

Evaluating Seismic Response of Plan Irregular Buildings Using combination of Lead Rubber Bearing Isolator and Friction Pendulum System

M.R. Shiravand^{1*}, H. Ketabdari²

1- Assistant Professor, Faculty of Civil engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

2- PhD Student, Faculty of Civil engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

ABSTRACT

Recently, base isolation techniques are applied as a resisting system to protect the structures from seismic and dynamic loadings. Due to their importance, in this paper, an optimum arrangement of lead rubber bearing (LRB) and friction pendulum system (FPS) is investigated in irregular buildings and its performance is compared with a regular case. For this purpose, 3 types of irregularities have been adopted. Accordingly, 3, 7 and 10 story buildings have been performed and 12 possible combination have been applied for the isolators in each model. Afterwards, the numerical models have been analyzed using nonlinear time-history analysis and direct integration method and applying 7 earthquake records along the longitudinal and transverse directions of the building. The obtained results of the numerical study show that the application of FPS and LRB isolators in outer and inner columns respectively, led to a better performance compared to the other arrangements by reduction of the inter-story drifts as well as base shear and enhancement of the energy dissipation which is due to the characteristics of FPS isolators in balancing the applied forces with the building's mass and prevention of torsion occurrence in irregular structures. Unlike the irregular buildings, application of FPS and LRB isolators in inner and outer columns, result in a better performance by reducing the story drifts in regular structures.

ARTICLE INFO

Receive Date: 03 June 2019

Revise Date: 31 July 2019

Accept Date: 11 August 2019

Keywords:

Lead rubber bearing;
Friction pendulum system;
Nonlinear time history
analysis;
Optimum arrangement;
Irregular buildings

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/JSCE.2019.188761.1872

*Corresponding author: Mahmoud Reza Shiravand

Email address: m_sharavand@sbu.ac.ir

ارزیابی پاسخ لرزه ای سازه های نامنظم در پلان با استفاده از ترکیب جداگرهای لاستیکی هسته سربی و اصطکاکی پاندولی

محمود رضا شیرواند^{۱*}، حسام کتابداری^۲

۱- استادیار، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

۲- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

چکیده

بدلیل افزایش استفاده از جداگرهای لرزه ای بعنوان یک سیستم مقاوم در برابر زلزله در سالیان اخیر و اهمیت بالای آن، در این مقاله به بررسی ترکیب بهینه استفاده از جداگرهای لاستیکی هسته سربی و اصطکاکی پاندولی در سازه های نامنظم پرداخته شده و عملکرد آن با نمونه منظم مورد مقایسه قرار گرفته است. بدین منظور ۳ پلان نامنظم انتخاب شده و هرکدام با ۳ تپ تعداد طبقات ۳، ۷ و ۱۰ مورد بررسی قرار گرفته و ۱۲ جایگشت امکان پذیر مختلف جداگرها در هر پلان بکارگیری شده است. سپس با بکارگیری ۷ رکورد زلزله در جهت طولی و عرضی و با استفاده از تحلیل تاریخچه زمانی غیر خطی و روش انتگرال گیری مستقیم به تحلیل مدل ها پرداخته شده است. نتایج این تحلیل ها نشان می دهد که در سازه های نامنظم استفاده از جداگرهای اصطکاکی پاندولی در ستون های خارجی و استفاده از جداگرهای هسته سربی در ستون های داخلی عملکرد مناسب تری نسبت به دیگر ترکیبات از خود نشان داده و جابجایی نسبی طبقات و برش پایه کمتر و درصد جذب انرژی بیشتری در آن بوجود آمده است که از دلایل آن می توان به خصوصیات جداگرهای اصطکاکی پاندولی در تناسب نیروی اعمالی از سامانه ی جداگری با جرم سازه و عدم وقوع پیچش در سازه های نامنظم اشاره کرد. در سازه های منظم بر خلاف سازه های نامنظم، استفاده از جداگرهای اصطکاکی پاندولیدر ستون های داخلی و جداگرهای لاستیکی در ستون های بیرونی عملکرد مناسب تری در کاهش جابجایی نسبی طبقات داشته است.

کلمات کلیدی: جداگر لاستیکی هسته سربی، جداگر اصطکاکی، تحلیل تاریخچه زمانی غیر خطی، ترکیب بهینه، ساختمان های نامنظم

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	شناسه دیجیتال:	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/JSCE.2019.188761.1872					
	https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2019.188761.1872	۱۴۰۰/۰۴/۳۰	۱۳۹۸/۰۵/۲۰	۱۳۹۸/۰۵/۲۰	۱۳۹۸/۰۵/۰۹	۱۳۹۸/۰۳/۱۳
محمودرضا شیرواند m_sharavand@sbu.ac.ir					*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:	

۱- مقدمه

تاکنون مطالعات زیادی بر روی عوامل و اثرات زلزله بر روی سازه‌ها صورت گرفته و برای حفظ سازه‌ها پس از زلزله نیز روش‌های گوناگونی ارائه شده است. امروزه کاربرد سیستم‌های جداگر لرزه‌ای یکی از روش‌های گسترش یافته برای محافظت سازه‌ها در برابر زمین لرزه‌ها می‌باشند. چراکه استفاده از جداگرها علاوه بر کاهش جابجائی بین طبقه‌ای، شتاب طبقات را نیز به میزان قابل توجهی کاهش داده بطوریکه علاوه بر پیشگیری از تخریب‌های سازه‌ای ساختمان، تخریب و آسیب دیدن تجهیزات مستقر در ساختمان را هم به حداقل می‌رساند. ایده اصلی جداگرلرزه‌ای، جدا کردن سازه از ارتعاشات زلزله با قرار دادن المان‌هایی دارای خاصیت میرایی و همچنین شکل پذیری می‌باشد. این المانها باعث کاهش انتقال نیروی زلزله از زمین به روسازه، از طریق جابجایی پیوند اصلی سازه می‌باشد. پیرو اهمیت این مساله مطالعات گسترده و مختلفی بر روی انواع جداگرها که می‌توان به دو دسته‌ی جداگرهای لاستیکی و جداگرهای اصطکاکی تقسیم بندی کرد، نحوه عملکرد و میزان اثر بخشی آن‌ها در سازه‌ها انجام شده است.

سیستم اصطکاکی پاندولی^۱ اولین بار در سال ۱۹۸۷ توسط زایاس [۱] پیشنهاد شده است. مطالعات جامع آزمایشی و عددی که توسط بسیاری از محققان ارائه شده است ثابت کرده اند که جداگر اصطکاکی پاندولی یک دستگاه موثر برای جداسازی انرژی لرزه‌ای می‌باشد. همچنین مطالعات بسیاری در جهت شناخت هرچه بهتر این سیستم انجام شده و مدل‌های گوناگونی تاکنون ارائه شده است.

بعنوان نمونه در سال ۲۰۰۴ با استفاده از یک مدل تحلیلی ضریب اصطکاک بهینه برای شتاب‌های حوزه نزدیک ارائه شده است [۲]. در تحقیق دیگری اثر پارامترها طراحی بر روی پاسخ لرزه‌ای پل‌های دارای جداگر اصطکاکی پاندولی مورد ارزیابی قرار گرفته است که نتایج نشان دهنده تاثیر کمتر جداگرهای اصطکاکی پاندولی در پل‌هایی با مشخصات زیر سازه انعطاف پذیرتر می‌باشد [۳]. در ادامه روند بهینه سازی، تحقیقی در جهت تعیین تمامی پارامترهای بهینه جداگر اصطکاکی پاندولی در خاک‌های مختلف و تحت شتاب‌ها گوناگون حاصل شده است [۴]. در سال ۲۰۱۳ مدلی در جهت تعیین رفتار این نوع جداگر در تحریکات لرزه‌ای و بویژه عملکرد آن در تکرار سیکل‌های شتاب ارائه شده و مطالعه پارامتریکی آن مورد بررسی قرار گرفته است [۵]. در سال ۲۰۱۶ طی تحقیقی به بررسی اندرکنش خاک - سازه در سازه‌های دارای جداگر اصطکاکی پاندولی پرداخته شده است [۶]. در نمونه‌ی دیگری از تحقیقات انجام شده در سال ۲۰۱۶ نیز می‌توان به تحقیق بسیار جالبی در مورد تحلیل لرزه‌ای ساختمان‌های نامنظم تحت شتاب‌های حوزه نزدیک با در نظر گرفتن مولفه‌های قائم و افقی اشاره کرد [۷]. در جدیدترین تحقیقات ارائه شده در زمینه جداگرهای اصطکاکی نیز در سال ۲۰۱۸ جداگر اصطکاکی پاندولی قابل تنظیم بعنوان یک سیستم کنترل نیمه فعال ساختمانی با استفاده از ترکیب این جداگر با فرضیات سیستم‌های کنترل نیمه فعال ارائه شده است که در این تحقیق با استفاده از تحلیل‌های گسترده قابلیت این سیستم مورد ارزیابی قرار گرفت [۸]. در تحقیق دیگری نیز در سال ۲۰۱۸ ریسک فروریزش جداگرهای پاندولی در سازه‌های قاب خمشی و مهاربندی و مطالعه پارامتریک آن به انجام رسیده است [۹]. همچنین مدلی ساده شده در جهت پیش بینی پاسخ لرزه‌ای ساختمانی دارای جداگر اصطکاکی پاندولی سه گانه ارائه شده و مورد ارزیابی قرار گرفت که از جمله تحقیق‌های صورت گرفته در زمینه جداگرهای اصطکاکی در سال ۲۰۱۹ می‌باشد [۱۰].

