

## ارزیابی شکنندگی لرزه‌ای سازه‌های فولادی جداسازی شده با جداگرهای آونگی اصطکاکی تحت زلزله‌های حوزه دور

شیمای افروغ<sup>۱</sup>، مهدی یزدیان<sup>۲</sup>، حامد تجملیان<sup>۳\*</sup>

۱- کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی، دانشگاه علم و هنر، یزد، ایران

۲- مربی، دانشکده مهندسی، دانشگاه علم و هنر، یزد، ایران

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

### چکیده

در مطالعه پیش رو شکنندگی لرزه‌ای و احتمال خرابی سازه‌های فولادی قرار گرفته بر روی انواع جداگرهای آونگی اصطکاکی مورد بررسی قرار گرفته است. این جداگرها عبارتند از جداگر آونگی اصطکاکی تکی، آونگی اصطکاکی دوگانه و آونگی اصطکاکی سه‌گانه. جهت مقایسه رفتار این جداگرها، زمان تناوب موثر به عنوان یکی از مهمترین خصوصیات جداگر انتخاب شده و جداگرها طوری طراحی شده‌اند که زمان تناوب مساوی با هم داشته باشند. سپس با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های موجود در یک سازه جداسازی شده نظیر عدم قطعیت رکورد زلزله، مدلسازی، طراحی و خصوصیات مصالح در چارچوبی احتمالاتی به بررسی مقایسه‌ی شکنندگی لرزه‌ای انواع جداگرهای پاندولی اصطکاکی پرداخته شده است. زمان تناوب موثر جداسازی بین ۳ تا ۵ ثانیه متغیر در نظر گرفته شده و همچنین دو نوع روسازه فولادی دارای قاب خمشی فولادی ویژه به تعداد طبقات ۳ و ۶ طبقه بر روی این جداگرها قرار گرفته‌اند. این دو سازه نمایانگر سازه‌های کوتاه مرتبه و میان مرتبه جداسازی شده مطابق با دستورالعمل HAZUS می‌باشند. در ادامه تحلیل‌های دینامیکی فزاینده غیر خطی بر روی مدل‌ها انجام شده و عملکرد سیستم‌ها در سطوح خرابی مختلف یعنی سطوح خفیف، متوسط، گسترده و فرو ریزش در قالب منحنی شکنندگی برای اجزای سازه‌ای و غیر سازه‌ای مورد بررسی قرار گرفته است. در این مطالعه نشان داده شده که تمامی مدل‌ها بر اساس FEMA P-۶۹۵ دارای کفایت در طراحی و احتمال فرو ریزشی کمتر از ۱۰ درصد هستند. همچنین عملکرد بهتر و احتمال خرابی کمتر سازه قرار گرفته بر روی جداگر آونگی اصطکاکی سه‌گانه نسبت به دو نوع دیگر مشهود است. میزان افزایش حاشیه ایمنی فروریزش در جداگر TCFP با افزایش زمان تناوب از ۳ به ۵ ثانیه تا حدود ۷۰ درصد مشاهده شده است.

کلمات کلیدی: جداگرهای پاندول اصطکاکی، شکنندگی لرزه‌ای، سطح خرابی، آنالیز غیر خطی فزاینده، طراحی بر اساس عملکرد

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:			
10.22065/jsce.2018.119247.1465	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
doi: 10.22065/jsce.2018.119247.1465	۱۳۹۹/۰۱/۱۵	۱۳۹۹/۰۱/۱۵	۱۳۹۷/۰۶/۱۱	۱۳۹۷/۰۴/۱۶	۱۳۹۶/۱۱/۲۵
حامد تجملیان					* نویسنده مسئول:
h.tajammolian@yazd.ac.ir					پست الکترونیکی:

# Seismic Fragility Assessment of Steel Structures Supported on Friction Pendulum Isolators Subjected to Far-Field Ground Motions

Shima Afrough<sup>1</sup>, Mehdi Yazdian<sup>2</sup>, Hamed Tajammolian<sup>3\*</sup>

1- MSc Graduate, University of Science and Arts of Yazd, Yazd, Iran

2-Lecturer, University of Science and Arts of Yazd, Yazd, Iran

3- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Yazd University, Yazd, Iran

## ABSTRACT

*In this paper, attempts are made to compare the seismic fragility and the probability of failure of steel structures supported on different types of friction pendulum isolators. These isolators including single friction, dual friction pendulum and triple friction pendulum are designed to have similar effective periods as a prominent characteristic of them. The designed bearings have 3- to 5-second effective period and supports 3- and 6-story moment framed steel structures. These two superstructures represent short-range and intermediate-order buildings based on HAZUS technical manual. Three-dimensional nonlinear models of the structures are idealized in a finite element framework and nonlinear time history analyses are performed. In order to compute the fragility of the structure, the probable uncertainty sources in an isolated building such as earthquake record, modeling, design, and properties of materials in a probabilistic framework are considered. Furthermore, incremental dynamic analysis (IDA) is performed and the fragility curves of the structure are obtained in slight, moderate, extensive and collapse damage states (DS). Calculating the failure probability according to FEMA P-695, it is showed that all the isolated structures have less than 10% collapse probability. In addition, it is revealed that the triple concave friction pendulum (TCFP) has greater collapse margin ratio (CMR) than other kind of friction bearings. Growing the effective period of TCFP from 3 to 5 seconds, increases the CMR nearly 70 percent.*

## ARTICLE INFO

**Receive Date:** 14 February 2018

**Revise Date:** 07 July 2018

**Accept Date:** 02 September 2018

## Keywords:

*Friction Pendulum Isolator, Seismic Fragility, Damage State, Incremental Dynamic Analysis, Performance Based Design*

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/jsce.2018.119247.1465

\*Corresponding author: Hamed Tajammolian

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

## ۱- مقدمه

با پیشرفت تکنولوژی و روش‌های ساخت امکان ارائه سیستم‌های نوین لرزه‌ای فراهم آمده است. به نظر می‌رسد که در سال‌های اخیر مفهوم جداسازی لرزه‌ای نیز جذابیت زیادی برای مخترعین داشته و هر ساله سیستم‌های نوین و متنوعی بار روش‌های مختلف جداسازی پیشنهاد شده و به ثبت می‌رسند. با وجود اینکه بسیاری از این سیستم‌ها نامناسب و غیر عملی بوده، اما به دلیل نقش قابل توجه سیستم‌های جداساز در تامین خواسته‌های مهندسی، تعداد آن‌ها هر ساله افزایش می‌یابد. سیستم‌های جداساز بر روی پی سازه‌ها یا در برخی موارد در سطح تراز طبقات قرار می‌گیرند. این سیستم‌ها دارای قابلیت بالای جذب انرژی هستند و با افزایش زمان تناوب سازه، میرایی سازه را نیز افزایش می‌دهند. اجزای اصلی در رفتار یک سیستم جداساز عبارتند از: ۱) انعطاف پذیری، تا زمان تناوب سازه را طولانی‌تر کرده و اثر جداسازی ایجاد می‌نماید. ۲) ظرفیت استهلاک انرژی، تا نیازهای جابجایی را برای یک تراز طراحی عملی و سودمند کاهش دهد. ۳) ابزاری برای فراهم سازی صلبیت تحت بارهای سرویس مانند باد [۱].

تغییر مکان بین طبقه‌ای را می‌توان با افزایش سختی سازه کاهش داد، اما این عمل سبب تقویت و تشدید اثر حرکت در طبقه و به نوبه خود افزایش شتاب طبقات و خسارت داخلی تجهیزات حساس داخلی می‌شود. از طرفی شتاب‌های طبقات را می‌توان با نرم‌تر کردن سیستم کاهش داد، اما این امر باعث افزایش تغییر مکان‌های بین طبقه‌ای می‌گردد. تنها راه حل عملی کاهش هم‌زمان تغییر مکان بین طبقه‌ای و شتاب‌های طبقات، استفاده بهینه از جداگرهای لرزه‌ای می‌باشد. به گونه‌ای که جابجایی و شتاب‌های مورد نظر برای طراح تا حد معقولی محدود شوند. در این حالت نیز گرچه سیستم جداساز، با متمرکز کردن تغییر مکان‌های حاصله در تراز جداساز، نرمی مورد نیاز سازه را فراهم می‌کند اما در عین حال خود باعث افزایش بی‌رویه جابجایی‌ها در تراز جداگرها خواهد شد. اکثر سیستم‌های جداسازی که امروزه به کار می‌روند یا شامل نشیمن‌های الاستومری هستند، که ماده اولیه آن لاستیک طبیعی یا نئوپرن است یا در آن‌ها نشیمن‌های لغزشی، که سطح قسمت لغزنده از جنس تفلون و فولاد ضد زنگ است به کار گرفته شده‌اند. سیستم‌های دیگری نیز پیشنهاد شده‌اند که در آن‌ها نشیمن‌های الاستومری و لغزان با هم ترکیب شده‌اند. البته همانطور که ذکر شد، تنوع سیستم‌های جداسازی شده هر سال افزایش می‌یابد و سیستم‌های نوینی معرفی می‌گردند [۲].

مطابق نتایج تحلیلی و آزمایشگاهی، سازه‌های مجهز به این فناوری پاسخ لرزه‌ای کمتری نسبت به سازه‌های معمول خواهند داشت. از آنجایی که پاسخ کمتر و در نتیجه خرابی خفیف‌تر باعث افزایش قابلیت بهره برداری 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<sup>۱</sup> (FPS)، آونگی اصطکاکی دوگانه<sup>۲</sup> (DCFP) و آونگی اصطکاکی سه‌گانه<sup>۳</sup> (TCFP) از انواع جداگرهای اصطکاکی می‌باشند [۲]. ساختار داخلی جداسازهای پاندولی اصطکاکی براساس سطوح مقعری که لغزش بر روی آن‌ها صورت می‌گیرد، طبقه‌بندی می‌شود. با توجه به این ساختار داخلی، ترکیب سطوحی که لغزش بر روی آن‌ها صورت می‌گیرد و تغییر این ترکیب به واسطه تغییر در میزان جابجایی باعث ایجاد سختی و میرایی دلخواه می‌شود. حتی در انواع ساده این جداسازها که انعطاف رفتار کمتری از خود نشان می‌دهد، در نتیجه لغزش بر روی سطوح مختلف، فواید متفاوتی حاصل می‌شود. برای اینکه این رفتار برای مقاصد طراحی مناسب باشد، بایستی میزان نیرو و جابجایی که باعث تغییر سختی و میرایی می‌شوند، قابل پیش بینی و منطبق بر پارامترهای از پیش تعیین شده باشند. با توجه به این مطلب، مدل رفتاری این جداسازها برای ایجاد مدلی عددی ضروری می‌باشد [۱].

