

## رفتار لرزه‌ای سازه‌های نامتقارن جداسازی شده با جداگرهای آونگی اصطکاکی سه‌گانه تحت اثر پالس‌های ساده شده زلزله‌های حوزه نزدیک

حامد تجملیان<sup>۱\*</sup>، فرامرز خوشنودیان<sup>۲</sup>

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

۲- استاد، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

### چکیده

در این مطالعه اثر خروج از مرکزیت جرمی روسازه و خروج از مرکزیت در سختی جداگرها در تشدید رفتار لرزه‌ای سازه‌های جداسازی شده با جداگرهای آونگی اصطکاکی سه‌گانه (TCFP) بررسی شده است. برای انجام این موضوع، پالس‌های ساده شده زلزله‌های حوزه نزدیک از جمله پالس جهت‌پذیری پیش‌رونده شکست و جابجایی ماندگار زمین مورد استفاده قرار گرفته و تأثیر دو خصوصیت مهم این پالس‌ها یعنی زمان تناوب و حداکثر سرعت زمین ارزیابی شده است. دامنه مطالعات صورت گرفته شامل روسازه‌هایی با تعداد طبقات و نسبت طول به عرض پلان مختلف بوده است. با بررسی پاسخ‌های مختلف سازه از جمله حداکثر برش پایه و جابجایی جداگرها و حداکثر شتاب و دریافت روسازه مشخص گردیده وجود نامتقارنی می‌تواند باعث افزایش شدید پاسخ‌های سازه جداسازی شده گردد. این افزایش در مورد خروج از مرکزیت جرمی روسازه شدیدتر از خروج از مرکزیت در سختی جداگرها بوده به طوری که در یک سازه ۶ طبقه با پلان مربعی، خروج از مرکزیت جرمی میزان برش پایه را به ۲،۵۵ برابر حالت متقارن افزایش داده است. در شرایط مشابه جابجایی جداگرها و شتاب بام یک سازه ۹ طبقه به ترتیب ۱،۴۹ و ۲،۱۶ برابر نسبت به سازه متقارن رشد داشته است. همچنین نشان داده شده که وجود خروج از مرکزیت جرمی در حالت وقوع پالس‌های جهت‌پذیری پیش‌رونده شکست می‌تواند دریافت سازه را به مقادیر نزدیک به میزان مجاز آیین‌نامه‌ای سوق دهد؛ بنابراین لازم است در طراحی سازه‌های دارای جداگر لرزه‌ای دقت کافی به این امر صورت گیرد.

کلمات کلیدی: جداگر TCFP، زلزله حوزه نزدیک، پالس ساده شده، خروج از مرکزیت، پیچش.

\* نویسنده مسئول: حامد تجملیان

پست الکترونیکی: h.tajammolian@yazd.ac.ir

DOI: 10.22065/jsce.2017.86483.1197

شناسه دیجیتال

<http://dx.doi.org/10.22065/jsce.2017.86483.1197>

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۱۱/۲۰، تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۰۳/۲۵

## ۱- مقدمه

دیدگاه‌های نوین در کنترل پاسخ‌های سازه در برابر زلزله، شامل طیف وسیعی از اقدامات از جمله افزایش سختی، افزایش شکل‌پذیری و همچنین استهلاک انرژی زلزله می‌باشد. از این میان روش جداسازی لرزه‌ای با کاهش انرژی ورودی به روسازه به همراه افزایش ظرفیت تغییرمکان صلب سیستم منجر به کاهش قابل ملاحظه خرابی در اجزای اصلی سازه می‌گردد. از آنجا که این کاهش خرابی باعث افزایش قابلیت بهره‌برداری بی‌وقفه سازه در هنگام وقوع زمین‌لرزه‌های شدید می‌شود، استفاده از سیستم جداساز لرزه‌ای استفاده 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 کلی الاستومری و اصطکاکی تقسیم نمود. جداگرهای آونگی اصطکاکی (SFP)، آونگی اصطکاکی دو گانه<sup>۱</sup> (DCFP) و آونگی اصطکاکی سه گانه<sup>۲</sup> (TCFP) از انواع جداگرهای اصطکاکی می‌باشند.

جداگر TCFP که مقطع آن در شکل a.۱ 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. شعاع مؤثر هر کدام از صفحات جداگر با  $R_i$  و ظرفیت جابجایی آنها با  $d_i$  مشخص گردیده است. سطح تماس هر یک از صفحات با صفحه دیگر با یک ماده غیر فلزی پوشانده می‌شود که ضرایب اصطکاک این مواد برای صفحات از پایین به بالا به ترتیب  $\mu_1$  تا  $\mu_4$  می‌باشد. 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 ۱ تا ۵ مشخص می‌گردد در شکل b.۱ نشان داده شده است. مهمترین وجه تمایز جداگر TCFP نسبت به جداگرهای پیشین این گروه وجود سختی بیشتر جداگر در فازهای پایانی حرکت (فاز ۴ و ۵) است. بعنوان نمونه سختی جداگر در پایان دو فاز حرکتی ۳ و ۵ در شکل b.۱ نشان داده شده است. همانگونه که مشخص است سختی در انتهای فاز ۵ حرکت ( $K_{eff5}$ ) بیش از سختی در پایان فاز ۳ ( $K_{eff3}$ ) است، بنابراین می‌توان از این جداگر توقع تغییرمکان کمتر نسبت به انواع دیگر جداگرهای اصطکاکی در زلزله‌های با سطوح خطر بالاتر را انتظار داشت. بنابراین با توجه به پنج خطی بودن رفتار جداگر TCFP انتظار می‌رود رفتار لرزه‌ای مناسبتری در مقایسه با جداگرهای SFP و DCFP داشته باشد.

