، یا به عبارتی دیگر منحنی نیرو-تغییر مکان خوابیده تر خواهد شد. در نتیجه با داشتن میرایی موثر یا سطح زیر منحنی یکسان، تفاوت ناشی از معادل سازی رفتار پنج خطی جداگر TCFP با رفتار دو خطی و سه خطی جداگرهای DCFP، FPS بیشتر مشخص می گردد. این موضوع در مطالعات لقمان و همکاران نیز مورد اشاره قرار گرفته است. در آن مطالعه که برای سازه های یک درجه آزادی و جداگرهای با میرایی ۱۰ درصد انجام شده بوده نشان داده اند که در جداگر TCFP با زمان تناوب مشخص، جابجایی به میزان ۱۳،۴٪ و برش پایه به مقدار ۲۶،۸٪ کمتر از جداگرهای DCFP و FPS با همان زمان تناوب است [۱۷].



شکل ۸: نمودار تاثیر دوره تناوب سازه بر (الف) برش پایه، (ب) شتاب بام و (پ) جابجایی در تراز بالای جداگر

#### ۲-۴- تاثیر زمان تناوب جداگر بر دریفت سازه

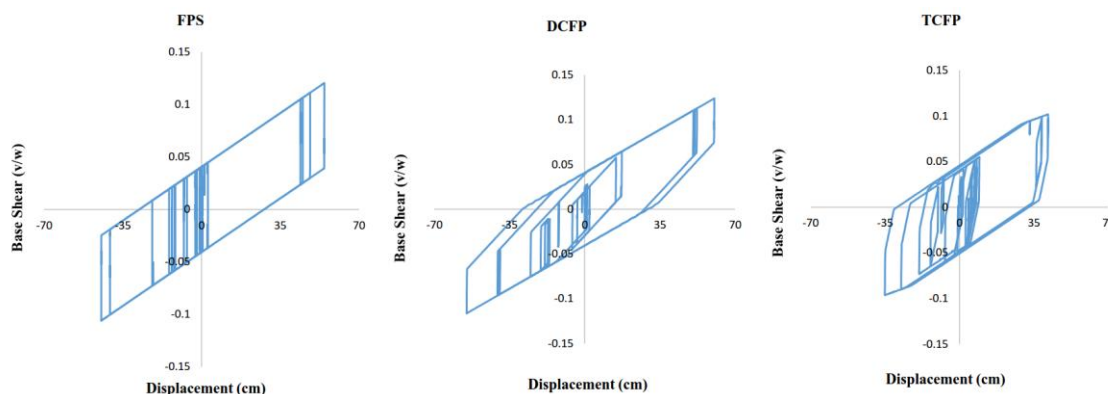
در نمودارهای شکل ۹ دریفت طبقات سازه تحت رکورد زلزله Cape Mendocino برای زمان تناوب‌های موثر مختلف ترسیم شده است. نتایج نشان داده شده در این شکل برای جداگرهای با دوره تناوب ۳، ۴ و ۵ ثانیه و میرایی ۱۵٪ بوده است. لازم به توضیح است که روند مشاهده شده در این نمودار در سایر رکوردهای زلزله جدول ۱ نیز بصورت تقریباً مشابه دیده شده بنابراین فقط به ارائه نتایج یک زلزله بسنده شده است. با توجه به نمودارهای دریفت طبقات روسازه می‌توان دریافت که با کاهش دوره تناوب مؤثر جداساز میزان دریفت طبقات بیشتر می‌شود که دلیل آن این است که با کاهش دوره تناوب مؤثر جداگر رفتار آن سخت‌تر شده و در جداگرهای سخت‌تر، جذب نیروی زلزله یا به عبارتی برش پایه بیشتر بوده، بنابراین دریفت سازه بیشتر است با توجه به نمودارهای دریفت سازه شش طبقه با انواع جداگرها نشان داده شده که ایزولاتور TCFP نسبت به دو ایزولاتور DCFP و FPS رفتار بهتری از خود نشان داده است. به عنوان نمونه در مدل با جداگر دارای زمان تناوب ۵ ثانیه در طبقه پنجم حداکثر دریفت سازه واقع بر روی جداگر FPS، DCFP و TCFP به ترتیب ۰/۰۰۳۳، ۰/۰۰۲۵ و ۰/۰۰۱۵ بوده است.