در بین جداگرهای لاستیکی نیز جداگرهای هسته سربی^۲ از کارایی بسیار بالایی برخوردار بوده و تحقیقات گسترده‌ای در جهت میزان کارایی این نوع جداگرها به انجام رسیده است که به برخی از آنها اشاره می‌شود.

در سال ۲۰۱۴ اثر دوران تکیه گاهی بر روی رفتار افقی جداگر مورد بررسی قرار گرفت [۱۱]. در سال ۲۰۱۶ دستگامی برای مقاومت کششی جداگرهای لاستیکی هسته سربی پیشنهاد گردید و اثرات آن مورد بررسی قرار گرفت [۱۲]. در سال ۲۰۱۷ نیز طی دو تحقیق مختلف عملکرد این نوع جداگر در سازه‌های بلند مرتبه و استفاده از تحلیل پوش اور مودال در جهت تحلیل لرزه‌ای این جداگرها در سازه‌های میان مرتبه اشاره کرد [۱۳-۱۴]. در سال ۲۰۱۹، طی یک تحقیق کاربردی جداگر لاستیکی هسته سربی با مکانیزم شکست-ایمینی بعنوان جایگزینی برای جداگرهای موجود مورد بررسی قرار گرفت که نتایج نشان دهنده حاشیه ایمنی بالای این جداگر در نواحی لرزه خیز دارد [۱۵]. همچنین تحلیل شکنندگی لرزه‌ای ساختمان‌های دارای جداگر در معرض شتاب‌های حوزه دور و نزدیک در تحقیق

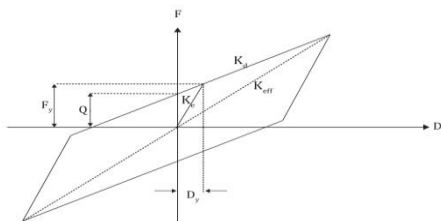
¹ friction pendulum system (FPS)

² lead rubber bearing (LRB)

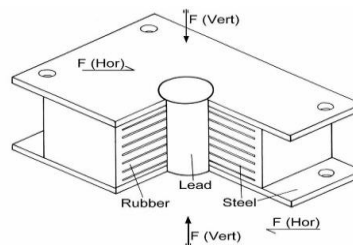
دیگری در سال ۲۰۱۹ مورد بررسی قرار گرفته است. در این تحقیق با استفاده از تحلیل های شکنندگی به ارزیابی ریسک لرزه ای ساختمانی ده طبقه دارای جداگر لاستیکی هسته سربی پرداخته شده است [۱۶].

با توجه به نحوه عملکرد انفرادی این جداگرها، تمایل به استفاده ترکیبی از آنها در ساختمان ها بیش از پیش احساس شده و در طی سال های اخیر محققان مختلفی با بکارگیری از ترکیبات مختلف جداگرها بر روی سازه ها تحقیقاتی را به انجام رسانده اند. ترانبالچی و همکاران در سال ۲۰۰۸ [۱۷] به بررسی ساختمان ۶ طبقه با استفاده از ترکیب های مختلف چند نوع جداگر نظیر جداگرهای لاستیکی هسته سربی و جداگرهای اصطکاکی پاندولی بوسیله تحلیل تاریخچه زمانی غیر خطی مورد ارزیابی قرار داده اند. حسینی واعظ و همکاران [۱۸] در سال ۲۰۱۲، ترکیب جداگرهای لاستیکی هسته سربی و جداگرهای اصطکاکی پاندولی را مورد بررسی قرار داده و پیشنهاد داده اند ۲۵ درصد جداگرها در پلان از جداگرهای اصطکاکی پاندولی و مابقی از جداگرهای لاستیکی هسته سربی استفاده شود. مانوج و همکاران در سال ۲۰۱۵ [۱۹] پاسخ دینامیکی غیر خطی سازه ی ۵ طبقه بتن ارمه دارای پلان منظم و نامنظم با استفاده از ترکیب ۳ جداگر اصطکاکی پاندولی، لاستیکی هسته سربی و لاستیکی هسته سربی با میرایی بالا مورد بررسی قرار گرفت. همچنین بهترین ترکیب برای جداگرها استفاده همزمان از جداگرهای لاستیکی هسته سربی و با میرایی بالا پیشنهاد شده است. زهیر و همکاران در سال ۲۰۱۶ [۲۰] با استفاده از ترکیب جداگرهای لاستیکی و اصطکاکی پاندولی به تحلیل غیر خطی سازه ی بتن ارمه ۱۰ طبقه و سانیتا [۲۱] به ساختمان ۳ طبقه بتنی تحت ترکیب های مختلف جداگر پرداخته اند. همچنین تحقیق جالبی در سال ۲۰۱۶ در جهت استفاده ترکیبی از جداگرهای لاستیکی با میرایی بالا و جداگرهای اصطکاکی و همچنین جداگرهای لاستیکی هسته سربی بوسیله تحلیل تاریخچه زمانی غیر خطی پیشرفته ۳ انجام شده و در آن پیشنهاد شد که جداگرهای لاستیکی بصورت موازی با جداگرهای اصطکاکی بکار گرفته شود [۲۲]. در سال ۲۰۱۷ نیز نیشین و همکاران [۲۳] ساختمانی ۱۲ طبقه را با بکارگیری تک و ترکیبی جداگرهای لاستیکی، اصطکاکی پاندولی و لاستیکی با میرایی بالا مورد ارزیابی قرار داده اند که در آن جداگرهای اصطکاکی در بررسی پاسخ برش پایه و جابجایی نسبی طبقات، عملکرد بهتری از خود نشان داده اند. در تحقیق بسیار جالبی در سال ۲۰۱۸ ساختمان ۵ طبقه ای با استفاده از ترکیب دو نوع جداگر لاستیکی بر روی میز لرزه قرار گرفته و پاسخ لرزه ای آن با اعمال شتاب های مختلف مورد ارزیابی قرار گرفت که از جمله معهود تحقیقات آزمایشگاهی انجام گرفته در زمینه ترکیب جداگرها می باشد [۲۴].

با توجه به موارد فوق، استفاده ترکیبی از جداگرها در تحقیقات صورت گرفته صرفاً مربوط به ساختمان های محدودی می باشند که اغلب منظم بوده و سبب ارائه نتایج محدودی نیز در این تحقیقات شده است و امکان استفاده کاربردی از نتایج آن در سازه های مختلف علی الخصوص سازه های نامنظم وجود ندارد. بنابراین انجام تحقیقی با بکارگیری ترکیبی جداگرها، با در نظر گرفتن مواردی همچون ساختمان های نامنظم با پلان های مختلف، نامنظمی های متفاوت و تعداد طبقات گوناگون و در نهایت ارائه یک نتیجه کاربردی و معرفی ترکیب بهینه، دارای اهمیت بسیاری می باشد. در این مقاله ترکیب بهینه جداگرهای لاستیکی هسته سربی و جداگرهای اصطکاکی پاندولی مورد بررسی قرار گرفته است. جداگرهای هسته سربی بدلیل افزایش شکل پذیری افقی از طریق ایجاد نیروهای بازگرداننده به وضعیت اولیه و ایجاد میرایی هیستریزس لازم بوسیله هسته سربی جهت استهلاک بیشتر انرژی، در این تحقیق مورد استفاده قرار می گیرد که جزئیات آن در شکل ۱ ارائه شده است. همچنین از جداگرهای آونگی اصطکاکی بدلیل قابلیت اتلاف انرژی بالا، ظرفیت قرارگیری مجدد در مرکز، طول عمر و دوام بالای آن، برای ترکیب با جداگرهای لاستیکی هسته سربی، بکار گرفته می شود که رفتار آن نیز در شکل ۲ ارائه شده است.