فنز و کنستانینو [۱،۲] روابط نیرو-تغییر مکان جداگرهای TCFP را ارائه داده‌اند. آنها همچنین آزمایش‌های متعددی جهت صحت‌سنجی معادلات پیشنهادی انجام داده‌اند. بکر و میهین [۳] مدلی برای پیش‌بینی حرکت این جداگر تحت تحریک زلزله دو جهته ارائه نموده‌اند. مورگان و میهین [۴] با تعریف سطوح خرابی مختلف سازه‌های جداسازی شده در سطوح خطر مختلف زلزله، به بررسی سازه‌های جداسازی شده با TCFP از منظر طراحی بر اساس عملکرد پرداخته‌اند. دائو و همکاران [۵] مدلی جدید برای تحلیل سبب‌دهی سازه‌های دارای TCFP در نرم‌افزار OpenSees ارائه نموده‌اند و دقت مدل خود را با آزمایش میز لرزه یک سازه ۵ طبقه با مقیاس واقعی نشان داده‌اند.

در بررسی پیش‌سازه‌ها بطور معمول دو نوع خروج از مرکزیت در نظر گرفته می‌شود: خروج از مرکزیت جرمی و خروج از مرکزیت سختی. در سازه‌های جداسازی شده از آنجا که بیشترین اثر نیروهای جانبی در جداگرها متمرکز می‌شود، مرکز سختی جداگرها نیز دارای اهمیت می‌باشد [۶]. آلمیزن و دلارا [۷] به بررسی اثر پیش‌اتفاقی در سازه‌های جداسازی شده با جداگرهای آونگ اصطکاکی تکی تحت زلزله‌های حوزه دور پرداخته‌اند. از آنجا که در جداگرهای اصطکاکی، نیروی اصطکاک جداگر تابعی از نیروی محوری آن می‌باشد، آنها چنین فرض نموده‌اند که خروج از مرکزیت جرمی منجر به جابجایی مرکز سختی ایزولاتورها می‌گردد. از این رو با هم محور شدن مرکز سختی جداگرها و مرکز جرم، عدم تقارن جرمی تا حد زیادی کنترل می‌گردد و تأثیر زیادی در افزایش جابجایی جداگر نمی‌گذارد. تناکلونگا و گومز سوبرون [۸] اثر خروج از مرکزیت جرمی روسازه در افزایش پاسخ‌های مختلف سیستم جداسازی شده با جداگرهای الاستومریک را مطالعه نموده‌اند. تناکلونگا و اسکامیلاکروز [۹] اثر خروج از مرکزیت جرمی و سختی روسازه در پیش‌سازه‌های دارای جداگر دوخطی را مورد توجه

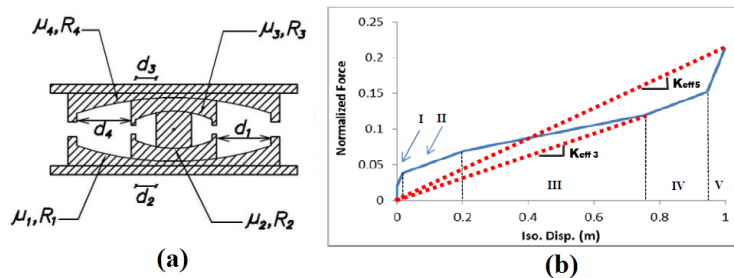
1 Single Friction Pendulum  
2 Double Concave Friction Pendulum  
3 Triple Concave Friction Pendulum

قرار داده‌اند. آنها نشان داده‌اند اثر خروج از مرکزیت جرمی در روسازه بسیار بیش از خروج از مرکزیت سختی در پیچش کل سیستم می‌باشد. تمامی مطالعات انجام شده توسط این محققین مربوط به زلزله‌های حوزه دور بوده است. خوشنودیان و ایمانی‌آزاد [۱۰] از دیگر پژوهشگرانی هستند که در مطالعه‌شان اثر خروج از مرکزیت مرکز جرم و مرکز سختی جداگرها را مورد توجه قرار داده‌اند.

در پژوهش پیش‌رو اثر پیچش ناشی از خروج از مرکزیت جرمی روسازه ( $E_s$ ) و خروج از مرکزیت سختی جداگرها ( $E_B$ ) بر روی پاسخ‌های سازه دارای جداگر TCFP بصورت گسترده‌ای مورد بررسی قرار گرفته است. برای در نظر گرفتن طیف وسیعی از خصوصیات این رکوردها، از جمله زمان تناوب پالس اصلی و حداکثر سرعت زمین از پالس‌های مصنوعی ساده شده استفاده شده است. در میان ادبیات فنی موجود برای جداگر TCFP مطالعه‌ای در مورد پیچش روسازه بر اثر خروج از مرکزیت جرم و جداگر وجود ندارد. هرچند مطالعات قبلی حاکی از اثر قابل توجه پیچش زلزله‌های حوزه دور و نزدیک بر روی پاسخ جداگرهای دارای رفتار دو خطی است، ولی با توجه به اینکه رفتار جداگرهای TCFP دارای رژیم ۵ خطی است مسلماً پاسخ‌های متفاوتی نسبت به سایر جداگرهایی که تابحال بررسی شده‌اند پیش‌بینی می‌شود. با توجه به سخت شونده‌گی رفتار این نوع جداگر در مراحل پایانی حرکت، انتظار می‌رود در محدوده زلزله‌های حوزه نزدیک با پیروی پالس و سرعت بالا، این جداگر اثر بهتری در محدود نمودن میزان پیچش سازه از خود نشان دهد.