شکل ۹: دریفت طبقات سازه در زلزله Cape Mendocino برای روسازه شش طبقه قرار گرفته بر روی جداگرهای مختلف

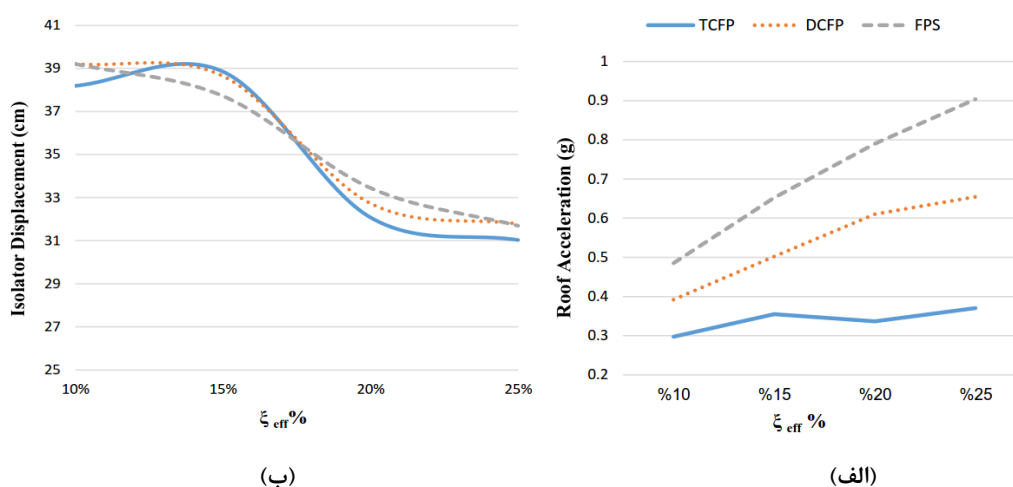
#### ۳-۴- تاثیر میرایی موثر جداگر بر رفتار سازه

میرایی موثر ( $\xi_{eff}$ ) نسبت مستقیم با  $E_{loop}$  یا سطح زیر منحنی هیستریسیس جداگر دارد، بنابراین با افزایش میرایی موثر، سطح زیر منحنی هیستریسیس افزایش خواهد یافت و در نتیجه با داشتن سطح قابل توجه منحنی هیستریسیس تفاوت ناشی از معادل سازی رفتار پنج خطی جداگر TCFP با رفتار دو خطی یا سه خطی جداگرهای FPS و DCFP کمتر مشاهده خواهد شد. اما هر چه که میرایی موثر کمتر باشد، با داشتن سطح کمتر منحنی هیستریسیس تفاوت رفتاری جداگر TCFP با جداگرهای FPS و DCFP مشخص‌تر و تاثیرگذارتر خواهد بود یا به عبارتی دیگر تاثیر تعداد شکست‌های منحنی رفتار لرزه‌ای بیشتر مشاهده می‌شود. به عنوان نمونه منحنی‌های هیستریسیس برای سازه شش طبقه با جداگرهای مختلف و دوره تناوب ۵ ثانیه و میرایی ۱۵٪ تحت تأثیر زلزله Duzce در شکل ۱۰ ارائه شده است. این شکل‌ها نشان می‌دهد که نمودار هیستریسیس FPS در طول گسترش یافته ولی نمودار TCFP نموداری پهن‌تر و چاق‌تری است و چون میرایی یا به عبارتی سطح زیر منحنی آن‌ها یکسان فرض شده است، بنابراین به دلیل گسترش در ارتفاع، طول کمتری خواهد داشت و همین نکته، دلیل بر جابجایی کمتر جداگرهای TCFP خواهد بود.