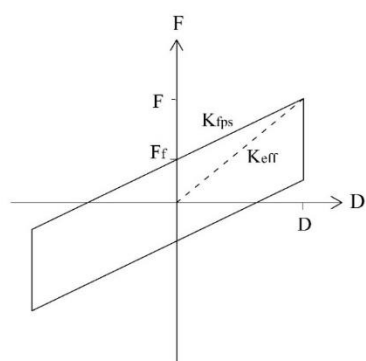
ب) رفتار غیر خطی جداگر لاستیکی با هسته ی سربی



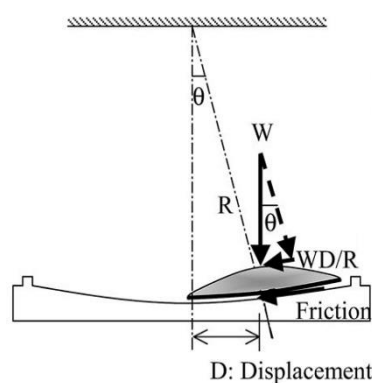
الف) جزئیات جداگر لاستیکی هسته سربی

شکل ۱: جداگر لاستیکی با هسته ی سربی [۲۵]

³ FNA



ج) رفتار جداگر اصطکاکی پاندولی



الف) جزئیات جداگر اصطکاکی پاندولی

شکل ۲: جداگر اصطکاکی پاندولی [۲۶]

۳ نوع نامنظمی در نظر گرفته شده هر کدام با ۳ تیپ طبقاتی ۳، ۷ و ۱۰ طبقه و سیستم قاب خمشی فولادی برای مدلسازی انتخاب شده تا پوشش مناسب نامنظمی های مختلف و تعداد طبقات متفاوت داده شود. این ساختمان ها بوسیله تحلیل تاریخچه زمانی غیر خطی و باروش انتگرال گیری مستقیم و بوسیله ۷ رکورد دو مولفه ای مورد تحلیل قرار گرفته و نتایجی از قبیل برش پایه، جابجایی نسبی طبقات، درصد جذب انرژی و مقادیر جابجایی جداگرها ارائه شده و مورد مقایسه قرار گرفته است. در انتها نیز نتایج بدست آمده از سازه های نامنظم با نوع منظم آن مقایسه شده تا نحوه عملکرد جداگرها با جزئیات بیشتری ارائه شود.

۲- مشخصات سیستم جداگر لرزه یی

۲-۱- جداگر لاستیکی هسته سربی

تکیه گاه های لاستیکی هسته ی سربی با نمایش رفتاری دوخطی با نرم شدگی تحت بارهای نسبتا شدید لرزه ای، عملکرد مطلوبی در زمینه ی کنترل لرزه های خفیف و شدید از خود نشان داده اند. هسته ی سربی این تکیه گاه ها به همراه سختی بخش لاستیکی که در مقایسه با سختی بخش سربی بسیار اندک می باشد، تامین کننده ی سختی اولیه ی مورد نیاز در نمودار نیرو- تغییرمکان این تکیه گاه ها است. با افزایش میزان بارگذاری، این بخش به حد تسلیم رسیده و سختی بسیار کمی را در مقابل بار جانبی از خود نشان می دهد. این سختی به همراه سختی بخش لاستیکی تکیه گاه، سختی ثانویه را در نمودار نیرو- تغییرمکان از خود نشان می دهد. [۲۵].

با توجه به شکل ۱، مراحل طراحی جداگرهای لاستیکی هسته سربی مورد نیاز در این مقاله، در ادامه بصورت خلاصه ارائه شده

است:

۱. بدست آوردن وزن سازه و بیشترین نیروی محوری ستون ها

۲. در نظر گرفتن زمان تناوب جداگر

$$T_D \cong 3T \quad (1)$$

۳. در نظر گرفتن مقدار مناسب برای نسبت K_e/K_d

$$K_e = 10K_d \quad (2)$$

۴. تخمین سختی موثر (K_{eff}) و مقاومت مشخصه (Q) از طریق روابط زیر

$$K_{eff} = \frac{W}{g} + \frac{2\pi}{T_D} \quad (3)$$

$$Q \cong \frac{\pi K_{eff} D_D \xi_{eff}}{2} \quad (4)$$

۵. تخمین جابجایی طرح

۶. محاسبه پارامترهای ξ_{eff} , F_y , D_y و K_d با استفاده از روابط زیر

$$K_d = K_{eff} - \frac{Q}{D_D} \quad (5)$$

$$f_y = Q + K_e D_y \quad (6)$$

$$D_y = \frac{Q}{K_e - K_d} \quad (7)$$

$$\xi_{eff} = \frac{2Q(D_D - D_y)}{\pi K_{eff} D_D^2} \quad (8)$$

۷. محاسبه جابجایی طرح با استفاده از رابطه (۹)

$$D_D = \frac{g S_{1D} T_D}{4\pi^2 B_1} \quad (9)$$

۸. اصلاح مقاومت مشخصه با استفاده از رابطه (۱۰)

$$Q = \frac{\pi}{2(D_D - D_y)} K_{eff} D_D^2 \xi_{eff} \quad (10)$$

۹. تکرار مراحل ۶ تا ۸ با استفاده از مقادیر در نظر گرفته شده برای پارامترهای فوق تا زمانی که تغییرات جابجایی طرح محدود شده و به عددی همگرا شود.

۲-۲- جداگرا اصطکاکی پاندولی

در این نوع از جداگری، روسازه اجازه می یابد تا در زمان رخداد زلزله های نسبتاً بزرگ بر روی جداگر بلغزد. سازه به محض تجاوز نیروی برشی در طبقه ی جداگری شده از میزان نیروی اصطکاکی در نظر گرفته شده برای جداگرها بر روی آن ها شروع به لغزش می کند و به این ترتیب از ارسال نیروهای لرزه ای بزرگ به سازه جلوگیری می شود. در این حال نیروی اصطکاکی به وجود آمده در جداگرها در مقابل نیروی محرک زلزله عمل کرده و انرژی جنبشی را مستهلک می کند. [۲۶].

با توجه به شکل ۲، خلاصه مراحل طراحی جداگرهای اصطکاکی پاندولی مورد نیاز در این مقاله، در ادامه ارائه شده است:

۱. بدست آوردن وزن سازه و بیشترین نیروی محوری ستون ها

۲. در نظر گرفتن زمان تناوب جداگر

$$T_D \cong 3T \quad (11)$$

۳. بدست آوردن شعاع موثر

$$R_{FPS} = \frac{T_D^2 g}{4\pi^2} \quad (12)$$

۴. تعیین پارامترهای اصطکاکی (f_{max}, f_{min}, μ, a)

۵. بدست آوردن نیروی اصطکاک در سطح تماس

$$F_f = \mu W \quad (13)$$

۶. بدست آوردن میرایی تولیدی توسط عمل اصطکاک با تخمین جابجایی (D)

$$\xi_{eff} = \frac{2}{\pi} \times \frac{\mu}{\mu + \frac{D}{R_{FPS}}} \quad (14)$$

۷. بدست آوردن جابجایی طرح

$$D_D = \frac{g S_{1D} T_D}{4\pi^2 B_1} \quad (15)$$

۸. با مقایسه جابجایی طرح و جابجایی تخمینی، در صورتی که $D < D_D$ بوده و اختلاف چندانی نیز نداشته باشند طراحی به گام بعد می رود.

۹. بدست آوردن سختی های جداگر (K_{eff}, K_{FPS})

$$K_{FPS} = \frac{W}{R_{FPS}} \quad (16)$$

$$K_{eff} = \frac{W}{R_{FPS}} + \frac{F_f}{D_D} \quad (17)$$

۳- انتخاب رکوردهای زلزله مورد استفاده در تحلیل تاریخچه زمانی غیر خطی

در این مقاله ویژگی ساختگاه به نحوی در نظر گرفته شده است که ساختمان های با اهمیت متوسط و زیاد باتوجه به ارتفاع ساختمان، خطرپذیری زیاد و خاک نوع ۲ مد نظر می باشد. با توجه به این ویژگی ها ۷ رکورد از زلزله های ایران و جهان در دو جهت طولی و عرضی بکار گرفته می شود. این رکوردها با بزرگی بین ۶/۵ الی ۷/۵ ریشتر انتخاب شده اند. این شتاب نگاشت ها مطابق با شرایط ذکر شده برای تحلیل تاریخچه زمانی در استاندارد ۲۸۰۰ [۲۷] و با توجه به ویژگی ساختگاه، مدت زمان حرکت شدید زمین، تعداد زوج شتاب نگاشت لازم و ... انتخاب شده اند. مشخصات رکوردهای مورد استفاده در جدول ۱ مشاهده می شود.