## ۲- امواج حوزه نزدیک ساده سازی شده

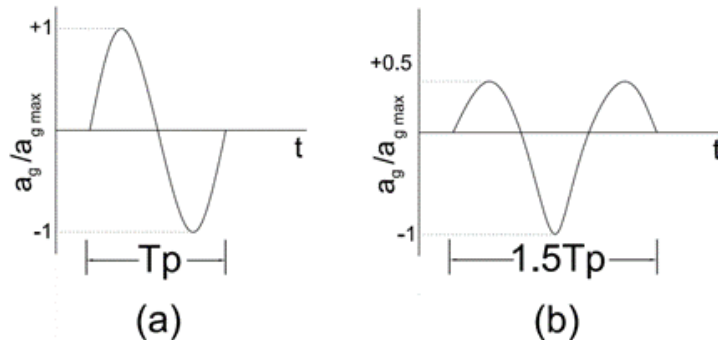
رکورد زلزله‌های حوزه نزدیک دارای مشخصات مهم و قابل توجهی می‌باشد که آنها را از رکوردهای زلزله حوزه دور متمایز می‌سازد. مهمترین این مشخصات پالس‌های سرعت با زمان تناوب بلند و نیز محتوای فرکانسی بالا می‌باشد [۱۱]. بر اساس مطالعات بیکر [۱۲] در زمینه تجزیه رکوردهای زلزله حوزه نزدیک بر اساس محتوای فرکانسی و با بهره‌گیری از روش تابع تبدیل موجک، رکوردهای حوزه نزدیک را می‌توان به دو دسته کلی پالس‌مانند و غیر پالس‌مانند تقسیم‌بندی کرد. مطالعات گذشته نشان می‌دهد که رکوردهای زلزله حوزه نزدیک پالس‌مانند تأثیرات قابل توجه و مخربی بر سازه‌ها از خود بر جای می‌گذارد. بطوری‌که معیارهای متعارف در طراحی لرزه‌ای نمی‌تواند جوابگوی نیازهای لرزه‌ای سازه در شرایط وقوع زلزله‌های حوزه نزدیک پالس‌مانند باشد [۱۳].



شکل ۱: (a) جداگر TCFP (b) رژیم حرکتی جداگر.

داده‌های ثبت شده از رکوردهای زلزله‌های حوزه نزدیک نشان می‌دهد که یکی از عوامل عمده در پیدایش پالس‌های با زمان تناوب بلند، ناشی از جهت‌پذیری پیش‌رونده شکست می‌باشد. علاوه بر این جابجایی ماندگار زمین‌نیز از عوامل تشکیل پالس‌های با زمان تناوب بلند در رکوردهای زلزله حوزه نزدیک می‌باشد. پالس جهت‌پذیری پیش‌رونده شکست غالباً خود را به صورت یک تک پالس با دامنه بزرگ و زمان تناوب بلند آشکار می‌سازد که عموماً در بازه زمانی آغازین تحریک رخ می‌دهد و در راستای عمود بر امتداد گسل انتشار می‌یابد. پالس جابجایی ماندگار زمین در نتیجه تغییر شکل ماندگار پوسته زمین در مرز گسل تشکیل می‌شود و به صورت تغییر مکان یک جهت‌ماندگار در رکورد ثبت شده زلزله حوزه نزدیک قابل شناسایی است [۱۴].

در این پژوهش جهت بررسی اثر زلزله‌های حوزه نزدیک پالس مانند از امواج ساده شده نشان داده شده در شکل ۲ که توسط ساسانی و برترو [۱۵]. پیشنهاد گردیده استفاده شده است. مطالعات قبلی بیانگر این واقعیت است که زمان تناوب پالس جهت‌پذیری پیش‌رونده ۱٫۵ تا ۲٫۵ برابر زمان تناوب پالس جابجایی ماندگار است [۱۶]. در این مطالعات کمینه این مقدار یعنی ۱٫۵ برابر مورد استفاده قرار گرفته است. جهت پیش‌بینی پاسخ سازه جداسازی شده با TCFP در برابر طیف وسیعی از پالس‌های حوزه نزدیک، زمان تناوب پالس از ۱ تا ۱۰ ثانیه متغیر بوده است. همچنین هر کدام از پالس‌های مورد استفاده با زمان تناوب‌های متفاوت به نحوی مقیاس شده‌اند تا حداکثر سرعت زمین (PGV) در آنها برابر با مقادیر ۴۰، ۸۰، ۱۲۰، ۱۶۰ و ۲۰۰ سانتیمتر بر ثانیه باشد.



شکل ۲: امواج حوزه نزدیک ساده سازی شده (a) جهت‌پذیری پیش‌رونده (b) تغییر شکل ماندگار زمین [۱۵].

### ۳- مدل‌سازی جداگر و روسازه

فنز و کنستانتینو [۲] مدلی سری برای پیش‌بینی رفتار جداگرهای TCFP ارائه کرده‌اند. در این مدل فرض شده که صفحات داخلی جداگر یعنی سطوح ۲ و ۳ دارای ضریب اصطکاک و شعاع مؤثر یکسان می‌باشند. در این مدل هر صفحه با یک المان SFP مدل‌سازی می‌شود و سه سطح موجود یعنی سطوح ۱، ۴ و مجموع ۲ و ۳ بصورت سه المان سری بهم متصل می‌گردد. وجود تعدادی المان Gap در هر جهت به شبیه‌سازی رفتار سخت شونده المان جداگر در فازهای ۴ و ۵ حرکت آن (مطابق شکل ۱b) کمک می‌کند. المان TCFP ساخته شده امکان مدل‌سازی در نرم افزار SAP2000 را داشته و روابط ریاضی آن به تفصیل در مرجع [۲] قابل دسترسی است.

دو پارامتر بسیار مؤثر در انتخاب جداگرها برای یک سازه، زمان تناوب مؤثر (Teff) و میرایی مؤثر ( $\xi_{eff}$ ) جداگر هستند که روابط مربوط به محاسبه این دو پارامتر برای جداگرهای TCFP در مرجع [۳] ارائه شده است. ظرفیت تغییر مکان جداگر با توجه به سطح خطر مورد نظر در طراحی و بزرگی زلزله‌های مورد استفاده توسط روابط موجود در آیین‌نامه ASCE 7 تعیین می‌گردد [۱۷]. این ظرفیت بر اساس طراحی صورت گرفته در سطح خطر زلزله MCE در این تحقیق، برای جداگری با  $T_{eff}=5$  s و  $\xi_{eff}=15\%$  برابر با ۱ متر در نظر گرفته شده است.