شکل ۱۰: نمودار هیسترسیس جداگرهای مختلف با دوره تناوب ۵ ثانیه و میرایی ۱۵٪ در زلزله Duzce

در شکل ۱۱ نمودار میانگین پاسخهای بدست آمده شتاب بام و جابجایی جداگر تحت هفت رکورد زلزله برای جداگرهای با دوره تناوب ۴ ثانیه و میرایی ۱۰٪ تا ۲۵٪ ارائه شده است. با توجه به نمودار شکل ۱۱-الف با ثابت بودن دوره تناوب جداگرها، نمودار شتاب بام سازه جداسازی شده با جداگر TCFP در تمام مقادیر میرایی در سطح پایین تری نسبت به دو جداگر دیگر قرار داشته و با افزایش میرایی جداگر از ۱۰٪ تا ۲۵٪ به میزان حدود ۱۰٪ افزایش شتاب وجود خواهد داشت. در مورد دو جداگر FPS، DCFP این افزایش چشمگیرتر بوده و در جداگر FPS به ۸۰٪ می‌رسد. در شکل ۱۱-ب که جابجایی سازه با جداگرهای مختلف را نشان می‌دهد، جابجایی برای جداگرهای FPS، DCFP و TCFP نزدیک به هم بوده ولی با افزایش میرایی در هر سه نوع جداگر شاهد کاهش تغییر مکان خواهیم بود.



شکل ۱۱: تاثیر میرایی موثر بر (الف) شتاب بام و (ب) جابجایی در تراز بالای جداگر

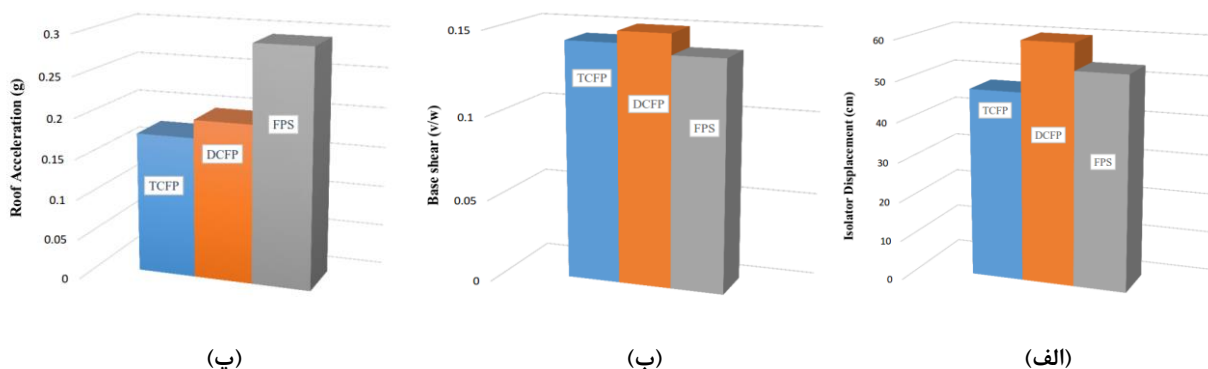
#### ۴-۴- نتایج مربوط به سازه سه طبقه

در نمودارهای میله‌ای نشان داده شده در شکل ۱۲ به ترتیب میانگین حداکثر پاسخهای بدست آمده برش پایه نرمال شده، جابجایی در تراز بالای جداگر و شتاب بام روسازه تحت هفت رکورد زلزله ترسیم شده است. با توجه به این نمودار برش پایه دو جداگر TCFP، FPS و DCFP با دوره تناوب جداگر ۵ ثانیه و میرایی ۱۵٪ تقریباً بر هم منطبق می‌باشند (شکل ۱۲-الف). با توجه به نمودار شکل ۱۲-ب در تراز جداسازی روسازه سه طبقه جداسازی شده با جداگر TCFP جابجایی کمتری نسبت به سازه جداسازی شده با