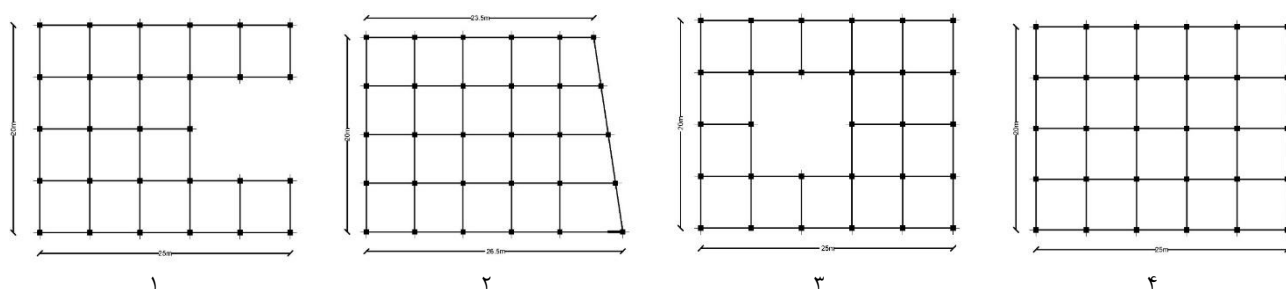
جدول ۱: زلزله های در نظر گرفته شده برای این مقاله

شماره رکورد	زلزله	سال وقوع	بزرگی زلزله	مکانیزم گسلش	ایستگاه	PGA(g) (X Direc)	PGA(g) (Y Direc)	حوزه دور و نزدیک	فاصله از گسل
۱	Kobe	۱۹۹۵	۶/۹	strike slip	Nishi-Akashi	۰/۴۶	۰/۴۸	دور	۷/۱
۲	Northridge	۱۹۹۴	۶/۶۹	Reverse	LA - Brentwood VA Hospital	۰/۱۶	۰/۱۹	دور	۱۲/۹۲
۳	Kocaeli	۱۹۹۹	۷/۵۱	strike slip	Arcelik	۰/۱۳	۰/۲۱	دور	۱۰/۶
۴	Bam	۲۰۰۳	۶/۶	strike slip	Bam	۰/۶۳	۰/۸۱	نزدیک	۰/۰۵
۵	Loma	۱۹۸۹	۶/۹۳	Reverse Oblique	Gilroy Array #3	۰/۳۴	۰/۵۶	دور	۱۲/۲
۶	Hector Mine	۱۹۹۹	۷/۱۳	strike slip	Hector	۰/۲۷	۰/۳۳	دور	۱۰/۴
۷	Tabas	۱۹۸۷	۷/۳۵	Reverse	TABAS	۰/۸۵	۰/۸۶	نزدیک	۱/۷۹

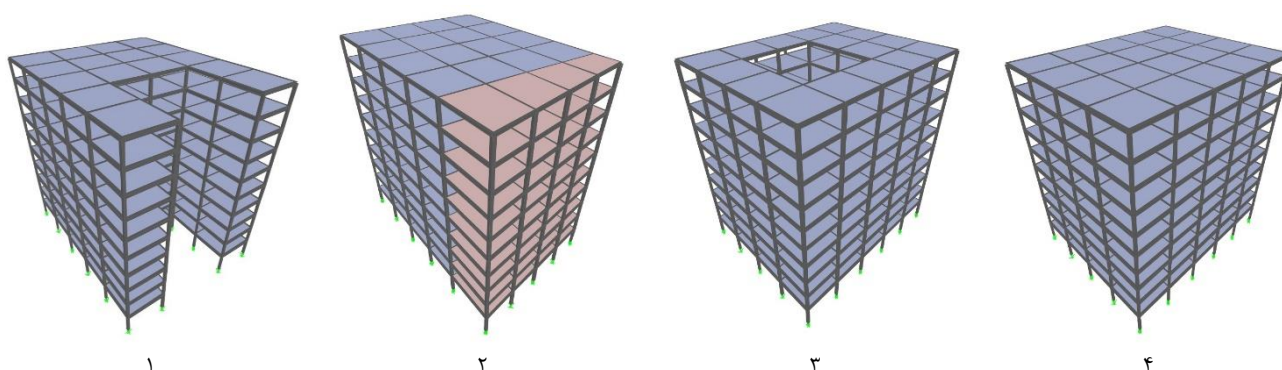
۴- سازه های مورد استفاده در تحلیل

در آیین نامه ۲۸۰۰ ایران، نامنظمی ها به دو دسته نامنظمی در پلان و ارتفاع تقسیم بندی شده است که نامنظمی در پلان در ساخت و سازه های امروزی بیشتر مورد استفاده قرار می گیرد. بنابراین در این مقاله از ۳ پلان مختلف که در شکل ۳ ارائه شده است، استفاده شده است. این پلان ها شامل نامنظمی پیچشی و نامنظمی سیستم های غیر موازی می باشند. همچنین پلان منظم نیز برای مقایسه نتایج پلان های نامنظم و منظم در مدلسازی ها بکار برده شده است. برای هر پلان از ۳ تیپ طبقات ۳، ۷ و ۱۰ طبقه مورد استفاده قرار گرفته شده است و سازه مورد بررسی نیز قاب خمشی فولادی می باشد که نمونه ای از ساختمان ۱۰ طبقه مدل شده با نامنظمی های معرفی شده، در شکل ۴ ارائه شده است. همچنین در هر مدل از ۱۲ جایگشت منطقی مختلف جهت بدست آوردن حالت بهینه استفاده ترکیبی از جداگرها استفاده شده است که جایگشت یکی از پلان ها در شکل ۵ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود جایگشت شماره ۱۱ فقط از جداگر اصطکاکی پاندولی و جایگشت شماره ۱۲ فقط از جداگر لاستیکی هسته سربی استفاده شده تا عملکرد انفرادی آن ها با عملکرد ترکیبی این جداگرها نیز مورد مقایسه قرار گیرد. طراحی اعضا براساس آیین نامه AISC-LRFD [۲۸] صورت گرفته است. برای تحلیل مدل ها نیز از تحلیل تاریخچه زمانی غیر خطی نرم افزار SAP2000.v1/19 و از روش انتگرال گیری مستقیم استفاده شده و هر یک از سازه ها برای هردو امتداد اصلی (x و y) به طور همزمان مورد تحلیل دینامیکی غیر خطی قرار گرفته اند.

همچنین برای مدلسازی جداگرهای اصطکاکی پاندولی، از المان Link و از نوع Friction Isolator و برای مدلسازی جداگرهای لاستیکی هسته سربی از المان Link و از نوع Rubber Isolator در نرم افزار سب استفاده شده است.

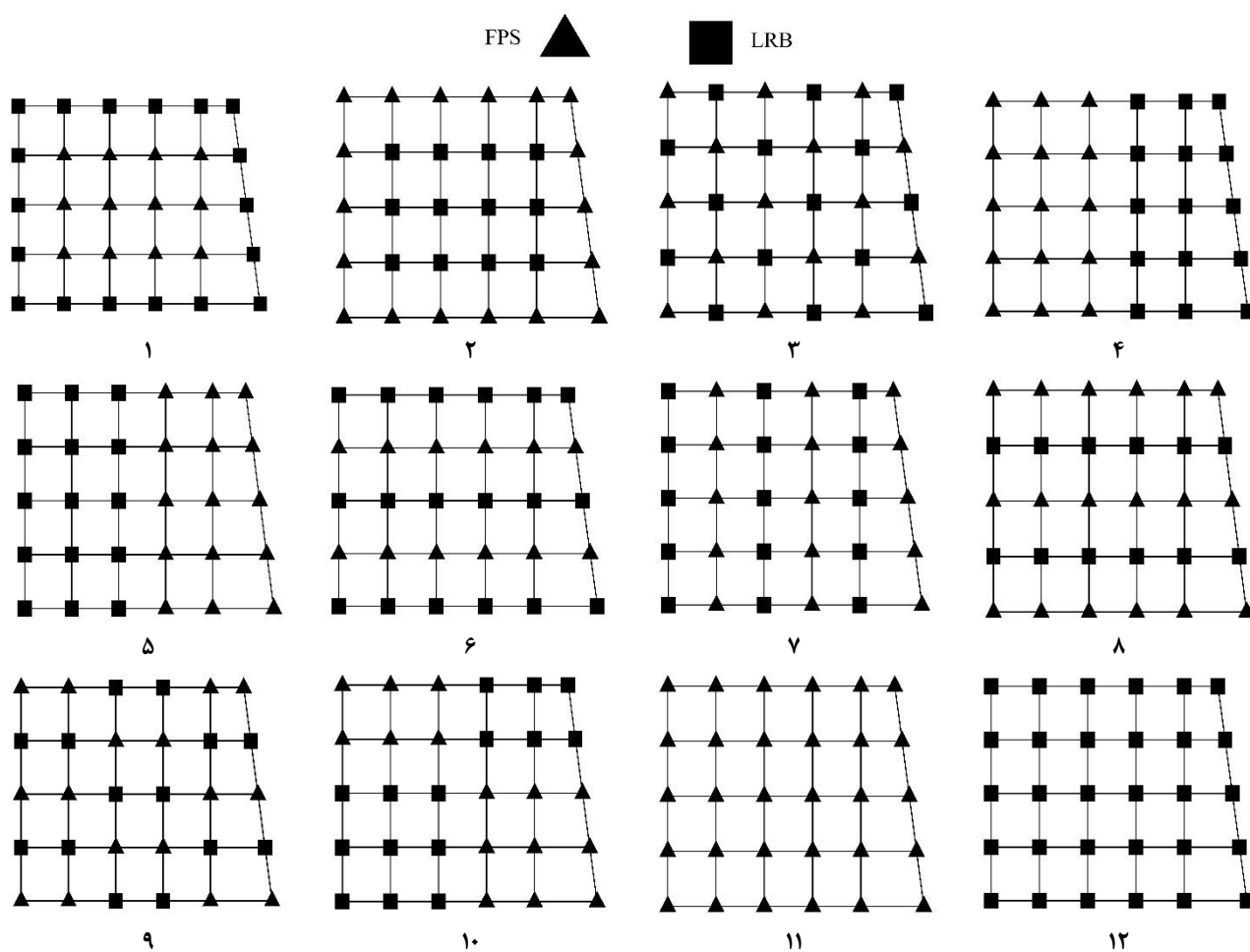


شکل ۳: پلان های در نظر گرفته شده



شکل ۴: نمونه ای از ساختمان طبقه مدل شده با نامنظمی های معرفی شده

با توجه به روابط ۱ الی ۸، کنترل هریک از جداگرهای طراحی شده و ویژگی هر سازه مورد بررسی، خلاصه نتایج بدست آمده از طراحی جداگر لاستیکی هسته سربی برای مدلسازی در نرم افزار در جدول ۲ ارائه شده است.