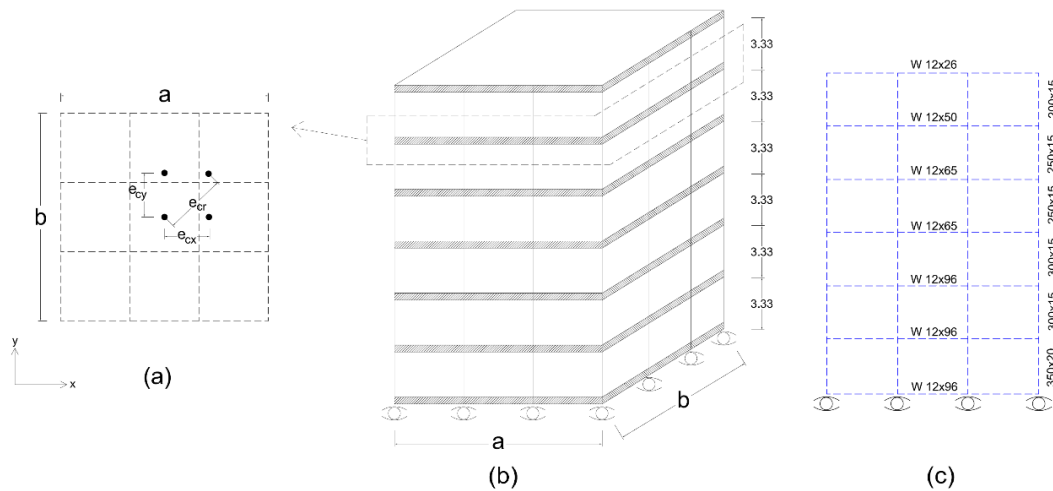
روسازه‌های مورد مطالعه در این پژوهش، دارای پلان مستطیل شکل به ابعاد  $a \times b$  و ارتفاع H بوده‌اند (شکل ۳). ابعاد تمامی دهانه‌های پلان در دو طرف ۵ متر و ارتفاع هر طبقه ۳٫۳۳ متر بوده است. لیست روسازه‌های طراحی شده و ابعاد پلان آنها در جدول شماره ۱ ارائه شده است. بارگذاری روسازه فولادی مطابق آیین‌نامه ASCE 7-2010 انجام شده است [۱۷]. مقدار بار زنده و مرده کف‌ها به ترتیب ۸ و ۴ کیلونیوتن بر مترمربع در نظر گرفته شده و بار زلزله به روش استاتیکی معادل همین آیین‌نامه محاسبه گردیده است. از آنجا که حداکثر ارتفاع مجاز جهت استفاده از روش معادل استاتیکی در سازه‌های جداسازی شده ۲۰ متر است، برای سازه ۹ طبقه با ارتفاع ۳۰ متر (روسازه شماره ۳) طراحی با روش طیفی نیز کنترل گردیده است. همچنین طراحی روسازه فلزی از نوع قاب خمشی ویژه و بر مبنای آیین‌نامه AISC 360-2010 صورت گرفته [۱۸] و مقاطع بدست آمده برای روسازه شماره ۲ بعنوان نمونه در شکل c.۴ نشان داده شده است.

جدول ۱: مشخصات ابعادی روسازه‌های طراحی شده

No.	a (m)	b (m)	H (m)	$\beta=H/b$	$\gamma=a/b$
1	15	15	10	0.67	1
2	15	15	20	1.33	1
3	30	15	20	1.33	2
4	45	15	20	1.33	3
5	15	15	2	1.33	1

#### ۴- اثر خصوصیات موج حوزه نزدیک

برای بررسی اثر امواج مختلف زلزله حوزه نزدیک بر روی سازه‌های جداسازی شده با TCFP پاسخ‌های حداکثر برش پایه سازه و حداکثر جابجایی جداگر که مهمترین پاسخ‌ها در سطح جداگر هستند مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین برای مطالعه رفتار لرزهای روسازه دو پاسخ حداکثر شتاب بام و دررفت طبقات مدنظر بوده است. سازه سه بعدی مورد مطالعه تحت پالس‌های حوزه نزدیک در یک جهت (y) قرار گرفته و برآیند برداری پاسخ‌ها در دو جهت x و y مبنای مقایسه قرار گرفته است.



شکل ۳: سازه مورد مطالعه (a) پلان سازه و انواع خروج از مرکزیت (b) نمای سه‌بعدی سازه (c) مقاطع بکار رفته در روسازه شماره ۲.