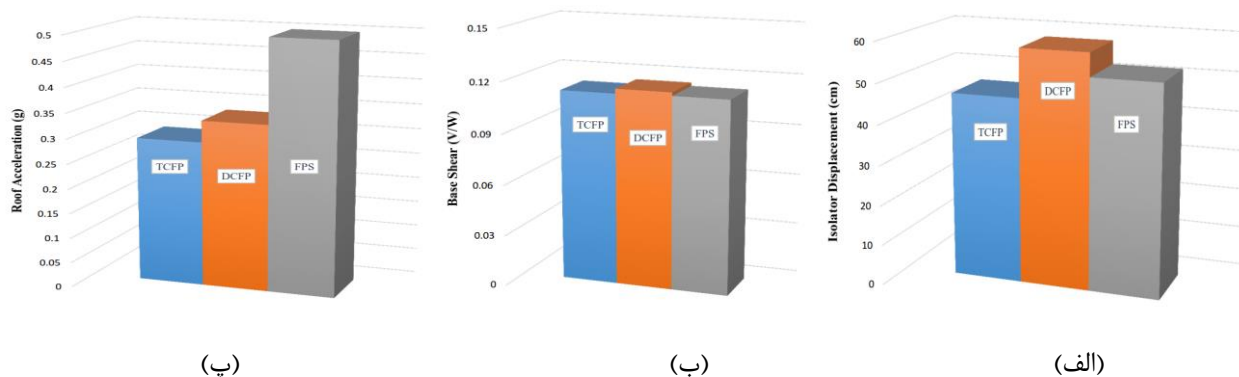
جداگر DCFP و FPS مشاهده شده است. همچنین نمودار شکل ۱۲- پ شتاب بام سازه سه طبقه جداسازی شده با انواع جداگرها را نشان می‌دهد که در این شکل نیز مشابه با سازه شش طبقه جداگر TCFP شتاب کمتری را نسبت به سایر جداگرها انتقال می‌دهد.

#### ۴-۵- نتایج مربوط به سازه نه طبقه

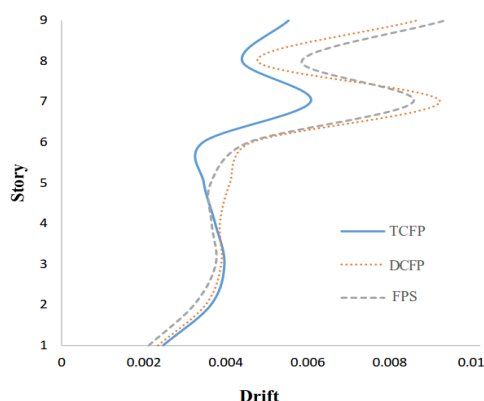
در نمودارهای میله‌ای نشان داده شده در شکل ۱۳ میانگین حداکثر پاسخ‌های بدست آمده برش پایه، جابجایی در تراز بالای جداگر و شتاب بام سازه نه طبقه تحت هفت رکورد زلزله ترسیم شده است. با توجه به این نمودارها برش پایه جداگر با دوره تناوب ۵ ثانیه و میرایی ۱۵٪ سازه جداسازی شده با جداگر TCFP تقریباً منطبق بر جداگرهای DCFP و FPS می‌باشد (شکل ۱۳-الف). جابجایی در تراز جداگر در سازه نه طبقه جداسازی شده با جداگر TCFP نسبت به سازه جداسازی شده با جداگر DCFP و FPS کمتر بوده است (شکل ۱۳-ب) و شتاب بام سازه نه طبقه جداسازی شده با جداگر TCFP نیز کمتر از سازه جداسازی شده با جداگر DCFP و FPS مشاهده شده است (شکل ۱۳-پ).