شکل ۵: نمونه ای از ترکیب های مختلف جداگرها در پلان

جدول ۲: خلاصه مشخصات جداگرهای لاستیکی هسته سربی

تغییر مکان جداگر (m)	نیروی تسلیم جداگر (kN)	ضریب میرایی	سختی جانبی الاستیک $\left(\frac{kN}{m}\right)$	سختی جانبی موثر $\left(\frac{kN}{m}\right)$	دوره تناوب سازه جداگری شده (S)	نوع پلان
۰/۲	۳۰	۵۴	۷۰۴۰	۸۳۵	۲	پلان منظم ۳ طبقه
۰/۲۴	۵۹	۱۰۷	۱۱۸۰۰	۱۴۰۰	۲/۴	پلان منظم ۷ طبقه
۲/۷	۷۷	۱۴۰	۱۳۸۱۰	۱۶۴۰	۲/۷	پلان منظم ۱۰ طبقه
۰/۲	۲۸	۵۱	۶۸۲۰	۸۱۰	۲	پلان ۳-۱ طبقه
۰/۲۴	۵۸	۱۰۶	۱۱۷۰۰	۱۳۸۵	۲/۴	پلان ۷-۱ طبقه
۰/۲۷	۷۵	۱۳۷	۱۳۴۱۰	۱۵۹۰	۲/۷	پلان ۱۰-۱ طبقه
۰/۲	۲۹	۵۳	۶۹۵۰	۸۲۵	۲	پلان ۳-۲ طبقه
۰/۲۴	۵۹	۱۰۷	۱۱۷۷۰	۱۳۹۵	۲/۴	پلان ۷-۲ طبقه
۰/۲۷	۷۷	۱۴۰	۱۳۷۴۰	۱۶۳۰	۲/۷	پلان ۱۰-۲ طبقه
۰/۲	۲۹	۵۳	۶۹۹۰	۸۳۰	۲	پلان ۳-۳ طبقه
۰/۲۴	۵۷	۱۰۵	۱۱۶۰۰	۱۳۷۵	۲/۴	پلان ۷-۳ طبقه
۰/۲۷	۷۲	۱۳۲	۱۳۰۲۰	۱۵۵۰	۲/۷	پلان ۱۰-۳ طبقه

همچنین با توجه به روابط ۹ الی ۱۴، کنترل هریک از جداگرهای طراحی شده و ویژگی هر سازه مورد بررسی، خلاصه نتایج بدست آمده از طراحی جداگراصطکاکي برای مدلسازی در نرم افزار در جدول ۳ ارائه شده است. لازم به ذکر است که ضریب اصطکاک در سرعت کم و زیاد نیز باتوجه به آزمایش های انجام شده در این رابطه در نظر گرفته شده است.

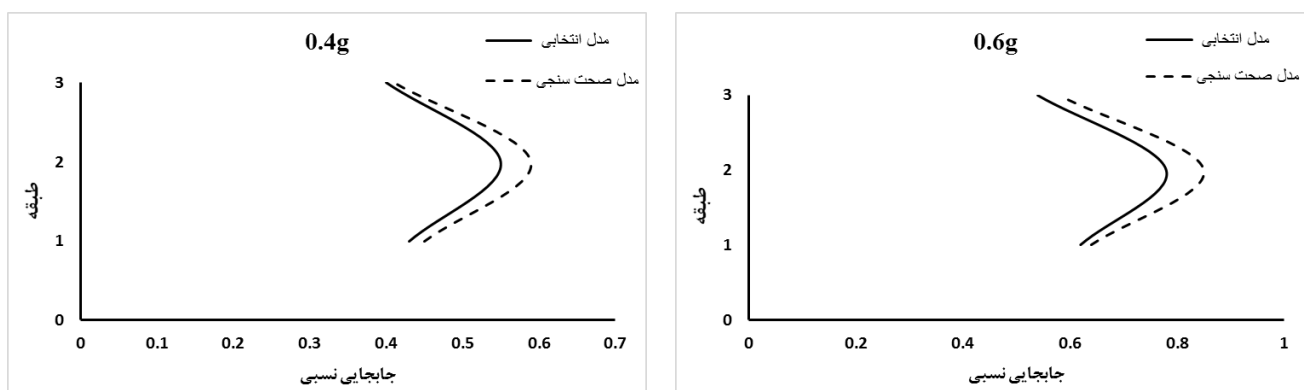
جدول ۳: خلاصه مشخصات جداگرهای اصطکاکي پاندولی

شعاع انحنا (m)	تغییر مکان جداگر (m)	سختی جانبی موثر $\left(\frac{kN}{m}\right)$	سختی جانبی الاستیک $\left(\frac{kN}{m}\right)$	دوره تناوب سازه جداگري شده (S)	نوع پلان
۱	۰/۱۷	۱۱۱۵	۸۳۵	۲	پلان منظم ۳ طبقه
۱/۴	۰/۲۲	۱۹۶۵	۱۴۰۰	۲/۴	پلان منظم ۷ طبقه
۱/۸	۰/۲۵	۲۳۸۵	۱۶۴۰	۲/۷	پلان منظم ۱۰ طبقه
۱	۰/۱۷	۱۰۸۰	۸۱۰	۲	پلان ۳-۱ طبقه
۱/۴	۰/۲۲	۱۹۵۰	۱۳۸۵	۲/۴	پلان ۷-۱ طبقه
۱/۸	۰/۲۵	۲۳۱۵	۱۵۹۰	۲/۷	پلان ۱۰-۱ طبقه
۱	۰/۱۷	۱۱۱۰	۸۲۵	۲	پلان ۳-۲ طبقه
۱/۴	۰/۲۲	۱۹۶۰	۱۳۹۵	۲/۴	پلان ۷-۲ طبقه
۱/۸	۰/۲۵	۲۳۷۰	۱۶۳۰	۲/۷	پلان ۱۰-۲ طبقه
۱	۰/۱۷	۱۱۱۰	۸۳۰	۲	پلان ۳-۳ طبقه
۱/۴	۰/۲۲	۱۹۳۰	۱۳۷۵	۲/۴	پلان ۷-۳ طبقه
۱/۸	۰/۲۵	۲۲۵۰	۱۵۵۰	۲/۷	پلان ۱۰-۳ طبقه

۵-صحت سنجی جداگرهای لرزه ای

۵-۱- جداگر لاستیکی هسته سربی

جهت صحت سنجی جداگرهای لاستیکی هسته سربی مورد استفاده در این مقاله از سازه سه طبقه تحقیق [۱۴] استفاده شده است. بدین منظور با بکارگیری مشخصات مصالح، مقاطع مورد استفاده و مشخصات جداگر در تحقیق ذکر شده، مدلسازی و تحلیل سازه صورت گرفت. برای صحت سنجی از مقایسه دریافت طبقات بدست آمده از تحلیل تاریخچه زمانی غیر خطی استفاده شده است که نتایج در شکل ۶ ارائه شده است. در جدول ۴ نیز مقادیر جابجایی جداگر در رفرنس و نرم افزار سپ مورد مقایسه قرار گرفته است. نتایج این صحت سنجی و اختلاف خطای موجود نشان دهنده صحت مدلسازی جداگر لاستیکی هسته سربی در نرم افزار سپ با استفاده از المان لینک می باشد.



شکل ۶: صحت سنجی در نرم افزار سپ با مدل عددی رفرنس [۱۴]

جدول ۴: مقایسه مقادیر جابجایی در جداگر

اسکیل شتاب	۰,۴g	۰,۶ g
جابجایی جداگر در [۱۴]	۰,۰۸ m	۰,۱۳ m
جابجایی جداگر در مدل صحت سنجی	۰,۰۹ m	۰,۱۳۸ m

۵-۲- جداگراصطکاکی

جهت صحت سنجی جداگرهای اصطکاکی پاندولی مورد استفاده در این مقاله از سازه شش طبقه تحقیق [۲۹] استفاده شده است. بدین منظور با بکارگیری مشخصات مصالح، مقاطع مورد استفاده و مشخصات جداگر در تحقیق ذکر شده، مدلسازی و تحلیل سازه صورت گرفت. برای بررسی نتایج بدست آمده از مقایسه بیشترین شتاب، بیشترین دررفت طبقات و نسبت برش پایه به وزن استفاده شده است که در جدول ۵ مشاهده می شود. نتایج این صحت سنجی و اختلاف خطای موجود نشان دهنده توانایی مدلسازی جداگر اصطکاکی پاندولی در نرم افزار سپ با استفاده از المان لینک می باشد.