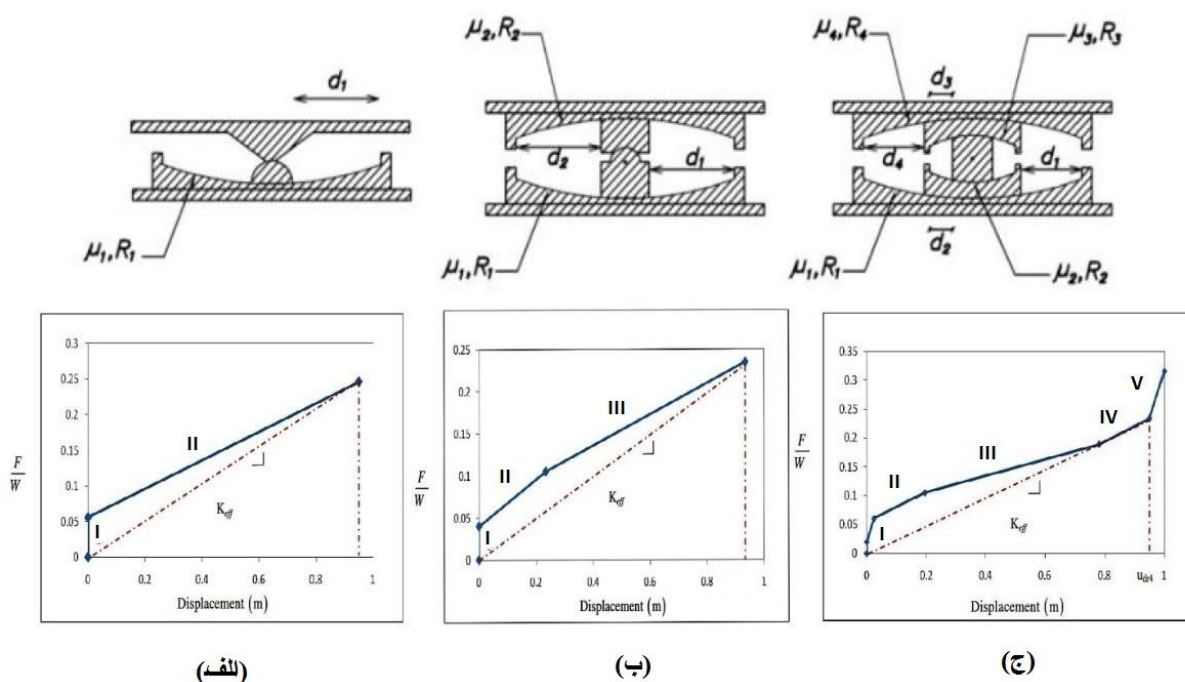
سیستم اصطکاکی-پاندولی FPS یک سیستم اصطکاکی می‌باشد که رفتار اصطکاکی و بازگرداندگی را به واسطه‌ی هندسه‌ی خود با هم ترکیب نموده است. در این سیستم از بالا رفتن لغزنده در سطح لغزشی کروی شکل برای ایجاد نیروی برگردان و از اصطکاک

<sup>1</sup> Single Friction Pendulum

<sup>2</sup> Double Concave Friction Pendulum

<sup>3</sup> Triple Concave Friction Pendulum

بین لغزنده و سطح لغزشی جهت استهلاک انرژی زلزله استفاده می‌شود. در شکل ۱ الف 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. همان طور که در شکل ۱ ب 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 شده اند صفحات پایینی و بالایی دارای شعاع انحنا  $R_1$  و  $R_2$  می‌باشد. ضرایب اصطکاکی این صفحات را با  $\mu_1$  و  $\mu_2$  نشان می‌دهیم. با توجه به انتخاب ضرایب اصطکاکی دو سطح، جداگر می‌تواند رفتار دو خطی مانند FPS یا سه خطی داشته باشد. ظرفیت جابجایی اسمی هر کدام از سطوح پایینی و بالایی به ترتیب  $d_1$  و  $d_2$  می‌باشد که باعث ایجاد ظرفیت جابجایی اسمی  $d_1 + d_2$  برای کل سیستم می‌شود. یکی از جدیدترین انواع جداگرهای اصطکاکی، جداگر پاندولی اصطکاکی سه قوسی نامیده می‌شود. جداگر TCFP که مقطع آن در شکل ۱ ج 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 اصطکاکی صفحات می‌توان انتظار رفتاری ۵ خطی را از این جداگر داشت. این رفتار که با رژیم‌های حرکتی ۱ تا ۵ مشخص می‌گردد، در سه فاز اول بصورت نرم شونده و در فازهای چهارم و پنجم بصورت سخت شونده است. فازهای مختلف حرکتی این جداگر با حروف I تا V در شکل ۱ ج مشخص شده‌اند. 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 جداگرها و مشخصات منحنی نیرو-تغییر مکان آن‌ها الف) جداگر اصطکاکی تک قوسی (FPS) ب) جداگر اصطکاکی دوگانه (DCFP) ج) جداگر اصطکاکی سه‌گانه (TCFP) [۲]

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 اصطکاکی مناسب عامل کنترل نیروی انتقالی به روسازه و همچنین کنترل تغییرمکان جانبی سازه خواهد بود [۲].

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 تامین نیاز بیشترین سطح محتمل زلزله<sup>۵</sup> (MCE) می‌باشد که حصول هم زمان آن‌ها در جداسازهای لرزه‌ای غیرتطبیق 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، تامین 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 تطبیق پذیر<sup>۶</sup> آن‌ها باعث می‌شود تا سیستم جداساز تحت شدت‌های مختلف زلزله بهینه‌ترین رفتار را ارائه دهند. منظور از رفتار تطبیق پذیر این است که در سه فاز اولیه حرکت (فازهای I تا III در شکل ۱.ج) که برای مقابله با زلزله‌های سطح طراحی در نظر گرفته شده، رفتار جداگر از نوع نرم شوندگی بوده تا از میزان انرژی ورودی زلزله به روسازه بکاهد. برای زلزله‌های سطح حداکثر محتمل، جداگر وارد فازهای IV و V شده که رفتار آن‌ها از نوع سخت‌شونده بوده و با سختی بیشتر از افزایش بیش از حد تغییرمکان جداگر جلوگیری می‌کنند [۱].

با اینکه تحقیقاتی بر روی نحوه عملکرد سازه‌های جداسازی شده با انواع جداگر پاندول اصطکاکی صورت گرفته است اما هنوز بسیاری از نکات در رفتار شکنندگی آن‌ها، به طور کامل مشخص نشده و نیاز به مطالعات بیشتر در این زمینه احساس می‌شود. بررسی منحنی شکنندگی لرزه‌ای سازه‌های جداسازی شده با جداگرهای مختلف این امکان را می‌دهد تا احتمال خرابی هر سازه را بصورت کمی سنجیده تا به کارایی هر کدام از جداگرهای مورد نظر پی ببریم. همچنین مطالعاتی که به بررسی شکنندگی لرزه‌ای سازه‌های ساختمانی جداسازی شده در قالب احتمالاتی پرداخته شده باشد کمیاب هستند، و بیشتر مطالعات انجام شده بر روی پل‌ها صورت گرفته است. بنابراین نیاز به تحقیق بر روی سازه‌های دیگر احساس می‌شود. از طرف دیگر تاکنون مطالعات متنوعی بر روی خصوصیات جداگرهای الاستومری صورت گرفته که در پاراگراف بعدی به بعضی از آنها اشاره شده است. نقطه تمایز جداگرهای اصطکاکی بخصوص جداگر آونگی سه‌گانه (TCFP) با جداگرهای الاستومری رفتار تطبیق پذیر آن است.

به عنوان نمونه‌ای از تحقیقات صورت گرفته بر روی شکنندگی سازه‌های جداسازی شده می‌توان به مطالعات هان و همکاران<sup>۷</sup> اشاره کرد که به بررسی ریسک لرزه‌ای ناشی از مقاوم سازی یک سازه بتنی ضعیف با استفاده از جداگرهای لرزه‌ای پرداخته‌اند. در این تحقیق با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های مختلف موجود در زمین لرزه، سیستم سازه‌ای و مدلسازی، اثر بهسازی لرزه‌ای انجام شده در منحنی‌های شکنندگی<sup>۸</sup> سازه بتنی و احتمال وقوع زلزله ۵۰ ساله بررسی شده است. با در نظر گرفتن ۳۲ رکورد زلزله و پس لرزه‌های آن‌ها نشان داده شده است که در نظر نگرفتن رکوردهای پس لرزه می‌تواند به کم برآورد کردن ریسک لرزه‌ای منتهی شود. نتایج مطالعه انجام شده مشخص نموده مقاوم سازی سازه بتنی مورد بحث با جداگرهای LRB ریسک لرزه‌ای در سطوح خرابی بالا را کاهش می‌دهد [۴]. تاواس و همکاران<sup>۹</sup> به بررسی منحنی‌های شکنندگی یک پل بتنی سه دهانه به طول ۱۰۶ متر و ارتفاع ۶٫۲۲ متر دارای جداگرهای الاستومریک با رفتار دوخطی واقع در ایالت کبک کانادا<sup>۱۰</sup> پرداختند. برای در نظر گرفتن عدم قطعیت زلزله، ۱۸۰ رکورد مصنوعی زلزله که با خصوصیات زمین لرزه‌های شرق کانادا منطبق بوده مورد استفاده قرار گرفته است. لازم بذکر است پل مورد مطالعه در دهانه‌های میانی فاقد جداگر بوده و عرشه مستقیماً بر روی ستون‌ها تکیه داشته است. در حالی که در محل اتصال عرشه به پایه در دو دهانه انتهایی از جداگرهای الاستومریک استفاده شده است. سطوح خرابی برای اعضای اصلی پل از جمله ستون‌ها، عرشه و جداگرهای پل استخراج شده و چنین

<sup>4</sup> Design Earthquake

<sup>5</sup> Maximum Considered Earthquake

<sup>6</sup> Adaptive

<sup>7</sup> Han et al.

<sup>8</sup> Fragility Curves

<sup>9</sup> Tavares et al.