#### ۵- خروج از مرکزیت جرمی روسازه و سختی جداگر

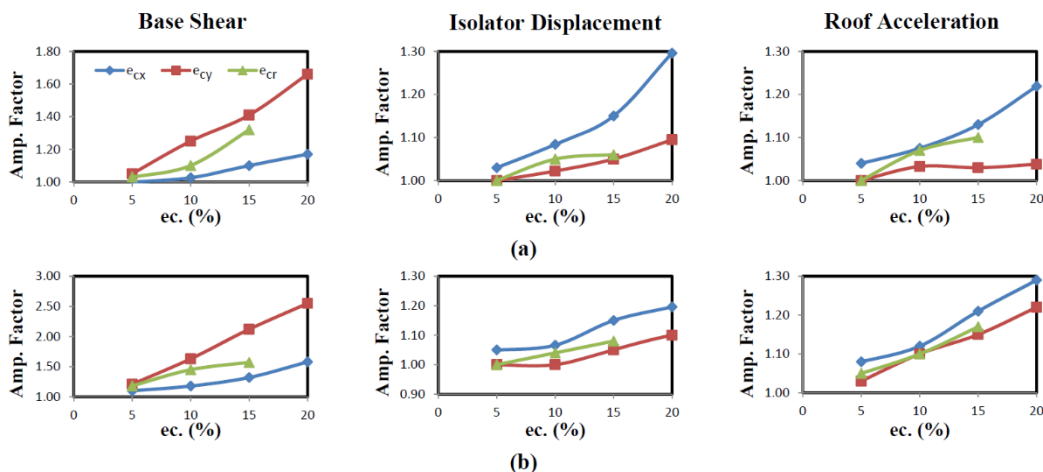
جهت مطالعه اثرات خروج از مرکزیت جرمی روسازه و سختی جداگر، سه دسته خروج از مرکزیت طولی (ecx) به میزان ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد طول سازه (a)، عرضی (ecy) به میزان ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد عرض سازه (b) و قطری (ecr) به میزان ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد قطر سازه مطابق شکل ۳a در نظر گرفته شده است. نکته قابل توجه در این بخش این است که جهت ارزیابی اثر انواع خروج از مرکزیت محتمل، خروج از مرکزیت جرمی روسازه (ES) و سختی جداگر (EB) به تنهایی و بصورت همزمان (ES&B) لحاظ شده و نتایج هر یک به تفکیک ارائه گردیده است. برای راحتی مقایسه نتایج، نتایج مربوط به سازه‌های دارای خروج از مرکزیت به پاسخ مشابه در سازه بدون خروج از مرکزیت جرمی نرمال شده است (رابطه ۱)، بنابراین نتایج گراف‌ها و جداول این بخش نشان دهنده افزایش یا کاهش پاسخ حداکثر در صورت وجود خروج از مرکزیت است.

$$\text{Amp. Factor} = \frac{\text{Response (Assymmetric Model)}}{\text{Response (Symetric Model)}} \quad (1)$$

اثر خروج از مرکزیت‌های متفاوت در افزایش پاسخ مدل تحت زلزله‌های حوزه نزدیک با پریود پالس‌های ۱ تا ۱۰ ثانیه و سرعت‌های ۴۰ تا ۲۰۰ سانتیمتر بر ثانیه در این قسمت مورد بررسی قرار گرفته است. برای درک بهتر حداکثر میزان تأثیر خروج از مرکزیت، از بین ۵۰ تحلیل صورت گرفته برای هر مدل (۱۰ پریود پالس و ۵ سطح سرعت مختلف) بیشترین میزان افزایش هر پاسخ بر اثر خروج از مرکزیت انتخاب شده و در تصاویر این قسمت ارائه شده است. برای رعایت اختصار فقط به بررسی نتایج روسازه ۶ طبقه با پلان مربع و نسبت لاغری ۱،۳۳ می‌پردازیم.

شکل ۶ ضرایب افزایش پاسخ در حالت وجود خروج از مرکزیت جرمی روسازه را نشان می‌دهد. در این شکل تأثیر خروج از مرکزیت عرضی (ecy) در تشدید میزان برش پایه بیش از سایر انواع خروج از مرکزیت بوده است. این افزایش در زلزله جابجایی ماندگار به ۱،۶۶ و در زلزله جهت‌پذیری پیش‌رونده به ۲،۵۵ برابر حالت بدون خروج از مرکزیت نیز رسیده است. مهم‌ترین دلیل برای تأثیر بیشتر خروج از مرکزیت عرضی، ارتباط مستقیم مقدار برش پایه و همچنین سختی جانبی ایزولاتورهای اصطکاکی با بار قائم آنهاست. خروج از مرکزیت عرضی احتمال وقوع حرکت گهواره‌ای سازه طی زلزله را افزایش می‌دهد؛ بدین صورت که بار محوری جداگرهایی که در قسمتی از سازه هستند که مرکز جرم به آن جهت متمایل گشته را افزایش می‌دهد و باعث کاهش نیروی محوری جداگرها در سمت مخالف می‌گردد. تفاوت موجود در نیروی محوری جداگرها به عدم یکنواختی سختی جانبی آنها می‌انجامد. از آنجا که در این نوع خروج از مرکزیت نیروی زلزله به میزان یکنواخت بین جداگرها توزیع می‌شود، تفاوت سختی جداگرها منجر به تفاوت در میزان نیروی برش آنها شده و در مجموع منجر به افزایش بیشتر برش پایه می‌گردد.

حساسیت پاسخ‌های تغییر مکان و شتاب در شکل ۶ به میزان خروج از مرکزیت طولی (ecx) بیش از سایر خروج از مرکزیت‌ها بوده است. در مقدار حداکثر خروج از مرکزیت طولی تغییر مکان تحت امواج جابجایی ماندگار و شتاب تحت امواج جهت‌پذیری پیش‌رونده به ترتیب ۱،۳ و ۱،۲۹ نسبت به حالت متقارن افزایش پیدا کرده‌اند. توجه به این نکته ضروری است که با توجه به اعمال مؤلفه زلزله در جهت عرضی (y)، افزایش خروج از مرکزیت طولی باعث بزرگ شدن بازوی پیچش در سازه می‌گردد که افزایش تغییر مکان جداگر و شتاب روسازه را در پی خواهد داشت. همچنین لازم به توجه است که در اکثر پاسخ‌های ارائه شده تأثیر خروج از مرکزیت قطری در حد واسط محدوده تغییرات مربوط به خروج از مرکزیت طولی و عرضی قرار داشته است.