جدول ۵: صحت سنجی نرم افزار سپ با نتایج آزمایشگاهی رفرنس [۲۹]

نام رکورد	وزن / برش پایه		بیشینه جابجایی نسبی طبقات		بیشینه شتاب (g)	
	نتایج آزمایشگاهی	نتایج عددی	نتایج آزمایشگاهی	نتایج عددی	نتایج عددی	نتایج آزمایشگاهی
El Centro	۰/۱۲۶	۰/۱۳۱	۰/۱۱۷	۰/۱۲۹	۰/۵۶	۰/۶۴
Taft	۰/۷۷	۰/۸۲	۰/۱۰۱	۰/۱۱۳	۰/۳۷	۰/۴۲

۶- بحث و بررسی

پس از تحلیل تاریخچه زمانی غیر خطی ۱۴۴ مدل مختلف، به بررسی نتایج بدست آمده در جهت انتخاب ترکیب بهینه پرداخته می شود. نتایج برش پایه، جابجایی نسبی طبقات و میزان جذب انرژی در هر سازه، در شکل های ۷ الی ۹ ارائه شده است. در ادامه بررسی نتایج بدست آمده ارائه شده است. شایان ذکر است که مطابق با آیین نامه ۲۸۰۰ ایران، حداکثر برش پایه بدست آمده در هر مدل با مقدار حداکثر آن در تحلیل استاتیکی معادل مورد مقایسه قرار گرفت و در صورت کمتر بودن برش پایه بدست آمده نسبت به برش پایه استاتیکی معادل، مقادیر پاسخ های سازه نظیر جابجایی طبقات در نسبت (برش پایه بدست آمده از تحلیل تاریخچه زمانی / برش پایه استاتیکی معادل) ضرب شده است.

۶-۱- کنترل برش پایه

برش های پایه بدست آمده از تحلیل های مختلف در شکل ۷ نشان داده شده است. بررسی برش پایه در مدل های مختلف نشان می دهد که جایگشت ۱۲ که مربوط به استفاده منفرد از جداگر لاستیکی هسته سربی می باشد عملکرد نامناسبی در هر دو سازه منظم و نامنظم نسبت به سایر آرایش ها داشته و برش پایه در این مدل حدود ۱۵ درصد بیشتر از سایر مدل ها می باشد. در مقابل جایگشت شماره ۲ دارای عملکرد مناسبی در سازه های نامنظم بوده و حدود ۵ الی ۲۵ درصد کاهش بیشتری در مقایسه با سایر آرایش ها داشته است. شایان ذکر است که در سازه های منظم کاهش برش پایه در تمامی جایگشت ها، دارای عملکرد مشابهی بوده و همگی به نسبت تقریباً برابری و با اختلاف ۵ درصدی نسبت به یکدیگر برش پایه را کنترل کرده و کاهش می دهند. بنابراین می توان نتیجه گرفت که در سازه های منظم نحوه قرارگیری ترکیبی جداگرها تاثیر متفاوتی در کاهش برش پایه نخواهند داشت.

۶-۲- کنترل جابجایی نسبی طبقات

در شکل ۸ مقایسه ای بین جابجایی نسبی طبقات در مدل های مختلف با آرایش های گوناگون جداگرها ارائه شده است که تفاوت نتایج در سازه های منظم و نامنظم کاملاً مشهود است. در سازه های نامنظم، جایگشت ۲ با عملکرد موفق تر ۱۰ الی ۳۵ درصدی

نسبت به سایر آرایش ها داشته است. در این آرایش مطابق با شکل ۵، از جداگرهای اصطکاکی پاندولی در ستون های بیرونی و از جداگرهای لاستیکی هسته سربی در ستون های داخلی استفاده شده است. همچنین جایگشت های شماره ۱۱ و ۱۲ که مربوط به استفاده منفرد از جداگر ها می باشد نیز عملکرد نامناسبی نسبت به سایر مدل ها در کنترل جابجایی نسبی طبقات داشته است.

در سازه های منظم برخلاف سازه های نامنظم، آرایشی که در آن جداگر های اصطکاکی پاندولی در ستون های داخلی و جداگرهای لاستیکی هسته سربی در ستون های بیرونی بکارگیری شده اند، دارای بهترین عملکرد می باشد که این عملکرد بویژه در کنترل جابجایی طبقه اول بسیار مشهود می باشد.

۳-۶- میزان جذب انرژی

با توجه به درصد جذب انرژی آرایش های مختلف در شکل ۹، جذب انرژی جداگرهای اصطکاکی پاندولی به تنهایی (جایگشت شماره ۱۱) نسبت به سایر مدل ها در هر دوسازه منظم و نامنظم عملکرد نامناسبی داشته و با حدود ۲۰ تا ۳۰ درصد جذب انرژی نسبت به سایر مدل ها درصد جذب انرژی کمتری داشته اند. در جذب انرژی جداگرها در سازه های نامنظم نیز همچون برش پایه و جابجایی نسبی طبقات، آرایش شماره ۲ عملکرد ۱۰ الی ۴۰ درصد مناسب تری نسبت به سایر مدل ها از خود نشان داده است. شایان ذکر است که جذب انرژی در سازه های منظم برای جایگشت شماره ۱ صادق می باشد.

۴-۶- بررسی استفاده منفرد از جداگرها

ابتدا بررسی نتایج مدل هایی که در آن ها جداگرها بصورت غیر ترکیبی و منفرد استفاده شده (جایگشت شماره ۱۱ و ۱۲)، نشان از عملکرد نامطلوب این جداگرها بصورت منفرد در مقایسه با نوع ترکیبی آنها بویژه در سازه های نامنظم می دهد. جذب انرژی کم، کاهش نامطلوب برش پایه و جابجایی نسبی طبقات از جمله نتایج بدست آمده می باشند که با افزایش نامنظمی در سازه این عملکردها نامطلوبتر نیز می شوند. این نتایج اهمیت استفاده همزمان و ترکیبی از هر دو جداگر برای کاهش مناسب برش پایه و جابجایی نسبی طبقات و افزایش درصد جذب انرژی را بیش از پیش نشان داده است. بدین منظور در ادامه به بررسی دقیق جایگشت های ۱ تا ۱۰ پرداخته می شود.

۵-۶- انتخاب ترکیب بهینه جداگرها در سازه های نامنظم

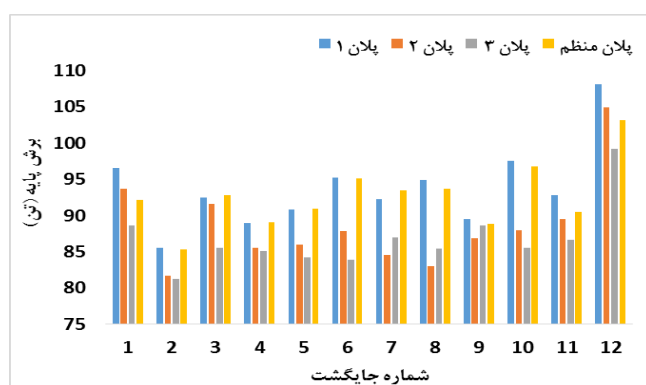
با بررسی ترکیب های ۱ الی ۱۰ هر کدام از مدلسازی ها، نتایج گوناگونی حاصل شده است و در هر مدل، ترکیبات مختلف عملکرد متفاوتی داشته اند. با بررسی پاسخ هایی نظیر برش پایه، جابجایی نسبی طبقات و درصد اتلاف انرژی در مدل های نامنظم، ترکیب شماره ۲ در تمامی مدل ها دارای عملکرد مناسب و مطلوبی بوده است. در این جایگشت ترکیب جداگرها به نحوی می باشد که در زیر ستون های بیرونی از جداگرهای اصطکاکی پاندولی و در زیر ستون های داخلی از جداگرهای لاستیکی هسته سربی استفاده شده است. از دلایل این برتری می توان به خصوصیات جداگرهای اصطکاکی پاندولی درتناسب نیروی اعمالی از سامانه ی جداگری با جرم سازه اشاره کرد. خصوصیات آونگی این جداگرها باعث می شود تا در حداقل کردن اثرات مخرب حرکات پیچشی که باعث خروج از مرکزیت های اتفاقی جرم می شود، بسیار موثر باشند. به عبارتی دیگر، سختی دینامیکی جداگرها به طور مستقیم با وزن سازه متناسب است. از آنجا که نیروی اصطکاک نیز با وزن سازه متناسب است، مرکز نیروهای اصطکاکی هم در مرکز جرم سازه قرار دارد. ازاین رو نیروهای سختی و اصطکاکی بصورت خودکار برای خروج از مرکزیت های اتفاقی جرم تنظیم می شوند. بنابراین همواره مرکز سختی جداگرها در محل مرکز جرم قرار دارد و در نتیجه مرکز جرم سازه با مرکز اعمال نیرو یکی خواهد بود و در نتیجه آن پیچش در سازه های غیرممتقارن به وجود نخواهد آمد. ازاین رو استفاده از این جداگرها در نقاط بیرونی ساختمان های نامنظم که امکان وقوع پیچش در آن ها وجود دارد، عملکرد مناسب تر و بهینه تری به جای خواهد گذاشت.