<sup>10</sup> Quebec, Canada

نتیجه‌گیری شده که عامل اصلی در تعیین منحنی شکست پل مورد مطالعه، آسیب پذیری ستون‌های آن در زلزله‌های مصنوعی ساخته شده بر اساس خصوصیات لرزه‌ای ساختگاه پل بوده است [۵]. کریم و یامازاکی<sup>۱۱</sup> [۶]، ژانگ و هو<sup>۱۲</sup> [۷]، و سکویرا و همکاران<sup>۱۳</sup> [۸] از دیگر پژوهشگرانی هستند که در زمینه بررسی ریسک لرزه‌ای پل‌های جداسازی شده با جداگرهای الاستومریک و بدست آوردن منحنی شکنندگی آن‌ها فعالیت داشتند. هوانگ و همکاران<sup>۱۴</sup> به ارزیابی عملکرد سازه یک نیروگاه اتمی با و بدون سیستم جداساز لرزه‌ای در برابر بارهای زلزله و انفجار پرداختند و نشان داده‌اند وجود سیستم جداسازی لرزه‌ای می‌تواند تا حد زیادی احتمال عملکرد غیر قابل قبول نیروگاه را کاهش دهد [۹]. تجملیان و همکاران به بررسی عملکرد شکنندگی جداگرهای آونگی اصطکاکی سه‌گانه (TCFP) در مقابله زلزله‌های حوزه نزدیک پرداخته‌اند. آن‌ها نشان داده‌اند در صورت استفاده از TCFP اثرات پیچش در احتمال خرابی سازه به نحو بسیار مطلوبی کنترل می‌شود [۱۰]. در میان مطالعات موجود، مطالعه‌ای که به مقایسه انواع جداگرهای آونگی اصطکاکی از لحاظ احتمالاتی پرداخته باشد و احتمال وقوع خرابی در آن‌ها را بررسی کرده باشد یافت نشده است. بنابراین مطالعه پیش رو سعی در پر کردن این خلا دارد. برای این منظور از جداگر آونگی اصطکاکی تکی، آونگی اصطکاکی دوگانه و آونگی اصطکاکی سه‌گانه استفاده شده است. جهت مقایسه رفتار این جداگرها، زمان تناوب موثر به عنوان یکی از مهمترین خصوصیات جداگر انتخاب شده و جداگرها طوری طراحی شده‌اند که زمان تناوب مساوی با هم داشته باشند. سپس با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های موجود در یک سازه جداسازی شده نظیر عدم قطعیت رکورد زلزله، مدلسازی، طراحی و خصوصیات مصالح در چارچوبی احتمالاتی به بررسی مقایسه‌ی شکنندگی لرزه‌ای انواع جداگرهای پاندولی اصطکاکی پرداخته شده است. زمان تناوب موثر جداسازی بین ۳ تا ۵ ثانیه متغیر در نظر گرفته شده و همچنین دو نوع روسازه فولادی دارای قاب خمشی فولادی ویژه به تعداد طبقات ۳ و ۶ طبقه بر روی این جداگرها قرار گرفته‌اند. این دو سازه نمایانگر سازه‌های کوتاه مرتبه و میان مرتبه جداسازی شده می‌باشند.

## ۲- طراحی جداگرها و روسازه‌ها:

روسازه‌های مورد مطالعه در این پژوهش ۳ و ۶ طبقه دارای پلان مربعی شکل که ابعاد تمامی دهانه‌های پلان در دو طرف ۷ متر و ارتفاع هر طبقه ۳/۲۰ متر بوده است. با توجه به آیین‌نامه ASCE 7-2010 مقدار بار مرده و زنده کف‌ها به ترتیب ۸ و ۴ کیلونیوتن بر مترمربع در نظر گرفته شده است و بار زلزله به روش استاتیکی معادل همین آیین‌نامه محاسبه گردیده است [۱۱]. تحلیل لرزه‌ای روسازه ۶ طبقه با ارتفاع حدود ۲۰ متر نیز با استفاده از روش طیف پاسخ آیین‌نامه بررسی شده است. طراحی روسازه از نوع قاب خمشی ویژه و بر مبنای آیین‌نامه AISC-360 صورت گرفته است [۱۲]. از آنجا که قاب‌های مورد نظر از نوع خمشی ویژه بوده‌اند، ضوابط لرزه‌ای استاندارد AISC-341 نیز در طراحی آن‌ها مد نظر قرار گرفته است [۱۳]. جداگرهای مورد استفاده طبق آیین‌نامه ASCE7-2010 برای منطقه‌ای با مشخصات طیفی  $S_1=0.6g$ ،  $T_1=8s$ ،  $S_g=1.5g$  و نوع خاک D طراحی شده است و حداکثر ظرفیت تغییرمکانی جداگرها طبق آیین‌نامه ۹۰۰ میلی‌متر بوده است [۱۱]. برای در نظر گرفتن تغییرات زمان تناوب از جداگرهای اصطکاکی مختلف در این مقاله زمان تناوب موثر جداگرها در جابجایی حداکثر محتمل برابر ۳، ۴ و ۵ ثانیه در نظر گرفته شده است. این محدوده از زمان تناوب در مورد جداگرهای اصطکاکی مطابق مطالعات پیشین از جمله تحقیقات فنز و کنستانینو، مورگان و میهین، بکر و میهین و خوشنودیان و لقمان مد نظر قرار گرفته است [۱۴، ۱۵، ۱۶، ۱۷]. مورگان و میهین مقادیر ضرایب اصطکاک ۰/۰۲ تا ۰/۰۳ را بعنوان اصطکاک کم، ۰/۰۵ تا ۰/۱ را بعنوان مقادیر متوسط و ضرایب ۰/۱۵ تا ۰/۲ را بعنوان اصطکاک زیاد پیشنهاد نموده‌اند که ضرایب اصطکاک بکار رفته برای سطوح لغزشی جداگرهای این مقاله نیز مطابق مقادیر پیشنهادی مورگان و میهین است [۱۵]. از آنجا که تحقیقات گذشته [۱] اثر تغییرات میرایی موثر جداگرهای اصطکاکی بر منحنی‌های شکنندگی آن‌ها را ناچیز نشان داده شده در این مطالعه میرایی هر جداگرها بطور ثابت برابر با ۰/۱۵٪ در نظر گرفته شده است. جداگرهای مورد استفاده در این مطالعه بصورت المان Triple Friction Pendulum که توسط دائو و همکاران در نرم افزار OpenSees معرفی شده است، مدل گردید. با استفاده از مطالعات

<sup>11</sup> Karim & Yamazaki

<sup>12</sup> Zhang & Huo

<sup>13</sup> Siqueira et al.

<sup>14</sup> Huang et al.

فنز و کنستانتینو [۱۸] در مورد جداگرهای DCFP و FPS شعاع ضریب اصطکاک سطوح جداگر TCFP در OpenSees به نحوی تنظیم شده تا همان رفتار جداگرهای DCFP و FPS را ارائه دهد. مدلسازی روسازه در این نرم افزار با المان Fiber صورت گرفته است [۱۹].

جهت بررسی و مقایسه رفتار لرزه‌ای جداگرهای مختلف ابتدا لازم است که با مبنای طراحی مشخصی، سه نوع جداگر DCFP، FPS و TCFP طراحی شده تا بتوان پس از آنالیز پاسخ‌های آن‌ها را مقایسه نمود. پارامترهای مهمی 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 و کنستانتینو و فادی هم از این دو پارامتر برای طراحی و مقایسه استفاده شده است [۲۰، ۲۱]. 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 هیستریسیسی و  $D_{max}$  ماکزیمم جابجایی جداگر در سطح مورد نظر خواهد بود [۲۰]. 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. محاسبه هر کدام از این دو مقدار برای جداگرهای FPS، DCFP و TCFP براساس روابط موجود در مراجع [۲] صورت گرفته است.

در مقاله پیش رو با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های موجود در یک سازه جداسازی شده نظیر عدم قطعیت رکورد زلزله، مدلسازی، طراحی و خصوصیات مصالح در چارچوبی احتمالاتی به بررسی اثر شکنندگی لرزه‌ای سازه‌های جداسازی شده با انواع جداگرهای اصطکاک‌ی پرداخته شده است. جهت در نظر گرفتن عدم قطعیت رکورد به رکورد زلزله ۲۲ رکورد مختلف حوزه دور مطابق آیین نامه FEMA P-695 تعیین شده است [۲۲]. جهت بررسی احتمال وقوع خرابی‌های سازه‌ای و غیر سازه‌ای دو پارامتر مهندسی تقاضای حداکثر تغییر مکان نسبی و حداکثر شتاب مد نظر بوده است. با انجام آنالیز فزاینده دینامیکی غیرخطی<sup>۱۵</sup> (IDA) بزرگی شتاب طیفی ای که در آن مقادیر حدی تعیین شده برای شتاب و تغییر مکان نسبی طبقات رخ می‌دهد بدست آمده است. سپس احتمال وقوع سطوح خرابی مختلف آیین‌نامه‌ای متناسب با مقادیر پارامترهای تقاضا محاسبه گردیده است. در خاتمه نیز با استفاده از روش پیشنهادی در دستور العمل FEMA P-695 [۲۲] احتمال وقوع فرو ریزش روسازه دارای جداگرهای متفاوت بدست آمده است. در این پژوهش چهار سطح خرابی<sup>۱۶</sup> (DS) متفاوت، بر اساس دستور العمل HAZUS [۲۳] تعریف شده است. این چهار سطح شامل سطح خرابی خفیف، متوسط، گسترده و فروریزش می‌باشند. لازم به ذکر است در این مطالعه، برای اجزا غیرسازه‌ای صرفاً پارامتر شتاب و برای اجزای سازه‌ای تغییر مکان نسبی بین طبقات به عنوان پارامتر موثر در نظر گرفته شده است. مقادیر حدی این پارامترها در جدول ۱ ارائه شده است. در ارزیابی احتمالی خرابی سازه در سطح فرو ریزش مطابق آیین‌نامه FEMA تنها پارامتر موثر تغییر مکان نسبی بین طبقات سازه است. لازم به یادآوری است اکثر دستورالعمل‌ها و آیین‌نامه‌های موجود در بررسی عملکرد سازه‌ها عموماً دو پارامتر شتاب و تغییر مکان نسبی طبقات را به عنوان معیاری جهت بررسی وقوع سطوح عملکردی متفاوت مد نظر قرار داده‌اند. همچنین باید توجه نمود مقادیر تغییر مکان نسبی ارائه شده در جدول ۱ مختص به سازه‌های کوتاه مرتبه (۱ تا ۳ طبقه) بوده و لازم است تا در سازه‌های میان مرتبه (۴ تا ۷ طبقه) در ضریب ۲/۳ ضرب شود. در بیشتر مطالعات سازه‌های جداسازی شده از فرض خطی بودن رفتار روسازه استفاده می‌شود، ولی در این پژوهش برای لحاظ نمودن مقدار دقیق شتاب و تغییر مکان نسبی طبقات در توابع عملکردی رفتار غیر خطی روسازه در نظر گرفته شده است.

<sup>15</sup> Incremental Dynamic Analysis

<sup>16</sup> Damage State

جدول ۱: مقادیر حدی شتاب و تغییر مکان نسبی برای سطوح خرابی مختلف [۲۳]

Damage State	DS1	DS2	DS3	DS4
Peak Floor Acceleration	0.45g	0.9g	1.8g	3.6g
Maximum Interstory Drift	0.006	0.012	0.03	0.08

برای در نظر گرفتن اثر تغییر پذیری ذاتی موجود در زلزله در تحلیل پاسخ‌های سیستم جداسازی شده، روش تحلیل دینامیکی فزاینده مورد استفاده قرار گرفته است. در این روش برای لحاظ نمودن عدم قطعیت موجود در پیش بینی شدت لرزه‌ای، یک رکورد زلزله به نحوی مقیاس می‌شود تا محدوده وسیعی از شدت‌های لرزه‌ای را پوشش دهد. همچنین برای در نظر گرفتن عدم قطعیت موجود در محتوای فرکانسی و شکل طیفی زلزله، تعداد قابل قبولی از رکوردهای زمین لرزه (در این تحقیق ۲۲ رکورد) مورد استفاده قرار می‌گیرند. این ۲۲ رکورد مطابق FEMA P-695 برای ارزیابی خسارت در حوزه‌های دور از گسل انتخاب شده‌اند. (جدول ۲).