شکل ۱۲: نمودار تاثیر انواع جداگر با میرایی ۱۵٪ و زمان تناوب ۵ ثانیه بر پاسخ‌های مختلف سازه سه طبقه (الف) جابجایی جداگر (ب) برش پایه نرمال شده (پ) شتاب بام



شکل ۱۳: نمودار تاثیر انواع جداگر با میرایی ۱۵٪ و زمان تناوب ۵ ثانیه بر پاسخ‌های مختلف سازه نه طبقه (الف) جابجایی جداگر (ب) برش پایه نرمال شده (پ) شتاب بام در نمودار شکل ۱۴ نیز، دریفت طبقات سازه تحت رکورد زلزله Cape Mendocino برای جداگرهای با زمان تناوب ۵ ثانیه و میرایی ۱۵٪ ترسیم شده است. در سازه نه طبقه جداسازی شده با جداگر TCFP دریفت سازه بهتر از دو سازه جداسازی شده با جداگرهای DCFP و FPS کنترل شده است.

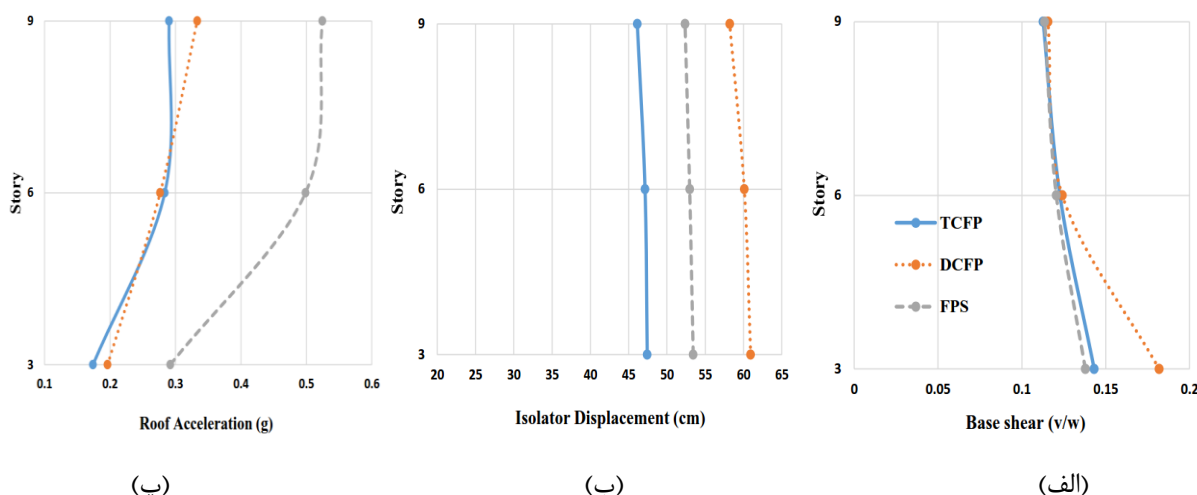


شکل ۱۴: نمودار تاثیر جداگر با میرایی ۱۵٪ و زمان تناوب ۵ ثانیه بر دررفت سازه نُه طبقه