۶-۶- مقایسه ترکیب پهنه سازه های منظم با سازه های نامنظم

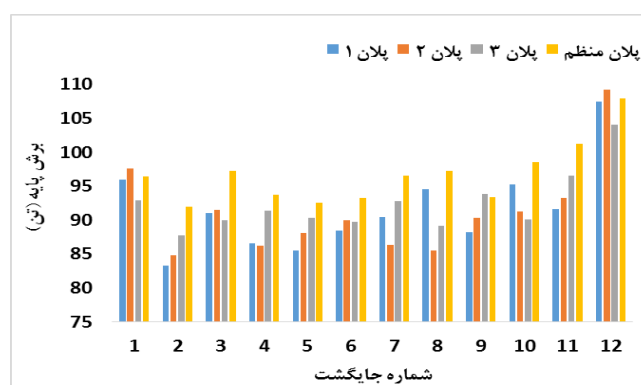
در مورد ساختمان های منظم نیز بررسی های مشابهی صورت گرفته که با مقایسه نتایج بدست آمده از ساختمان های منظم و نامنظم، عملکرد جداگرهای اصطکاکی پاندولی و جداگرهای لاستیکی در ساختمان های مختلف بیش از پیش نمایان می شود. بررسی این نتایج نشان می دهد که استفاده از جداگرهای لاستیکی هسته سربی در ستون های بیرونی و جداگرهای اصطکاکی پاندولی در ستون های داخلی برخلاف نمونه های نامنظم، دارای عملکرد بسیار بهتری نسبت به سایر ترکیب ها می باشد. از دلایل این امر می توان به استفاده از جداگرهای اصطکاکی پاندولی که تحت اثر وزن وارد شده عمل می کنند (با توجه به منظم بودن سازه)، در ستون های داخلی و کنترل مناسب جابجایی در ستون های خارجی توسط جداگرهای لاستیکی (با توجه به منظم بودن سازه) اشاره کرد. همچنین در سازه های منظم، درصد جذب انرژی نیز همچون مقادیر برش پایه دارای تفاوت بسزایی نمی باشد.

۶-۷- بررسی سایر ترکیب ها

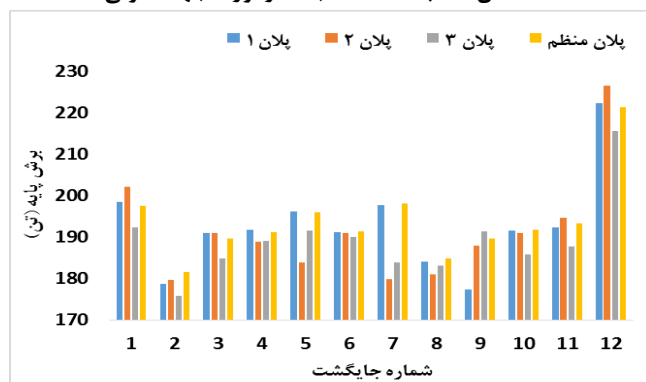
همچنین با بررسی نتایج دیگر ترکیب هایی همچون ترکیب شماره ۵ و ۱۰، مشاهده می شود که استفاده تجمعی از یک نوع جداگر در قسمت های مختلف که حالتی از سری بودن ترکیب ها را در برگیرد، دارای ضعیف ترین عملکرد می باشد که با توجه به عملکرد متفاوت این دو جداگر در مستهلک کردن انرژی و طراحی مختلف پارامترهایی نظیر سختی و بیشترین جابجایی، نتیجه ای منطقی حاصل شده است. این دلایل در مورد عملکرد نسبتا ضعیف ترکیب شطرنجی جداگرها نیز صادق است.



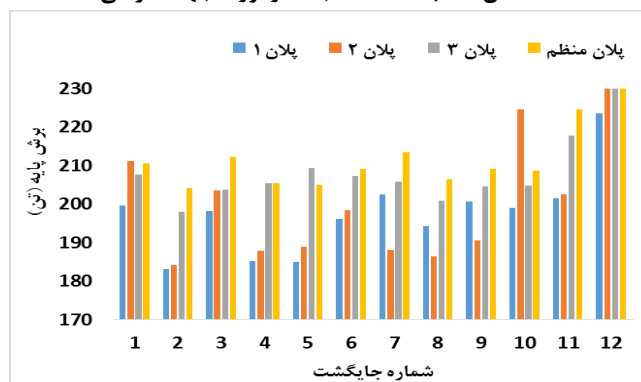
ساختمان ۳ طبقه تحت ۷ جفت رکورد-جهت طولی



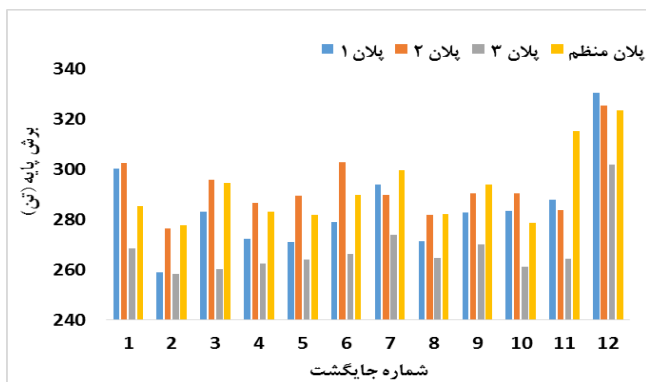
ساختمان ۳ طبقه تحت ۷ جفت رکورد-جهت عرضی



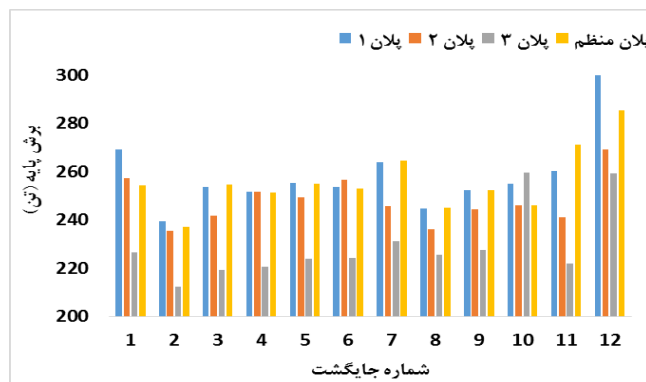
ساختمان ۷ طبقه تحت ۷ جفت رکورد-جهت طولی



ساختمان ۷ طبقه تحت ۷ جفت رکورد-جهت عرضی

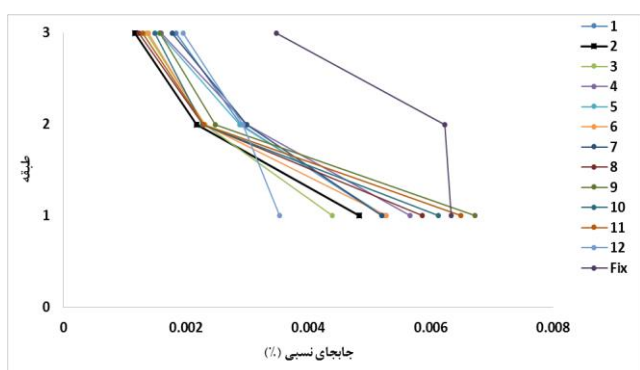


ساختمان ۱۰ طبقه تحت ۷ جفت رکورد-جهت طولی

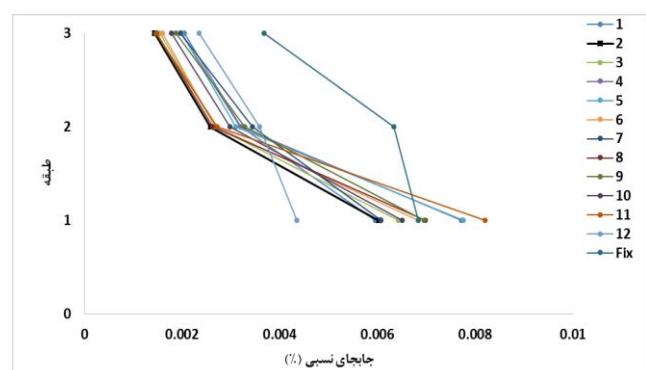


ساختمان ۱۰ طبقه تحت ۷ جفت رکورد-جهت عرضی

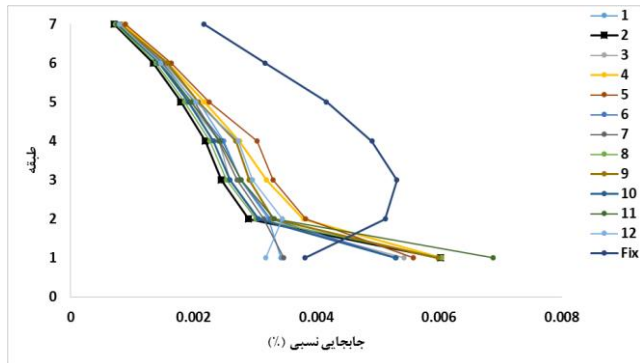
شکل ۷: میانگین برش پایه ترکیب های مختلف تحت ۷ جفت رکورد