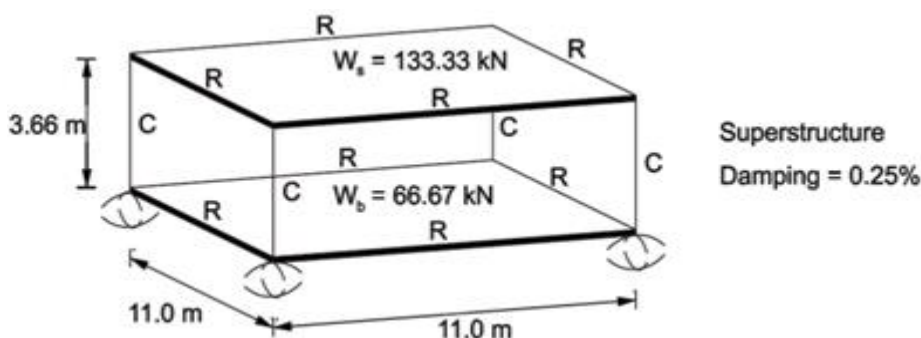
جدول ۲: رکوردهای زلزله حوزه دور مورد استفاده در این مطالعه [۲۲]

No	Record	Station	Soil Type	Mw	Max. PGA (g)	Max. PGV (cm/s)	Epicentral (km)
1	Northridge-01	Canyon Country-WLC	D	6.7	0.52	63	13.3
2	Northridge-01	Beverly Hills-Mulhol	D	6.7	0.48	45	26.5
3	Duzce	Bolu	D	7.1	0.82	62	41.3
4	Hector Mine	Hector	C	7.1	0.34	42	26.5
5	Imperial Valley-06	Delta	D	6.5	0.35	33	33.7
6	Imperial Valley-06	Elcentro Array #11	D	6.5	0.38	42	29.4
7	Kobe	Nishi-Akashi	C	6.9	0.51	37	8.7
8	Kobe	Shin-Osaka	D	6.9	0.24	38	46
9	Kocaeli, Turkey	Duzce	D	7.5	0.36	59	98.2
10	Kocaeli, Turkey	Arcelik	C	7.5	0.22	40	53.7
11	Landers	Yermo Fire Station	D	7.3	0.24	52	86
12	Landers	Cool Water	D	7.3	0.42	42	82.1
13	Loma Prieta	Capitola	D	6.9	0.53	35	9/8
14	Loma Prieta	Gilory Array #3	D	6.9	0.56	45	31.4
15	Manjil, Iran	Abbar	C	7.4	0.51	54	40.4
16	Superstition Hills	El Centro Imp. Co.	D	6.5	0.36	46	35.8
17	Superstition Hills	Poe Road (temp.)	D	6.5	0.45	36	11.2
18	Cape Mendocino	Rio Dell Overpass	D	7	0.55	44	22.7
19	Chi-Chi, Taiwan	CHY101	D	7.6	0.44	115	32
20	Chi-Chi, Taiwan	TCU045	C	7.6	0.51	39	77.5
21	San Fernando	LA- Hollywood Stor	D	6.6	0.21	19	39.5
22	Friuli, Italy	Tolmezzo	C	6.5	0.35	31	20.2



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

برای بررسی صحت مدل سازی با المان Triple Friction Pendulum در برنامه OpenSees 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، پریود روسازه 0.2 Sec و میرایی روسازه 0.25% بوده است (شکل ۲ و جدول ۳). مشخصات جداگرهای مورد استفاده در این مطالعه در جدول ۴ نشان داده شده است [۱۴].



شکل ۲: مشخصات مدل فنز و کنستانتینو [۱۴]

جدول ۳: مشخصات هندسی روسازه مدل فنز و کنستانتینو [۱۴]

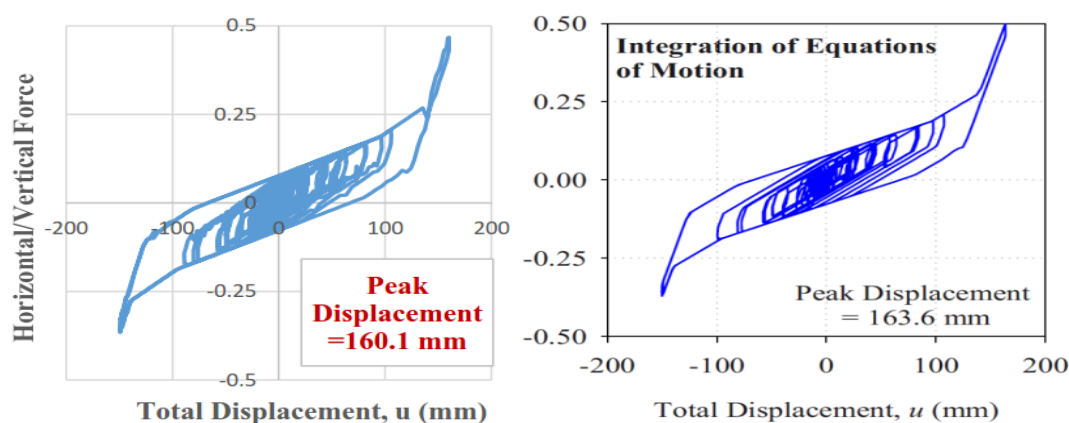
مشخصات مقطع	مساحت (mm <sup>2</sup> )	ممان اینرسی (mm <sup>4</sup> )	ممان اینرسی برشی (mm <sup>4</sup> )	مساحت برشی (mm <sup>2</sup> )	جرم (kg)	وزن (kN)
ستون C	5.0×10 <sup>6</sup>	6.851×10 <sup>7</sup>	1.0×10 <sup>8</sup>	5.0×10 <sup>6</sup>	0	0
تیر R	5.0×10 <sup>6</sup>	1.0×10 <sup>11</sup>	1.0×10 <sup>8</sup>	5.0×10 <sup>6</sup>	0	0

جدول ۴: مشخصات جداگرهای TCFP مورد استفاده [۱۴]

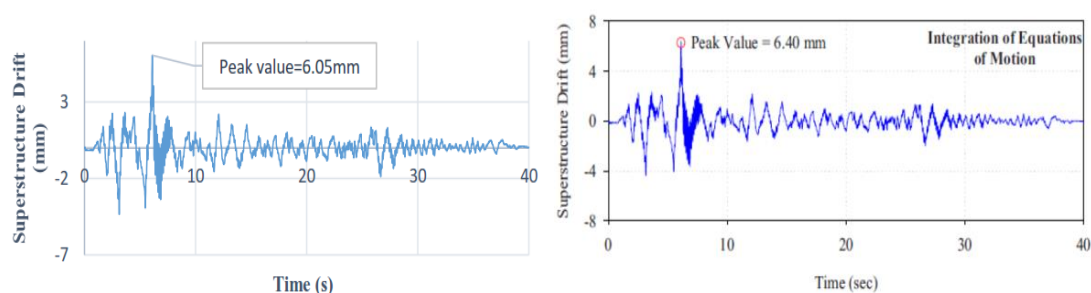
سطح لغزش	شعاع موثر سطح	ضریب اصطکاک سطح	ظرفیت تغییر مکان سطح
سطح ۱	435mm	0.02-0.04	64mm
سطح ۲	53mm	0.01-0.02	19mm
سطح ۳	53mm	0.01-0.02	19mm
سطح ۴	435mm	0.06-0.13	64mm

سازه مورد نظر تحت رکورد زلزله ۱۸۰ درجه زلزله ال سنترال سال ۱۹۴۰ با PGA=0.3g آنالیز تاریخیچه زمانی شده است. ضریب مقیاس زلزله برای اینکه جداگر تمامی فازهای حرکت را دارا باشد ۲/۱۵ انتخاب شده و لازم به ذکر است در این مقاله فقط آنالیز تحت مؤلفه افقی نیروی زلزله انجام شده است. منحنی هیستریسیس، 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 ۳، ۴ و ۵ نشان داده شده است [۱۴].

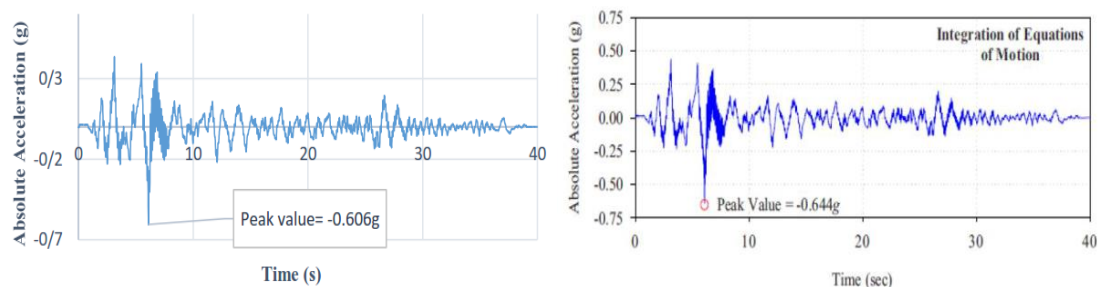
مقایسه نمودارهای ارائه شده در مقاله فنز و کنستانتینو با مدل ساخته شده در این پژوهش نشانگر آن است که مدل سازی جداگر TCFP در نرم افزار OpenSees از دقت کافی برای انجام تحلیل های مورد نظر برخوردار است. حداکثر اختلاف موجود بین نمودارهای مقایسه شده ۲/۱۴ درصد در نمودار مربوط به رفتار هیستریسیس بوده است. با توجه به اینکه مدلسازی 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.