#### ۴-۶- بررسی تاثیر ارتفاع روسازه بر نتایج عملکرد جداگرها

برای بررسی اثر تغییر ارتفاع بر عملکرد روسازه جداسازی شده با جداگرهای مختلف در این قسمت نتایج انواع سازه‌های سه، شش و نُه طبقه بر روی جداگرهای مختلف با زمان تناوب ۵ ثانیه و میرایی موثر ۱۵ درصد مقایسه شده است. بر این اساس نمودار میانگین پاسخهای بدست آمده برش پایه نرمال شده، جابجایی جداگرها و شتاب بام تحت هفت رکورد زلزله برای سازه‌های مختلف در شکل ۱۵ ترسیم شده است. نمودار رسم شده در شکل ۱۵-الف نشان می‌دهد که با افزایش ارتفاع برش پایه کاسته شده است. مهمترین علت این موضوع وابسته بودن برش پایه جداگرهای اصطکاکی به نیروی قائم بر آن است و دلیل دیگر آن این است که با افزایش ارتفاع سازه صلبیت سازه کاهش می‌یابد و در نتیجه برش پایه کم می‌شود. به عنوان مثال سازه جداسازی شده با جداگر TCFP در حالت سه طبقه نسبت به سازه نُه طبقه جداسازی شده با همان جداگر به اندازه ۷٪ برش بیشتری دریافت می‌کند. در سازه ۳ طبقه مشاهده شده که برش پایه DCFP حدود ۳۰٪ بیش از جداگر TCFP بوده است. باید توجه داشت که جداگر DCFP رفتاری سه خطی دارد که دو فاز اول آن نرم شونده و فاز آخر سخت شونده است در حالی که در مقایسه، جداگر TCFP رفتاری پنج خطی داشته که سه فاز اول آن نرم شونده و دو فاز آخر سخت شونده‌اند. برای اینکه در طراحی بتوانیم جداگرهایی با سختی موثر و در نتیجه زمان تناوب یکسانی داشته باشیم مجبوریم سختی جداگرهای DCFP در فازهای نرم شونده را بیش از سختی فازهای نرم شونده جداگر TCFP بدهیم. و این امر باعث بیشتر شدن برش پایه جداگر DCFP نسبت به TCFP می‌گردد. این موضوع در سازه‌های کوتاه مرتبه خطر کمتر بودن وزن وارد به جداساز بیشتر نمود پیدا می‌کند. در نتایج ارائه شده در مرجع [۳] نیز همین مورد به چشم می‌خورد.

همچنین در نمودار شکل ۱۵-ب نشان داده شده که در سازه‌های جداسازی شده با جداگرهای مختلف با افزایش طبقات سازه جابجایی در تراز جداگرها تفاوت چندانی نکرده است دلیل آن این است که در جداگرهای اصطکاکی همانگونه که قبلاً گفته شد زمان تناوب و سختی جداگر مستقل از وزن وارد بر آن است، بنابراین با افزایش یا کاهش وزن وارد جابجایی تغییر چندانی نمی‌کند. همچنین سازه جداسازی شده با جداگر TCFP نسبت به سازه‌های جداساز شده با جداگرهای DCFP و FPS جابجایی کمتری را داشته که نشان از توانایی این جداگر در کنترل بهتر رفتار سازه به خاطر طولانی‌تر بودن منحنی سه خطی نرم شونده آن و همچنین رفتار سخت شونده آن در فازهای انتهایی حرکت آن دارد که با افزایش تعداد طبقات همچنان این خاصیت را حفظ نموده است. بر اساس نمودار شکل ۱۵-پ میانگین پاسخهای بدست آمده شتاب بام سازه جداسازی شده با انواع جداسازها با افزایش تعداد طبقات رو به افزایش بوده که جداگر سه قوسی نسبت به دیگر جداگرها رفتاری کاملاً مناسب از خود به نمایش گذاشته است. برعکس این موضوع جداگر تک قوسی رفتاری نامطلوب داشته و میزان شتاب بام در آن نسبت به سازه‌هایی که داری جداگر FPS، DCFP بوده بسیار بیشتر است. به عنوان نمونه در سازه سه طبقه و نُه طبقه جداساز شده با جداگر TCFP به ترتیب شتاب بام  $g/0.147$  و  $g/0.290$  است و در همین سازه‌ها با جداگر FPS شتاب بام  $g/0.292$  و  $g/0.524$  می‌باشد. علت افزایش شتاب بام با افزایش طبقات این است که عموماً در سازه‌های بلندتر طبقات بالاتر شتابهای بیشتری را تجربه می‌کنند.