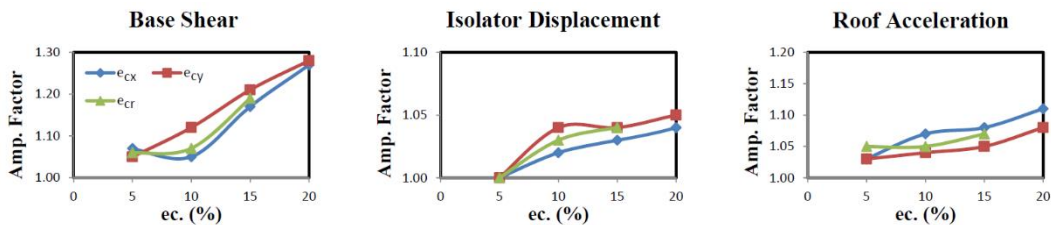


شکل ۶: حداکثر پاسخ سازه با ضرایب  $(\gamma=1, \beta=1.33)$  دارای خروج از مرکزیت روسازه  $(E_s)$  متفاوت به امواج با  $Tp=1-10$  s,  $PGV=40$  200 cm/s

a) Fling Step b) Forward Directivity

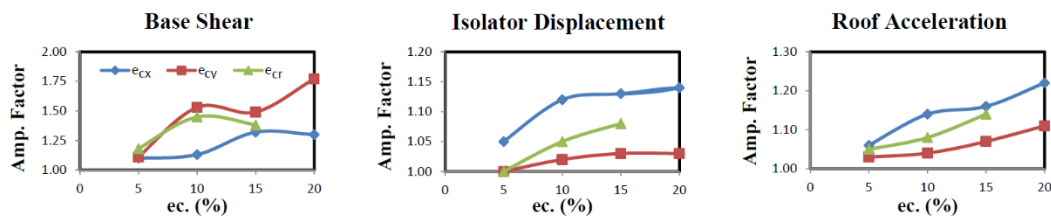
در شکل ۷ پاسخ‌های مختلف سازه با توجه به تغییرات خروج از مرکزیت مرکز سختی جداگر ( $E_B$ ) ارائه گردیده است. در این شکل تمامی پاسخ‌ها کمتر از مقادیر ارائه شده در شکل ۶ است و این موضوع مؤید این مطلب است که میزان خروج از مرکزیت جداگر از اهمیت کمتری نسبت به خروج از مرکزیت روسازه برخوردار است. خوشنودیان و ایمانی آزاد [۱۰] دلیل مهمتر بودن خروج از مرکزیت روسازه را تأثیر بیشتر آن در محل مرکز جرم کلی سازه نسبت به مرکز سختی جداگر دانسته‌اند. حداکثر افزایش برش پایه در زلزله‌های جهت‌پذیری پیش‌رونده بمیزان ۱,۲۸ تحت خروج از مرکزیت عرضی ۲۰ درصد رخ داده است. ضرایب افزایش تغییر مکان و شتاب نیز بمیزان حداکثر ۱,۰۶ و ۱,۱۱ تحت خروج از مرکزیت طولی ۲۰ درصد قابل مشاهده است.

شکل ۸ نشانگر افزایش پاسخ‌های سازه ۶ طبقه مورد بررسی در حالت وجود همزمان خروج از مرکزیت جرمی روسازه و سختی جداگر ( $E_{S\&B}$ ) است. در این حالت بعلاوه منطبق بودن مرکز اثر نیروی محرک (مرکز جرم) و مرکز اثر نیروهای مقاوم (مرکز سختی جداگر) پاسخ‌ها نسبت به حالت تنها وجود خروج از مرکزیت جرمی (شکل ۶) تا حد زیادی کنترل شده‌اند. بطوری‌که در مقایسه با شکل ۶ حداکثر افزایش برش پایه از ۲,۵۵ در زلزله جهت‌پذیری پیش‌رونده و خروج از مرکزیت طولی به ۱,۷۷ تقلیل یافته است. همچنین مقدار افزایش تغییر مکان در همین موج و با خروج از مرکزیت طولی ۱,۱۴ بوده است، حال آن‌که در شکل ۸ این مقادیر بمیزان ۱,۳۰ گزارش شده بود.



شکل ۷: حداکثر پاسخ سازه با ضرایب ( $\gamma=1, \beta=1.33$ ) دارای خروج از مرکزیت جداگر ( $E_B$ ) متفاوت به امواج با  $T_p=1-10$  s

Forward Directivity تحت امواج  $PGV=40-200$  cm/s



شکل ۸: حداکثر پاسخ سازه با ضرایب ( $\gamma=1, \beta=1.33$ ) دارای خروج از مرکزیت جداگر ( $E_{S\&B}$ ) متفاوت به امواج با  $T_p=1-10$  s

Forward Directivity تحت امواج  $PGV=40-200$  cm/s

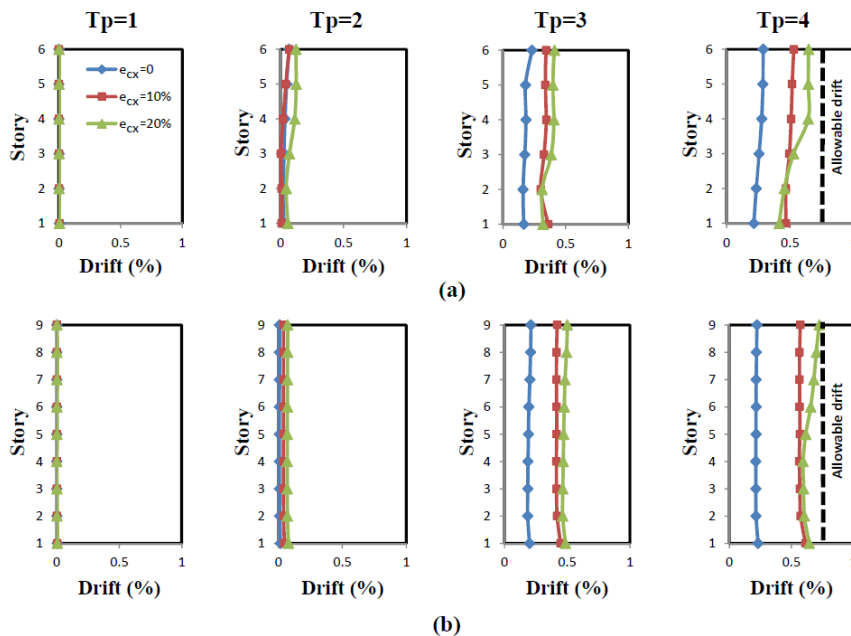
با مقایسه سه تصویر ۶، ۷ و ۸ می‌توان چنین استنباط نمود که وجود خروج از مرکزیت جرمی در روسازه بسیار مهمتر از خروج از مرکزیت سختی جداگر است و پیش‌پس حاصل از آن به افزایش بیشتر پاسخ‌ها منجر می‌گردد. وجود توأمان این دو نوع خروج از مرکزیت تا حد زیادی اثر پیش‌پس را (بجز در پاسخ شتاب که تأثیر چندانی نداشته) کنترل می‌نماید. همچنین حساسیت پاسخ برش پایه نسبت به خروج از مرکزیت در راستای زلزله اعمالی بیش از سایر انواع خروج از مرکزیت‌هاست، حال آن‌که شتاب و تغییر مکان جداگر حساسیت بیشتری را نسبت به خروج از مرکزیت عمود بر راستای اعمال نیرو نشان می‌دهند.