شکل ۳: مقایسه منحنی هیستریسیس بدست آمده از برنامه OpenSees (سمت چپ) و مقاله فنز و کنستانتینو ۲۰۰۸ (سمت راست [۱۴])



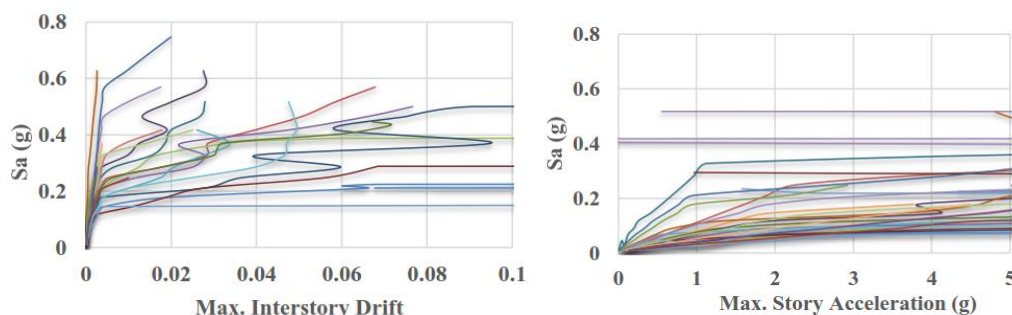
شکل ۴: مقایسه تاریخچه زمانی دررفت روسازه دارای جداگر TCFP از برنامه OpenSees (سمت چپ) و مقاله فنز و کنستانتینو ۲۰۰۸ (سمت راست [۱۴])



شکل ۵: مقایسه تاریخچه زمانی شتاب روسازه دارای جداگر TCFP از برنامه OpenSees (سمت چپ) و مقاله فنز و کنستانتینو ۲۰۰۸ (سمت راست [۱۴])

## ۴- تحلیل نتایج

برای انجام تحلیل دینامیکی فزاینده ابتدا باید پارامتری مناسب برای انعکاس شدت لرزه‌ای و نیز پارامتری مناسب برای تقاضای مهندسی<sup>۱۷</sup> (EDP) انتخاب شوند. پارامتر نشانگر شدت لرزه‌ای<sup>۱۸</sup> (IM) در این پژوهش شتاب طیفی با میرایی ۵ درصد، متناظر با دوره تناوب موثر جداگر انتخاب شده است. مطالعات گذشته نشان می‌دهد در سازه‌هایی که مد اول حرکت بر رفتار لرزه‌ای آن‌ها حکم فرماست که سازه‌های جداسازی شده نیز در این دسته قرار می‌گیرند، این معیار به پراکندگی کمتر نتایج در منحنی IDA می‌انجامد [۲۴]. بیشینه تغییر مکان نسبی و شتاب طبقات بعنوان پارامترهای تقاضای مهندسی در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است جهت انجام آنالیز فزاینده از الگوریتم Hunt & Fill پیشنهاد شده توسط وامواتسیکوس و کرنل<sup>۱۹</sup> [۲۴] استفاده شده است که در مقایسه با انجام این تحلیل بصورت عادی صرفه جویی زمانی قابل توجهی را باعث می‌گردد. در روش آنالیز دینامیکی فزاینده به صورت گام به گام<sup>۲۰</sup> آنالیز با ضریب کوچکی از شدت لرزه‌ای شروع شده و در هر گام مقدار ثابتی به آن افزوده می‌شود تا به نقطه شکست برسد. این نقطه می‌تواند بصورت حد مشخصی از EDP تعریف گردد (مثلا مقدار مشخصی از تغییر مکان نسبی) یا گامی باشد که در آن آنالیز دینامیکی توسط نرم افزار همگرا نمی‌شود. در نقطه مقابل الگوریتم Hunt & Fill قرار دارد که پس از شروع با ضریب کوچکی از شدت لرزه‌ای، گام‌های آنالیز بصورت تصاعد هندسی افزایش می‌یابند تا سازه به نقطه شکست برسد. بدیهی است معیار شکست در این الگوریتم با روش قبلی یکسان است. پس از رسیدن به نقطه شکست سازه، می‌توان با IM‌هایی کوچکتر از IM متناظر شکست، تحلیل‌های جدیدی طی چند گام انجام داد تا فضای بین گام‌های اولیه در نمودار IDA به نحو مناسبی پر شود. شکل ۶ نتایج آنالیز انجام شده برای روسازه دارای جداگر آونگی اصطکاکی سه‌گانه با دوره تناوب موثر ۴ ثانیه و میرایی ۱۵ درصد را نمایش می‌دهد.



شکل ۶: آنالیز دینامیکی فزاینده برای جداگر آونگی اصطکاکی سه‌گانه با دوره تناوب ۴ ثانیه و میرایی ۱۵ درصد

پس از انجام آنالیز فزاینده برای هر مدل احتمال وقوع هر یک از سطوح خرابی در مقابل تغییرات شدت لرزه‌ای محاسبه گردیده است. نحوه تعیین احتمال وقوع هر سطح خرابی بدین صورت بدست آمده که به ازای هر سطح شتاب طیفی (Sa) تعداد زلزله‌هایی که وارد سطح خرابی مورد نظر گردیده‌اند تعیین شده است. معیار وقوع هر سطح خرابی بصورت رسیدن دریافت حداکثر یا شتاب حداکثر به مقادیر حدی نشان داده شده در جدول ۱ بوده است. پس از آن احتمال وقوع خرابی بصورت تعداد زلزله‌های وارد شده به سطح خرابی تقسیم بر تعداد کل رکوردهای زلزله محاسبه گردیده است. بعنوان نمونه نتایج بدست آمده از آنالیز IDA برای سطوح خرابی ۱ تا ۴ در روسازه دارای جداگر آونگی اصطکاکی سه‌گانه با زمان تناوب ۵ ثانیه در شکل ۷ ارائه گشته است.

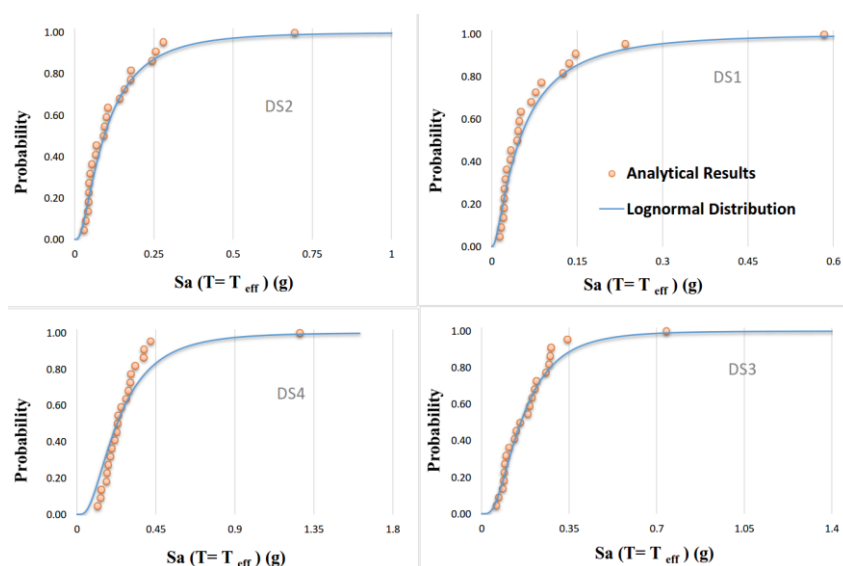
<sup>17</sup> Engineering Demand Parameter

<sup>18</sup> Intensity Measure

<sup>19</sup> Vamvatsikos & Cornell

<sup>20</sup> Stepping Algorithm

پس از تعیین احتمال وقوع هر سطح خرابی، برای راحتی مقایسه منحنی تجمعی احتمال<sup>۲۱</sup> (CDF) با توزیع لگ نرمال<sup>۲۲</sup> که دارای میانگین، انحراف معیار و میانه (Sa-50%) برابر با توزیع اصلی بوده بر نتایج منطبق شده که در شکل ۷ قابل مشاهده است. در مطالعات هان و همکاران [۴] در مورد منحنی‌های شکست سازه بتنی مقاوم سازی شده و ژانگ و هو<sup>۲۳</sup> [۲۵] برای بهینه سازی جداگرهای دوخطی مورد استفاده در پل ها نیز توزیع لگ نرمال بدین منظور استفاده گردیده است.



شکل ۷: احتمال وقوع سطوح خرابی مختلف به ازای مقدار Sa در روسازه دارای جداگر اصطکاکی سه گانه با دوره تناوب موثر ۵ ثانیه و میرایی ۱۵ درصد

جداول ۵ و ۶ مقادیر میانگین ( $\mu$ )، انحراف معیار ( $\sigma$ ) و میانه (Sa-50%) یا مقدار شدتی که احتمال وقوع آن ۵۰ درصد بوده است را برای توزیع های لگ نرمال تمامی جداگرهای پاندولی اصطکاکی در سازه‌های ۳ و ۶ طبقه نشان می‌دهد. مقدار Sa-50% یا میانه توزیع به عنوان شدت لرزه ای که احتمال وقوع آن در هر سطح خرابی ۵۰ درصد است از جمله پارامترهایی است که در محاسبات مربوط به احتمال خرابی در FEMA P-695 مورد استفاده قرار می‌گیرد. به این علت در کنار میانگین و انحراف معیار توزیع های بدست آمده به آن نیز پرداخته شده است.

همانگونه که در این جداول مشخص است با تغییر سطوح خرابی خفیف به سمت سطوح خرابی شدید و فروریزش، مقدار Sa-50% یا میانه توزیع افزایش می‌یابد. همچنین با بزرگتر شدن شدت خرابی پراکندگی نتایج حول نقطه میانگین نیز افزایش یافته است. با مقایسه نتایج جداول ۵ و ۶ برای انواع جداگرهای اصطکاکی در زمان تناوب‌های متفاوت متوجه می‌شویم که با افزایش زمان تناوب از میزان میانگین و میانه توزیع های لگ نرمال بدست آمده در سطوح خرابی مختلف کاسته می‌شود، یعنی جداگرهای با زمان تناوب بیشتر در Sa های کوچکتری به سطوح خرابی مورد نظر وارد می‌شوند. بعنوان مثال Sa-50% سطح خرابی ۴ در جداگرهای اصطکاکی سه گانه با زمان تناوب ۳، ۴ و ۵ ثانیه به ترتیب ۰/۰۵۱۷، ۰/۳۱۳ و ۰/۲۲۸ برابر شتاب جاذبه (g) بوده است.