شکل ۱۵- نمودار تاثیر جداگر با میرایی ۱۵٪ و زمان تناوب ۵ ثانیه بر (الف) برش پایه (ب) جابجایی در تراز بالای جداگر (پ) شتاب بام سازه سه، شش و نه طبقه

## ۵- نتایج:

در این مطالعه به مقایسه رفتار لرزه‌ای روسازه‌های جداسازی شده با انواع جداگر آونگی اصطکاکی تحت تاثیر هفت رکورد زلزله حوزه نزدیک پرداخته شده است. پارامترهای مهمی که برای طراحی جداگرها در آیین نامه‌های طراحی استفاده می‌شود شامل زمان تناوب موثر و میرایی موثر می‌باشد، که در این بررسی این دو پارامتر به عنوان معیار اصلی طراحی در نظر گرفته شده است. برای پوشش طیف وسیعی از جداگرها در این پژوهش زمان تناوب موثر جداگرها در جابجایی حداکثر متحمل برابر با ۳، ۴ و ۵ ثانیه و همچنین میرایی موثر جداگرها برابر با ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ درصد انتخاب شده است. نتایج بدست آمده به شرح زیر می‌باشد:

- با کاهش زمان تناوب و ثابت بودن میرایی جداگرها، جداگرها رفتار سخت شونده‌تر و جذب انرژی بیشتری را از خود نشان می‌دهند و با افزایش زمان تناوب موثر، سه جداگر TCFP، DCFP، FPS برش پایه را به یک میزان کاهش می‌دهند.
- جداگر TCFP بهتر از سایر انواع جداگرهای اصطکاکی دریافت سازه را کنترل می‌کند.
- با افزایش دوره تناوب موثر جداسازی، میانگین جابجایی ایزولاتور در هر سه روسازه افزایش می‌یابد ولی جداگر سه قوسی نسبت به جداگرهای تک قوسی و دو قوسی در دوره تناوب موثر ۵ ثانیه جابجایی کمتری دارد.
- با افزایش در صد میرایی، جداسازها رفتار سخت‌تری را نشان می‌دهند و در نتیجه شتاب و برش پایه بیشتر می‌شود.
- با افزایش ارتفاع سازه برش پایه کاسته شده است. مهمترین علت این موضوع وابسته بودن برش پایه جداگرهای اصطکاکی به نیروی قائم بر آن است و دلیل دیگر آن که با افزایش ارتفاع صلبیت سازه کاهش یافته و در نتیجه جذب انرژی زلزله کم می‌شود. در بررسی صورت گرفته، سازه سه طبقه با انواع جداگرهای اصطکاکی دارای بیشترین صلبیت و برش پایه و سازه نه طبقه با انواع جداگرهای اصطکاکی دارای کمترین صلبیت و برش پایه می‌باشد.
- با افزایش تعداد طبقات سازه جابجایی جداگر تغییر محسوسی پیدا نمی‌کند. دلیل آن این است که در جداگرهای اصطکاکی زمان تناوب و سختی جداگر مستقل از وزن وارد بر آن است، بنابراین با افزایش یا کاهش وزن وارده جابجایی تغییر چندانی نمی‌کند. و همچنین سازه جداساز شده با جداگر TCFP نسبت به سازه‌های جداسازی شده با جداگرهای DCFP و FPS جابجایی کمتری را داشته که نشان از توانایی این جداگر در کنترل بهتر رفتار سازه به خاطر طولانی‌تر بودن منحنی سه خطی نرم شونده

آن و همچنین رفتار سخت شونده در فازهای انتهایی حرکت آن دارد که با افزایش تعداد طبقات همچنان این خاصیت را حفظ نموده است.