## ۶- تغییرات دررفت بر اثر خروج از مرکزیت جرمی

در سازه‌های جداسازی شده دررفت بین طبقات بعثت کوچک بودن از اهمیت چندانی برخوردار نیست؛ بنابراین در مطالعات موجود کمتر به آن پرداخته شده است. در این پژوهش در بعضی پالس‌های با سرعت زیاد جداگر به انتهای ظرفیت تغییر مکانی خود می‌رسد، که در این نقطه رفتار روسازه بصورت مقطعی شبیه به سازه با پای ثابت خواهد بود. بنابراین لازم است تا دررفت بین طبقات مورد بررسی بیشتر قرار گیرد. برای این منظور رفتار سازه‌های ۶ و ۹ طبقه با ضرایب لاغری ۱،۳۳ و ۲ تحت امواج جهت‌پذیری پیش‌رونده با  $T_p=1-4$  s و  $PGV=120$  cm/s و همچنین با در نظر گرفتن خروج از مرکزیت جرمی طولی مورد بررسی قرار گرفته است.

در شکل ۹ مقادیر دررفت در پالس‌های جهت‌پذیری پیش‌رونده قابل توجه بوده به صورتی که حداکثر آن در روسازه‌های ۶ و ۹ طبقه در حالت بدون خروج از مرکزیت به ترتیب برابر با ۰،۲۹ و ۰،۲۳ درصد، و در حالت با خروج از مرکزیت برابر با ۰،۶۵ و ۰،۷۳ بوده است. مقدار دررفت نشان داده شده در سازه‌های ۶ و ۹ طبقه با خروج از مرکزیت حکایت از وجود برخورد جداگر با جداره اطراف دارد. همان‌گونه که از شکل دررفت این دو سازه در پالس‌های ۳ و ۴ ثانیه و با وجود خروج از مرکزیت مشخص است، الگوی تغییرات دررفت با سایر سازه‌ها تفاوت عمده‌ای داشته و در طبقات بالاتر بر مقدار آن افزوده شده است. این الگو نشان دهنده رفتاری شبیه سازه‌های با پای ثابت بوده و با الگوی دررفت سازه‌های جداسازی شده که توزیع تقریباً یکنواختی دارد همخوانی ندارد. مقدار دررفت پلاستیک روسازه ( $\delta_p$ ) که از رابطه ۲ بدست می‌آید، مطابق ACSE 7-2010 باید کمتر از ۱،۵ درصد باشد [۱۷]. با در نظر گرفتن ضریب رفتار R برابر با ۲ و ضریب اهمیت  $I_e$  مساوی با ۱ برای سازه‌های جداسازی شده میزان دررفت الاستیک ( $\delta_e$ ) مجاز، ۰،۷۵ درصد بدست می‌آید که در نمودارهای شکل ۹ ترسیم گردیده است. با توجه به توضیحات بالا، در سازه ۹ طبقه افزایش خروج از مرکزیت جرمی به میزان ۲۰ درصد باعث نزدیک شدن دررفت الاستیک به مقدار مجاز آیین‌نامه گردیده است.

$$\delta_p = \frac{R\delta_e}{I_e} < 1.5\% \quad (2)$$



شکل ۹: دررفت سازه با خروج از مرکزیت طولی متفاوت در موج جهت‌پذیری پیش‌رونده با  $T_p=1-4$  s و  $PGV=120$  cm/s

(a) سازه ۶ طبقه و (b) سازه ۹ طبقه.