<sup>21</sup> Cumulative Density Function

<sup>22</sup> Log-Normal

<sup>23</sup> Zhang & Huo

جدول ۵: مشخصات آماری توزیع احتمال لگ نرمال برای سطوح خرابی مختلف انواع جداگرهای اصطکاکی در سازه سه طبقه

Isolator	$T_{eff}(sec)$	Parameter	DS1	DS2	DS3	DS4
FPS	3	Mean	0.143	0.248	0.382	0.5239
		$\sigma$	0.162	0.211	0.2015	0.1849
		Sa-50	0.0946	0.189	0.3379	0.49403
	4	Mean	0.1053	0.164	0.2447	0.335
		$\sigma$	0.1433	0.152	0.145	0.1419
		Sa-50	0.0624	0.1211	0.21058	0.30882
	5	Mean	0.09176	0.17625	0.2707	0.3882
		$\sigma$	0.0949	0.1781	0.2128	0.2845
		Sa-50	0.06377	0.1239	0.2129	0.31319
DCFP	3	Mean	0.1298	0.2514	0.38599	0.5328
		$\sigma$	0.1423	0.2392	0.2263	0.20622
		Sa-50	0.0875	0.1821	0.3329	0.497
	4	Mean	0.1015	0.1648	0.2501	0.34521
		$\sigma$	0.13113	0.15722	0.15631	0.15114
		Sa-50	0.06213	0.11932	0.21209	0.31623
	5	Mean	0.09112	0.13257	0.18722	0.2586
		$\sigma$	0.1443	0.14821	0.14503	0.14009
		Sa-50	0.04863	0.08838	0.14801	0.2273
TCFP	3	Mean	0.13337	0.25335	0.393614	0.554166
		$\sigma$	0.1429	0.239698	0.229731	0.213635
		Sa-50	0.090953	0.184036	0.33995	0.517074
	4	Mean	0.09176	0.176249	0.270734	0.388286
		$\sigma$	0.094936	0.1781	0.212781	0.284527
		Sa-50	0.063771	0.123974	0.212886	0.313199
	5	Mean	0.08585	0.136407	0.195308	0.292657
		$\sigma$	0.12411	0.146088	0.1458	0.234003
		Sa-50	0.04884	0.093094	0.156508	0.228574

جدول ۶: مشخصات آماری توزیع احتمال لگ نرمال برای سطوح خرابی مختلف انواع جداگرهای اصطکاکی در سازه شش طبقه

Isolator	$T_{eff}(sec)$	Parameter	DS1	DS2	DS3	DS4
Fps	3	Mean	0.12937	0.23816	0.36868	0.50132
		$\sigma$	0.1555	0.2135	0.19725	0.17728
		Sa-50	0.082772	0.17734	0.32508	0.47264
	4	Mean	0.105829	0.16156	0.23796	0.31135
		$\sigma$	0.155414	0.14725	0.13846	0.13049
		Sa-50	0.059565	0.1194	0.20568	0.28715
	5	Mean	0.088779	0.3015	0.18336	0.23187
		$\sigma$	0.132997	0.12743	0.12778	0.12682
		Sa-50	0.049289	0.09299	0.15043	0.20344
DCFP	3	Mean	0.123858	0.24418	0.37679	0.51624
		$\sigma$	0.142072	0.23835	0.22389	0.20891
		Sa-50	0.081392	0.17474	0.32393	0.47854
	4	Mean	0.099455	0.1633	0.24196	0.32874
		$\sigma$	0.127829	0.15592	0.14997	0.14854
		Sa-50	0.061072	0.1181	0.20566	0.29958
	5	Mean	0.090907	0.1301	0.17621	0.23559
		$\sigma$	0.1446	0.14133	0.13356	0.1181
		Sa-50	0.048384	0.08812	0.14043	0.21061
TCFP	3	Mean	0.128587	0.24778	0.38646	0.55161
		$\sigma$	0.141046	0.23978	0.22448	0.21538
		Sa-50	0.086631	0.17805	0.33418	0.51384
	4	Mean	0.106447	0.16939	0.25821	0.36844
		$\sigma$	0.147093	0.16206	0.16107	0.17101
		Sa-50	0.062406	0.1224	0.21908	0.3342

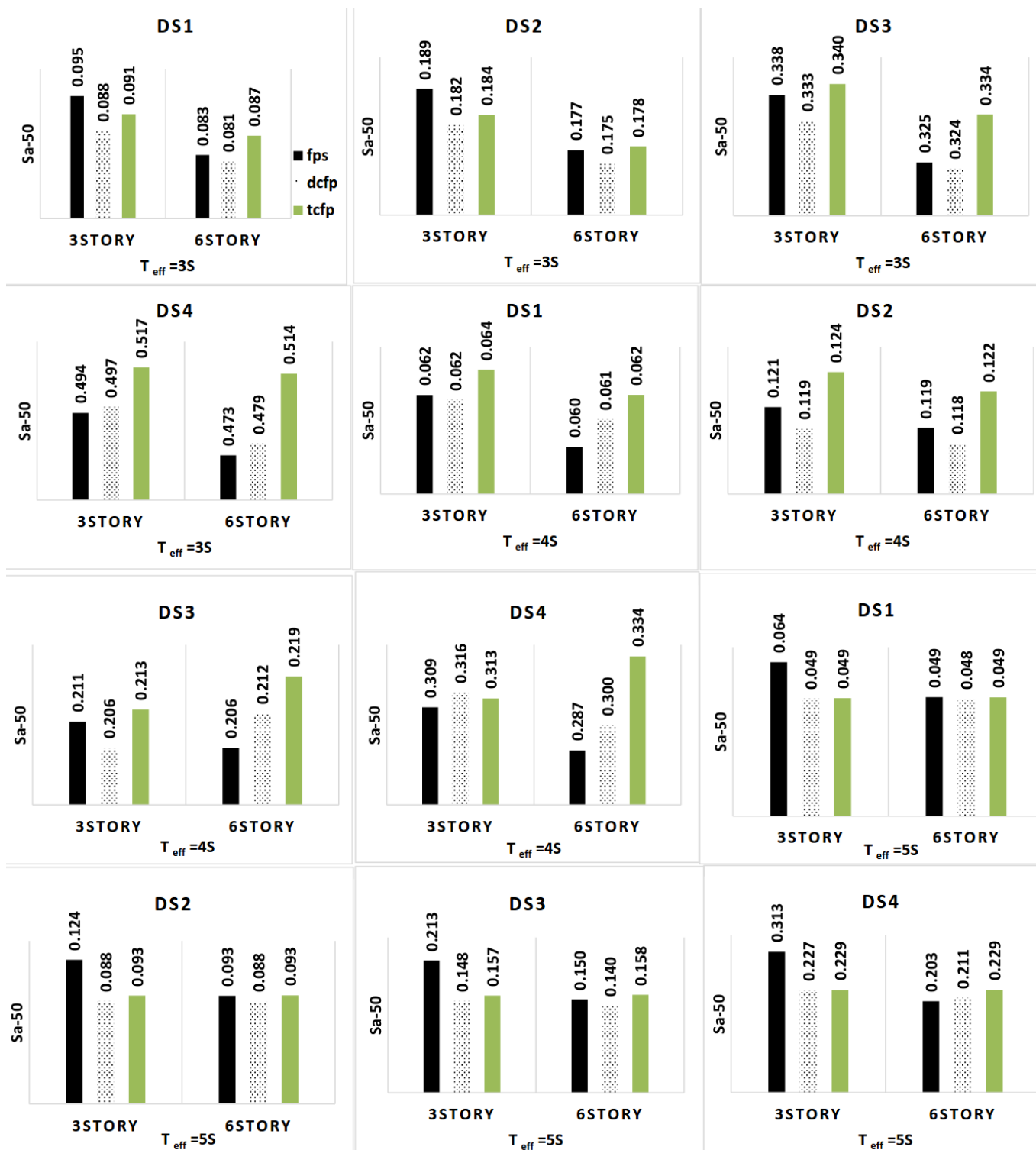
	Mean	0.086138	0.13206	0.19625	0.26575
5	$\sigma$	0.123808	0.13238	0.14546	0.15662
	Sa-50	0.049194	0.09327	0.15766	0.22895

## ۴-۱ مقایسه‌ی تاثیر ارتفاع طبقات در سطح خرابی با انواع جداگرها

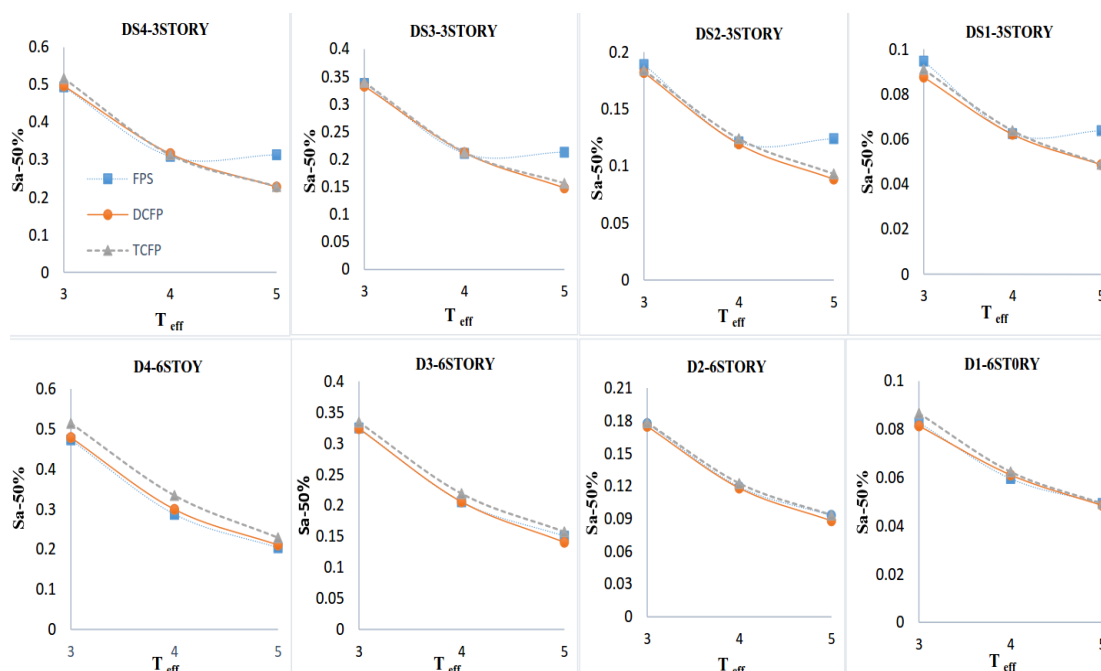
با توجه به آنالیز IDA انجام شده برای انواع جداگرهای پاندولی اصطکاکی و توزیع لگ نرمال بدست آمده مقایسه میانه توزیع بدست آمده برای سازه‌های ۳ و ۶ در شکل ۸ نمایش داده شده است. با توجه به شکل‌های نشان داده شده می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش ارتفاع سازه مقدار Sa کاهش می‌یابد. به عنوان مثال در جداگر اصطکاکی تکی (FPS) با دوره تناوب ۵ ثانیه در سطح خرابی ۱ مقدار میانه برای سازه ۳ طبقه ۰/۰۶۳۷۷ برابر g و برای سازه شش طبقه ۰/۰۴۹۲ برابر g می‌باشد. همانطور که در نمودارهای شکل ۸ مشاهده می‌شود میزان کاهش Sa با افزایش ارتفاع سازه در جداگرهای اصطکاکی تکی بیشتر از دو نوع دیگر می‌باشد. و تغییر ارتفاع سازه در جداگرهای اصطکاکی دوگانه (DCFP) و سه‌گانه (TCFP) تاثیر چندانی ندارد و مقادیر میانه توزیع در دو سازه تقریباً مساوی می‌باشد. مهمترین دلیل کاهش Sa در روسازه بلندتر، بیشتر بودن شتاب در طبقات بالایی نسبت به سازه کوتاه‌تر است. در تحقیقات گذشته [۱۰] نشان داده شده در سطوح خرابی بالا و همچنین در جداگرهای با زمان تناوب ۴ و ۵ ثانیه، شتاب حداکثر طبقه نقش بیشتری نسبت به دررفت در رسیدن به سطح خرابی دارد. بنابراین در سازه‌های بلندتر سطح خرابی زودتر و در Sa کوچک‌تری اتفاق می‌افتد. البته همانگونه که اشاره شد این مسئله برای سازه‌های دارای جداگر FPS بیش از دیگر سازه‌ها صادق است و با افزایش سطوح لغزش جداگر از شدت آن کاسته می‌شود به طوری که در جداگرهای TCFP این موضوع به حداقل رسیده است. برای نمونه در جداگر TCFP با زمان تناوب ۵ ثانیه میانه شتاب طیفی در سطوح خرابی ۱ تا ۴ برای هر دو سازه ۳ و ۶ طبقه به ترتیب ۰/۰۴۴g، ۰/۰۹۳g، ۰/۱۵۸g و ۰/۲۲۴g بوده است. این موضوع نشان از توانایی جداگر TCFP در کنترل شتاب سازه‌های بلندتر نیز دارد و اینکه تعداد طبقات سازه تاثیر چندانی بر عملکرد لرزهای آن نداشته‌اند.