- شتاب بام سازه جداسازی شده با انواع جداسازها با افزایش تعداد طبقات رو به افزایش بوده که جداگر سه قوسی نسبت به دیگر جداگرها رفتاری کاملاً مناسب از خود به نمایش در آورده است. برعکس این موضوع جداگر تک قوسی رفتاری نامطلوب داشته و میزان شتاب بام در آن نسبت به سازه‌هایی که داری جداگر DCFP، FPS بوده بسیار بیشتر است.

## مرجع

- [1] Farzad Naeim, James M. Kelly., (1999). Design of Seismic Isolated Structures from Theory to Practice. John.Wiley & Sons, Inc. 2nd Edition.
- [2] Tajammolian, h. (2016). Effect of Near Fault Earthquakes on Torsional Behavior of Isolated Structures Mounted on TCFP Bearing. PhD Dissertation. Amirkabir University of Technology (Tehran Polytechnic).
- [3] Loghman, v. (2013). Effect of Vertical Component of Earthquake on Seismic Behavior of Isolated Structures Using TCFP Bearing. MSc Thesis. Amirkabir University of Technology (Tehran Polytechnic).
- [4] Loghman V., Tajammolian H. and Khosnoudian F. (2015). Effects of Rotational Components of Earthquakes on Seismic Responses of Triple Concave Friction Pendulum Base-Isolated Structures, Journal of Vibration and Control, DOI: 10.1177/1077546315594066.
- [5] Fenz, D., Constantinou, M. C. (2008). Mechanical Behavior of Multi-Spherical Sliding Bearings, Technical Report No. MCEER-08/0007, State University of New York at Buffalo, Buffalo, New York, USA.
- [6] Fenz D. , Constantinou M. C. (2008). Triple Friction Pendulum Bearings for Response History Analysis. Earthquake Spectra, Vol. 24, No 4, pp. 1011-1028.
- [7] Fenz D.M. (2008). Development, Implementation and Verificatio of Dynamic Analysis for Multi-Spherical Sliding Bearings, PhD Dissertation, State University of New York at Buffalo, Buffalo, NY, USA.
- [8] Zayas V., Low S. and Mahin S.A. (1987). The FPS Earthquake Resisting System, Rep. No. UCB/EERC-87/01, Earthquake Engineering Research Center, University of California at Berkeley, Berkeley, CA, USA.
- [9] Fadi F. and Constantinou M.C. (2009). of Simplified Methods for Analysis for Structures with Triple Friction Pendulum Isolators. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 39, pp. 5-22.
- [10] Becker T.C. and Mahin S.A. (2012). Experimental and Analytical Study of the Bi-directional Behavior of the Triple Friction Pendulum Isolator. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 41, pp. 355-373.
- [11] Fadi F. and Constantinou M.C. (2009). of Simplified Methods for Analysis for Structures with Triple Friction Pendulum Isolators. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 39, pp. 5-22.
- [12] AISC (2010). Specification for Structural Steel Buildings, ANSI/AISC 360-10, American Institute of Steel Construction, Chicago, Illinois, USA.
- [13] AISC (2010). Seismic Provisions for Structural Steel Buildings, ANSI/AISC 341-10, American Institute of Steel Construction, Chicago, IL, USA.
- [14] ASCE 7-10 (2010). Minimum Design Loads for Building and Other Structures, ASCE/SEI 7-10, American Society of Civil Engineers, Reston, Virginia, USA.
- [15] The Pacific Earthquake Engineering Research Center, <http://www.peer.com>.
- [16] Computers and Structures Inc. (2010). SAP2000 Software, Version 14.2.4, Computers and Structures Inc., Berkeley, CA, USA.
- [17] Loghman V., Khosnoudian F. and Banazadeh M. (2015). Comparison of seismic behavior of long period SDOF systems mounted on friction isolators under near-field earthquakes. Smart Structures and Systems, Vol. 16(4), pp. 1-23.