## ۷- نتیجه گیری

- در این مقاله به بررسی اثر امواج حوزه نزدیک ساده شده جابجایی ماندگار زمین و جهت پذیری پیش‌رونده شکست بر سازه‌های جداسازی شده نامتقارن پرداخته شده است. روسازه‌های مورد مطالعه دارای مدل الاستیک خطی و جداگر دارای مدل غیرخطی بوده است. خروج از مرکزیت جرمی روسازه و سختی جداگر در دو حالت مجزا و همزمان در راستای طول، عرض و قطر پلان در این مطالعه لحاظ شده و نتایج بدست آمده در این فصل بصورت خلاصه به شرح زیر است:
- پیچش ناشی از خروج از مرکزیت جرمی روسازه بیشترین اثر در تشدید پاسخ‌های زلزله حوزه نزدیک را نشان می‌دهد. در صورت وجود خروج از مرکزیت همزمان جرمی و جداگر این اثر کاهش می‌یابد. اثر خروج از مرکزیت جداگرها بصورت مجزا نیز تأثیر کمتری در افزایش پاسخ‌ها نسبت به دو حالت فوق‌الذکر دارد.
  - بیشترین میزان افزایش برش پایه تحت خروج از مرکزیت هم‌راستا با نیروی زلزله اتفاق می‌افتد؛ حال آنکه خروج از مرکزیت عمود بر راستای زلزله به خاطر افزایش بازوی پیچش نقش مهمتری در تشدید پاسخ‌های شتاب و تغییر مکان بازی می‌کند.
  - میزان افزایش برش پایه و شتاب در زلزله دارای پالس جهت‌پذیری پیش‌رونده شکست همواره شدیدتر از پالس‌های جابجایی ماندگار زمین بوده است. از طرف دیگر در زلزله‌های با پالس جابجایی ماندگار زمین به خاطر کوچک بودن تغییر مکان‌ها و قرارگیری جداگر در فازهای نرم‌شوندگی، افزایش تغییر مکان ناشی از پیچش بیش از رکوردهای دارای پالس جهت‌پذیری پیش‌رونده بوده است.
  - با افزایش حداکثر سرعت زمین (PGV) در هر دو نوع پالس جهت‌پذیری پیش‌رونده و جابجایی ماندگار زمین، میزان پاسخ‌های سازه افزایش می‌یابد. از طرف دیگر در هر دو نوع پالس مورد بررسی، با افزایش زمان تناوب از ۱ تا ۴ ثانیه به خاطر نزدیک شدن پریود پالس به زمان تناوب جداگر پاسخ‌ها افزایش یافته‌اند، ولی از ۴ تا ۱۰ ثانیه افزایش زمان تناوب موج به کاهش پاسخ‌ها منجر شده است.
  - در سازه‌های جداسازی شده در محدوده امواج حوزه نزدیک با سرعت بالا، برخورد جداگر با جداره‌های اطراف خود باعث افزایش دررفت به مقدار زیادی می‌گردد. بنابراین لازم است تا در کنترل مقدار مجاز آیین‌نامه‌ای دررفت به امکان وقوع پیچش در سازه نیز توجه داشت.

## مراجع

- [1] 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.
- [2] Fenz, D., Constantinou, M. C. (2008). Modeling Triple Friction Pendulum Bearings for Response History Analysis, *Earthquake Spectra*, VOL. 24, 1011-1028.
- [3] Becker, T. C., 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, 355-373.
- [4] Morgan, T., Mahin, S. A. (2010). Achieving Reliable Seismic Performance Enhancement Using Multi-Stage Friction Pendulum Isolators, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, VOL. 39, 1443-1461.
- [5] Dao, N. D., Ryan, K. L., Sao, E., Sasaki, T. (2013). Predicting the Displacement of Triple Pendulum Bearings in a Full-Scale Shaking Experiment Using a Three-Dimensional Element, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, VOL. 42, 1677-1695.
- [6] Kilar, V., Koren, D. (2009). Seismic Behaviour of Asymmetric Base Isolated Structures with Various Distributions of Isolators, *Engineering Structures*, VOL. 31, 910-921.
- [7] Almazan, J. L., De la Diera, J. C. (2003). Accidental Torsion due to Overturning in Nominally Symmetric Structures Isolated with the FPS, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, VOL. 32, 919-948.
- [8] Tena-Colunga, A., Gomez-Soberon, L. (2002). Torsional Response of Base Isolated Structures due to Asymmetries in the Superstructure, *Engineering Structures*, VOL. 24, 1587-1599.
- [9] Tena-Colunga, A., Escamilla-Cruz, J. (2007). Torsional Amplifications in Asymmetric Base Isolated Structures, *Engineering Structures*, VOL. 29, NO. 2, 237-247.

- [10] Khoshnoudian, F., Imani Azad, A. (2011). Effect of Two Horizontal Components of Earthquake on Nonlinear Response of Torsionally Coupled Base Isolated Structures, *The Structural Design of Tall and Special Buildings*; VOL. 20, 986-1018.
- [11] Masaeli, H., Khoshnoudian, F., Hadikhan Tehrani, M. (2014). Rocking Isolation of Nonductile Moderately Tall Buildings Subjected to Bidirectional Near-Fault Ground Motions, *Engineering Structures*, VOL. 80, 298-315.
- [12] Baker, J. W. (2007). Quantitative Classification of Near-Fault Ground Motions Using Wavelet Analysis, *Bulletin of the Seismological Society of America*, VOL. 97 NO. 5, 1486-1501.
- [13] Hall, J. F., Heaton, T. H., Halling, M. W., Wald, D. J. (1995). Near-Source Ground Motion and its Effects on Flexible Buildings, *Earthquake Spectra*, VOL. 11, NO. 4, 569-605.
- [14] Khoshnoudian, F., Ahmadi, E. (2013). Effects of Pulse Period of Near-Field Ground Motions on the Seismic Demands of Soil-MDOF Structure Systems Using Mathematical Pulse Models, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, VOL. 42, NO. 11, 1565-1582.
- [15] Sasani, M., Bertero, V. (2000). Importance of Severe Pulse-Type Ground Motion in Performance-Based Engineering: Historical and Critical Review, *Proceedings of the 12th world conference on earthquake engineering*, New Zealand, Paper No.8.
- [16] Kalkan, E., Kunnath, S. K. (2006). Effects of Fling Step and Forward Directivity on Seismic Response of Buildings, *Earthquake Spectra*, VOL. 22, 367-390.
- [17] AISC (2010). *Specification for Structural Steel Buildings*, ANSI/AISC 360-10, American Institute of Steel Construction, Chicago, Illinois, USA.
- [18] ASCE 7-10 (2010). *Minimum Design Loads for Building and Other Structures*, ASCE/SEI 7-10, American Society of Civil Engineers, Reston, Virginia, USA.
- [19] Ghahari, S. F., Khaloo, A. R. (2013). Considering Rupture Directivity Effects, Which Structures Should be Named 'Long-Period Buildings'?, *The Structural Design of Tall and Special Buildings*; VOL. 22, 165-178.