## ۴-۲ مقایسه‌ی جداگرهای مختلف با زمان تناوب موثر متفاوت

در نمودارهای نشان داده شده در شکل ۹ میانه پاسخ‌های بدست آمده از ایزولاتورهای مختلف با زمان تناوب موثر متفاوت در سازه‌های سه و شش طبقه با چهار سطح خرابی (DS) تحت ۲۲ رکورد زلزله نشان داده شده است با توجه به این شکل‌ها مشخص است که در تمامی جداگرهای اصطکاکی با زمان تناوب بیشتر سطوح میانه توزیع دارای Sa کوچکتر است و دلیل آن این است که سطح ورودی شتاب به آن‌ها کمتر می‌باشد. در واقع کمتر بودن مقدار Sa متناظر سطوح خرابی در جداگرهای با زمان تناوب بالاتر به معنای عملکرد ضعیف آن‌ها نیست، بلکه با توجه به طیف پاسخ زلزله‌های مورد استفاده، این جداگرها از شدت لرزهای ورودی پایین‌تری برخوردارند و میزان انرژی ورودی زلزله در این جداگرها کمتر از جداگرهای با زمان تناوب کوتاه‌تر است. همچنین مقدار Sa جداگر اصطکاکی تکی بیشتر از جداگرهای اصطکاکی دوگانه و سه‌گانه می‌باشد که نشان دهنده عملکرد بهتر جداگرهای اصطکاکی سه‌گانه و دوگانه نسبت به جداگر اصطکاکی تکی می‌باشد این موضوع در سازه سه طبقه بر روی جداگرهای با زمان تناوب ۵ ثانیه بهتر قابل مشاهده است. نمودارهای جداگرهای دوگانه و سه‌گانه مشابه هم و تقریباً بر هم منطبق می‌باشند.



شکل ۸: نمودار شدت میانه برای انواع جداگرهای اصطکاکی با زمان تناوب موثر ۳، ۴ و ۵ ثانیه برای سطوح مختلف خرابی



شکل ۹: مقایسه‌ی مقادیر میانه توزیع در جداگرهای مختلف با زمان تناوب موثر متفاوت در سازه‌های سه و شش طبقه با چهار سطح خرابی

### ۳-۴ احتمال فرو ریزش مطابق آیین نامه ۶۹۵-FEMAP

برای بررسی عملکرد سازه‌های جداسازی شده با انواع جداگرهای اصطکاکی در سطح خرابی ۴ (فرو ریزش) از روش ارائه شده در دستورالعمل FEMA P-695 استفاده شده است. این روش به بررسی عملکرد سازه‌ها در سطح فرو ریزش و با استفاده از آنالیز دینامیکی فزاینده (IDA) می‌پردازد. همچنین در این دستورالعمل علاوه بر عدم قطعیت‌های ناشی از رکوردهای زلزله سایر عدم قطعیت‌های متحمل در طراحی و آزمایش مصالح سازه و در مدل‌سازی آن نیز در نظر گرفته می‌شود. عدم قطعیت زلزله حاصل از تفاوت‌های موجود بین رکوردهای مختلف از جمله بزرگی و محتوای فرکانسی هر رکورد می‌باشد. این مقدار را می‌توان با در نظر گرفتن رکوردهای متعدد زلزله و ترسیم نمودارهای آنالیز بار دینامیکی فزاینده تعیین نمود. عدم قطعیت مربوط به ملزومات طراحی برای پیش بینی سازه در مقابل مدهای شکست ناشناخته و غیر قابل پیش بینی لحاظ می‌گردد و عدم قطعیت مصالح به واسطه ثابت نبودن خصوصیات آزمایشگاهی آن‌ها باید در محاسبه مربوط به شکست لحاظ گردد. عدم قطعیت مربوط به مدلسازی نیز بستگی به کیفیت مدل تحلیلی مورد استفاده و توانایی آن در پیش بینی دقیق پاسخ‌های سازه مربوطه می‌گردد. اولین مرحله در این روش پس از انجام آنالیز IDA بدست آوردن منحنی شکنندگی در سطح خطر فرو ریزش است. بر طبق این روش از معیار دریافت به تنهایی در تعیین رسیدن سازه به سطح خطر فرو ریزش استفاده می‌شود. بنابراین منحنی شکنندگی مدل‌های مورد نظر بار دیگر و فقط با استفاده از معیار تغییر مکان نسبی سطح خطر فرو ریزش که در جدول ۱ ارائه گردیده بدست آمده است. نمونه این منحنی‌ها برای انواع جداگرهای اصطکاکی با زمان تناوب ۳، ۴ و ۵ ثانیه در شکل ۱۰ قابل مشاهده است. در مرحله بعد این منحنی با استفاده از رابطه ۳ تصحیح می‌گردد تا اثر عدم قطعیت‌های چهارگانه بالا در آن لحاظ شود:

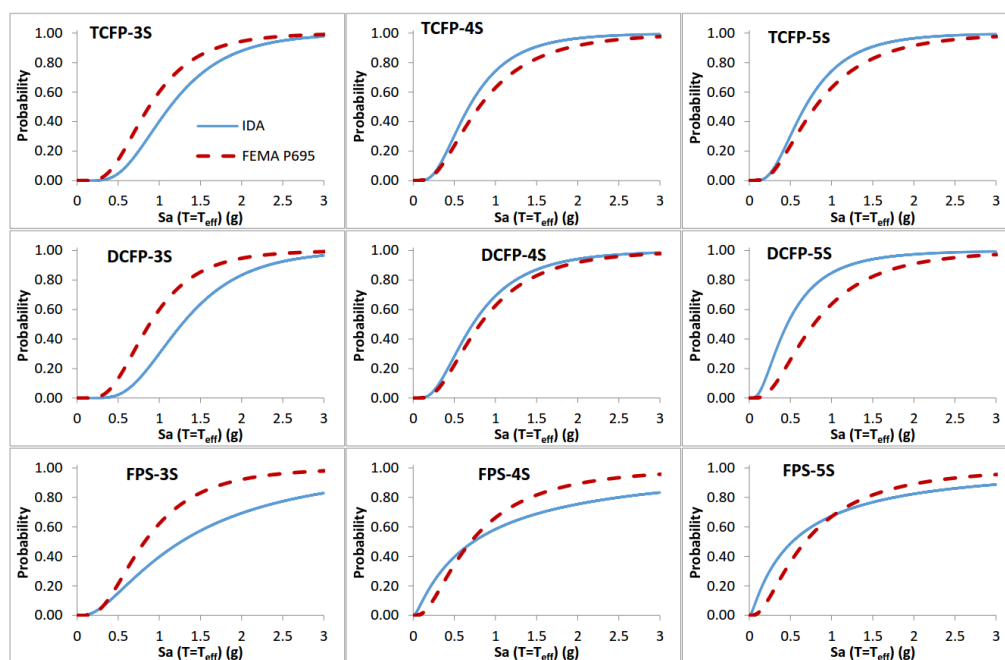
$$S_{CT} = \hat{S}_{CT} \cdot \lambda_{TOT} \quad (3)$$

در این رابطه  $S_{CT}$  و  $\hat{S}_{CT}$  منحنی شکنندگی بعد و قبل از تصحیح هستند. همچنین  $\lambda_{TOT}$  یک توزیع لگ نرمال با میانه یک و انحراف معیار برابر با عدم قطعیت کلی سازه است که با رابطه ۴ محاسبه می‌گردد:



$$\beta_{TOT} = \sqrt{\beta_{RTR}^2 + \beta_{DR}^2 + \beta_{TD}^2 + \beta_{MDL}^2} \quad (4)$$

در رابطه بالا  $\beta_{RTR}$ ،  $\beta_{DR}$ ،  $\beta_{TD}$ ،  $\beta_{MDL}$  به ترتیب عدم قطعیت‌های رکوردهای زلزله، طراحی، خصوصیات مصالح و مدلسازی می‌باشند [۲۲]. در این پژوهش مقدار عدم قطعیت رکوردهای زلزله بنا به توصیه FEMA مساوی با انحراف معیار توزیع‌های لگ نرمال بدست آمده از آنالیز IDA فرض شده است که با مقادیر ذکر شده متداول در آیین‌نامه (بین ۰/۲ تا ۰/۴) مطابقت دارد. عدم قطعیت طراحی، خصوصیات مصالح و مدلسازی نیز بنا به توصیه همین آیین‌نامه برای سازه‌های جداسازی شده به ترتیب ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۲ در نظر گرفته شده است. با این توصیف منحنی شکنندگی تصحیح شده برای انواع جداگرها در شکل ۱۰ قابل مشاهده است [۲۲].



شکل ۱۰: منحنی شکنندگی و تصحیح آن مطابق FEMA P-695 برای انواع جداگرهای اصطکاکی

بر مبنای منحنی تصحیح شده، احتمال وقوع فرو ریزش ( $P_f$ ) در هر مدل قابل محاسبه است. لازم به یادآوری است که این احتمال برای شدت لرزه‌ای ( $S_a$ ) متناظر با زمان تناوب موثر هر جداگر که از طیف MCE آیین‌نامه 7 ASCE بدست آمده محاسبه گردیده است. احتمال فرو ریزش برای مدل‌های مورد استفاده در این تحقیق در جدول ۷ ارائه گردیده است. طبق آیین‌نامه FEMA P-695 سازه‌ای از نظر طراحی مطلوب است که احتمال فرو ریزش آن کمتر از ۰/۱ باشد. مطابق این جدول تمامی مدل‌های مورد استفاده شرایط مطلوبی را از لحاظ طراحی داشته‌اند و احتمال خرابی جداگرهای اصطکاکی سه‌گانه نسبت به دو نوع دیگر کمتر می‌باشد که حاکی از عملکرد بهتر این نوع جداگر می‌باشد.

برای توضیح بهتر نتایج در مورد میانه شتاب طیفی متناظر با سطوح خرابی برای جداگرهای مختلف در این بخش از مفهوم نسبت حاشیه ایمنی فرو ریزش (CMR) که در دستور FEMA P-695 ارائه شده استفاده شده است. این نسبت که مطابق رابطه ۵ محاسبه می‌گردد ارتباط بین میانه شدت لرزه‌ای در سطح خرابی فرو ریزش ( $\hat{S}_{CT}$ ) و شتاب طیفی MCE مربوط به پیوند اصلی سازه ( $S_{MT}$ ) را نشان می‌دهد که هر چه این نسبت بزرگتر باشد سازه مورد نظر از ایمنی بالاتری برخوردار است.

$$CMR = \hat{S}_{CT} / S_{MT} \quad (5)$$

جدول ۷: احتمال فرو ریزش و حاشیه ایمنی فروریزش برای انواع جداگرهای اصطکاکی با دوره تناوب متفاوت

Isolator	$T_{eff}$	$P_f$	CMR
TCFP	3s	0.0228	2.30600
	4s	0.0277	3.075
	5s	0.0122	3.84000
DCFP	3s	0.0177	1.277
	4s	0.02327	2.55900
	5s	0.0178	2.128
FPS	3s	0.056	3.07438
	4s	0.0894	3.07572
	5s	0.0651	3.102756

نتایج بدست آمده قبلی بیانگر آن بود که جداگرهای با زمان تناوب بیشتر شتاب طیفی نظیر سطح خرابی کمتری را نشان می‌دهند. در نگاه اول این گونه به نظر می‌رسد که جداگرهای با زمان تناوب بالاتر عملکرد ضعیف‌تری دارند ولی با توجه به یکسان نبودن شتاب ورودی هر جداگر بر اساس طیف MCE آیین نامه ASCE 7 این مقایسه صحیح نیست. در این مرحله با توجه به این که منحنی شکنندگی با توجه به عدم قطعیت‌های ذکر شده در FEMA P-695 تصحیح شده، یافتن نسبت CMR می‌تواند نشان دهنده توانایی هر جداگر در جلوگیری از فرو ریزش سازه باشد. این مقادیر در جدول ۷ قابل مشاهده می‌باشد. با توجه به نتایج این جدول مشخص می‌گردد در جداگرهای TCFP با افزایش زمان تناوب، حاشیه ایمنی افزایش یافته و در برابر فرو ریزش عملکرد بهتری از خود نشان می‌دهد (با توجه به روابط زمان تناوب با افزایش  $(T_{eff})$  میزان  $(K_{eff})$  کاهش می‌یابد)، اما در جداگر FPS بر خلاف جداگر اصطکاکی سه‌گانه با طولانی‌تر شدن زمان تناوب مقدار حاشیه ایمنی تغییر چندانی نمی‌کند. بعنوان نمونه به افزایش زمان تناوب از ۳ به ۵ ثانیه، حاشیه ایمنی فروریزش در دو جداگر TCFP، DCFP به میزان ۶۶ درصد افزایش یافته ولی این افزایش در جداگر FPS تنها ۱ درصد بوده است. دلیل تاثیر بیشتر عملکرد TCFP در زمان تناوب‌های بالاتر این است که جداگر TCFP نسبت به جداگرهای پیشین این گروه بخصوص FPS سختی بیشتری در فازهای پایانی حرکت (فاز ۴ و ۵) خود دارد، که حرکت آن 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 داشت. بنابراین با توجه به پنج خطی بودن رفتار جداگر TCFP انتظار می‌رود رفتار لرزه‌ای مناسب‌تری در مقایسه با جداگرهای FPS و DCFP داشته باشد.

## ۵- نتیجه گیری:

در این مطالعه با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های موجود در یک سازه جداسازی شده نظیر عدم قطعیت رکورد زلزله، مدلسازی، طراحی و خصوصیات مصالح در چارچوبی احتمالاتی به بررسی مقایسه‌ی شکنندگی لرزه‌ای انواع جداگرهای پاندولی اصطکاکی پرداخته شده است. همچنین با در نظر گرفتن انواع سیستم‌های جداساز پاندولی اصطکاکی، دو نوع روسازه فولادی قاب خمشی با شکل پذیری ویژه

و پارامترهای موثر در طراحی مورد تحلیل و طراحی بر اساس جدیدترین آیین‌نامه‌های بارگذاری مورد طراحی قرار گرفته‌اند. این پارامترها به دو مورد، پیروید طراحی سازه‌های جداسازی شده بین ۳ الی ۵ ثانیه و ارتفاع طبقات سازه‌ها برابر ۳ و ۶ طبقه تقسیم بندی شده‌اند. در ادامه تحلیل‌های دینامیکی فزاینده غیر خطی به مدل‌ها اعمال و عملکرد سیستم‌ها در سطوح خرابی مختلف متناظر با خفیف، متوسط، گسترده و فرو ریزش در قالب منحنی شکنندگی برای اجزای سازه‌ای و غیرسازه‌ای مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج بدست آمده در این مطالعه بصورت خلاصه به شرح زیر است:

- با تغییر سطوح خرابی خفیف به سمت سطوح خرابی شدید و فروریزش مقدار  $S_a$  مرتبط با سطح خرابی نیز افزایش می‌یابد.
- انواع جداگرهای اصطکاکی با افزایش زمان تناوب از میزان میانگین و میانه توزیع های لگ نرمال بدست آمده در سطوح خرابی مختلف کاسته می‌شود.
- با توجه به آنالیز IDA انجام شده برای انواع جداگرهای پاندولی اصطکاکی و توزیع لگ نرمال بدست آمده در سازه‌های ۳ و ۶ طبقه می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش ارتفاع سازه مقدار  $S_a$  کاهش می‌یابد که به بیان دیگر سازه‌های با تعداد طبقات بیشتر زودتر به سطح خرابی مورد نظر وارد می‌شوند که مهمترین دلیل آن بزرگتر بودن شتاب طبقات در آن‌ها است.
- در تمامی جداگرها با زمان تناوب بیشتر سطوح خرابی با  $S_a$  کوچکتر اتفاق می‌افتد.
- عملکرد بهتر و احتمال خرابی سازه قرار گرفته بر روی جداگر TCFP نسبت به دو نوع دیگر بر پایه CMR و  $P_f$  مشهود است.
- در جداگرهای TCFP با افزایش زمان تناوب، حاشیه ایمنی افزایش یافته و در برابر فرو ریزش عملکرد بهتری از خود نشان می‌دهد اما در جداگر FPS بر خلاف جداگر اصطکاکی سه گانه با طولانی تر شدن زمان تناوب مقدار حاشیه ایمنی تغییر چندانی نمی‌کند. با افزایش زمان تناوب از ۳ به ۵ ثانیه، حاشیه ایمنی فروریزش در جداگر TCFP به میزان ۶۶ درصد افزایش یافته ولی این افزایش در جداگر FPS تنها ۱ درصد بوده است.

## مرجع

- [1] 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).
- [2] 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).
- [3] Loghman, V., Tajammolian H. and Khosnoudian F. 2017. "Effects of Rotational Components of Earthquakes on Seismic Responses of Triple Concave Friction Pendulum Base-Isolated Structures", Journal of Vibration and Control, Vol. 23(9); pp. 1495-1517.
- [4] Han R., Li Y. and Van de Lindt J. 2014. Seismic Risk of Base Isolated Non-Ductile Reinforced Concrete Buildings Considering Uncertainties and Mainshock- Aftershock Sequences. Structural Safety, Vol. 50, pp. 39-56.
- [5] Tavares D.H., Suescun J.R, Paultre P. and Padgett M. 2013. Seismic Fragility of a Highway Bridge in Quebec. Journal of Bridge Engineering, Vol. 18(11), pp. 1131- 1139.
- [6] Karim K.R. and Yamazaki F. 2007. Effect of Isolation on Fragility Curves of Highway Bridges Based on Simplified Approach. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 27(5), pp. 414-426.
- [7] Zhang J. and Huo Y. 2009. Evaluating Effectiveness and Optimum Design of Isolation Devices for Highway Bridges Using the Fragility Function Method. Engineering Structures, Vol. 31(8), pp. 1648-1660.

- [8] Siqueira G.H., Sanda A.S., Paultre P. and Padgett M. 2014. Fragility Curves for Isolated Bridges in Eastern Canada Using Experimental Results. *Engineering Structures*, Vol. 74, pp. 311-324.
- [9] Huang YN, Whittaker AS, Luco N. 2008. Performance Assessment of Conventional and Base-Isolated Nuclear Power Plants for Earthquake and Blast Loadings. Technical Report No. MCEER-08/0019, State University of New York at Buffalo: Buffalo, NY.
- [10] Tajamoolian, H. Khoshnoudian, F. Rezaei Rad, A. Loghman, V. 2018. Seismic Fragility Assessment of Asymmetric Structures Supported on TCFP Bearings Subjected to Near-field Earthquakes, *Structures*, Vol. 13, pp. 66-78.
- [11] ASCE 7-10. 2010. Minimum Design Loads for Building and Other Structures, ASCE/SEI 7-10. American Society of Civil Engineers, Reston, VA, USA.
- [12] AISC. 2010. Specification for Structural Steel Buildings, ANSI/AISC 360-10. American Institute of Steel Construction, Chicago, IL, USA.
- [13] AISC. 2010. Seismic Provisions for Structural Steel Buildings, ANSI/AISC 341-10. American Institute of Steel Construction, Chicago, IL, USA.
- [14] Fenz D. , Constantinou M. C. 2008. Modeling Triple Friction Pendulum Bearings for Response History Analysis. *Earthquake Spectra*, Vol. 24, No 4, pp. 1011-1028.
- [15] Morgan T.A. and Mahin S.A. 2010. Achieving Reliable Seismic Performance Enhancement Using Multi-Stage Friction Pendulum Isolators. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 39, pp. 1443-1461.
- [16] 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.
- [17] Loghman V., Khosnoudian F. and Banazadeh M. 2015. Effects of Vertical Component of Earthquake on Seismic Responses of Triple Concave Friction Pendulum Base Isolated Structures. *Journal of Vibration and Control*, Vol. 21(11), pp. 2099-2113.
- [18] Fenz D. and Constantinou M.C. 2008. Mechanical Behavior of Multi-Spherical Sliding Bearings. Report No. MCEER-08/0007, State University of New York at Buffalo, Buffalo, NY, USA.
- [19] PEER "Open System for Earthquake Engineering Simulation (OpenSees)" development platform by the Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER), <http://opensees.berkeley.edu> , 2008.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] FEMA P-695. 2009. Quantification of Buildings Seismic Performance Factors. Federal Emergency Management Agency, Washington, DC, USA.
- [23] FEMA-NIBS. 2003. Earthquake Loss Estimation Methodology, HAZUS-MH MR4, Technical Manual. Federal Emergency Management Agency and National Institute of Building Sciences, Washington, DC.
- [24] Vamvatsikos D. and Cornell C.A. 2003. Incremental Dynamic Analysis", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 31, pp. 491-514.
- [25] Zhang J. and Huo Y. 2009. Evaluating Effectiveness and Optimum Design of Isolation Devices for Highway Bridges Using the Fragility Function Method. *Engineering Structures*, Vol. 31(8), pp. 1648-1660.