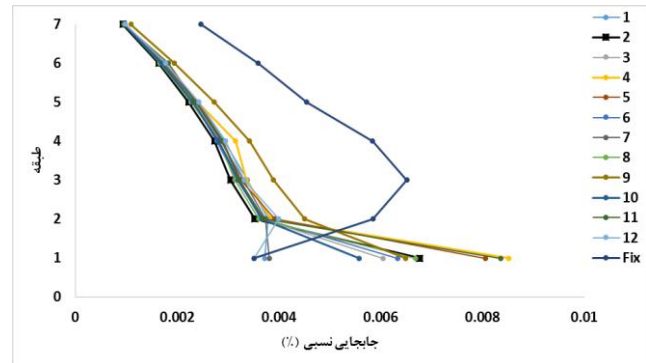
ساختمان ۳ طبقه تحت ۷ جفت رکورد-جهت طولی پلان ۱



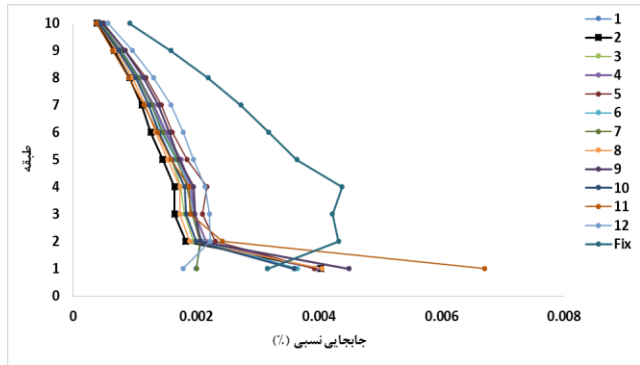
ساختمان ۳ طبقه تحت ۷ جفت رکورد-جهت عرضی پلان ۱



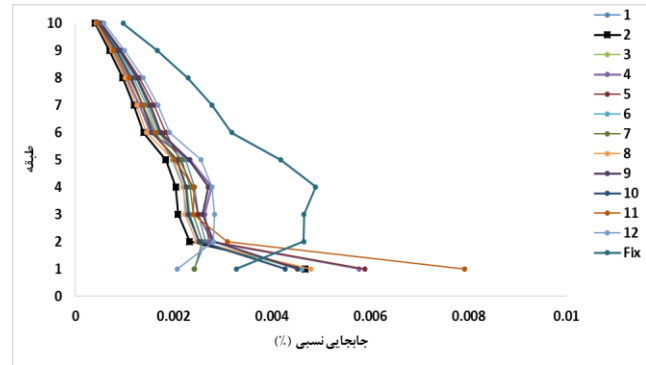
ساختمان ۷ طبقه تحت ۷ جفت رکورد-جهت طولی پلان ۱



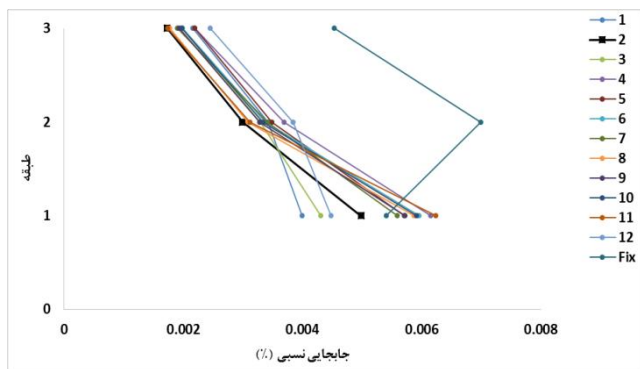
ساختمان ۷ طبقه تحت ۷ جفت رکورد-جهت عرضی پلان ۱



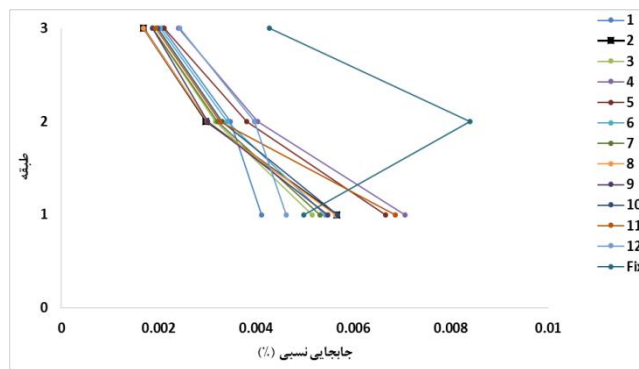
ساختمان ۱۰ طبقه تحت ۷ جفت رکورد-جهت طولی پلان ۱



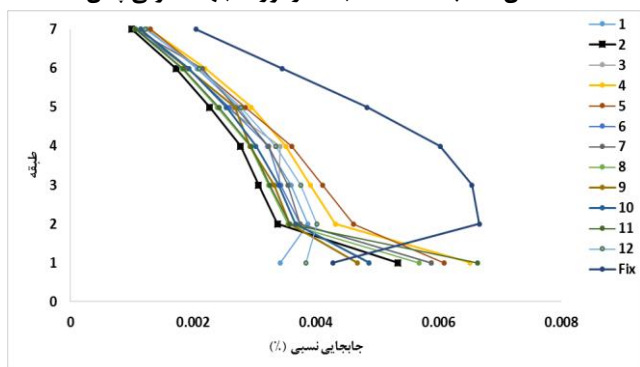
ساختمان ۱۰ طبقه تحت ۷ جفت رکورد-جهت عرضی پلان ۱



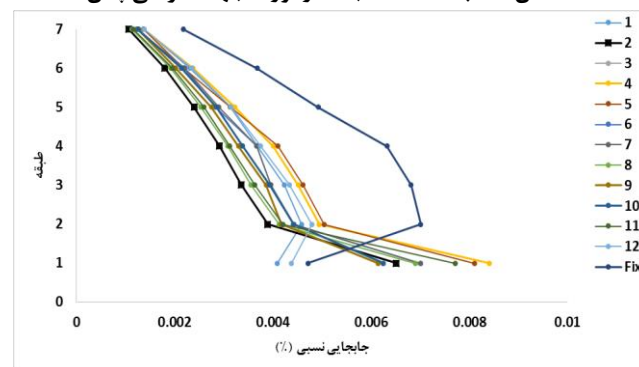
ساختمان ۳ طبقه تحت ۷ جفت رکورد-جهت طولی پلان ۲



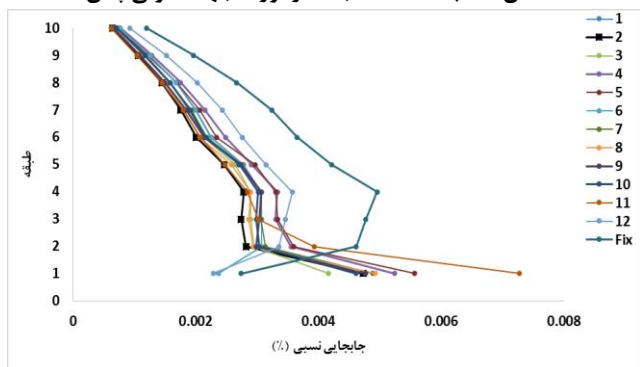
ساختمان ۳ طبقه تحت ۷ جفت رکورد-جهت عرضی پلان ۲



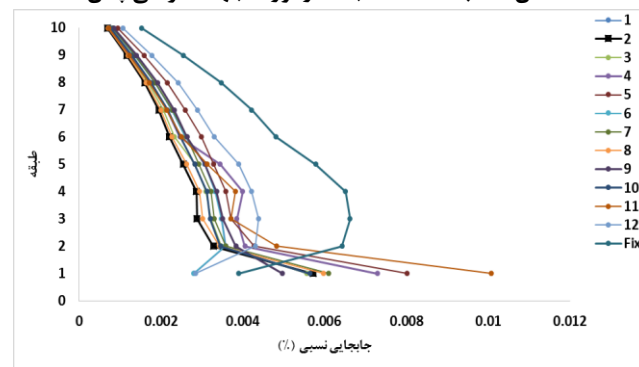
ساختمان ۷ طبقه تحت ۷ جفت رکورد-جهت طولی پلان ۲



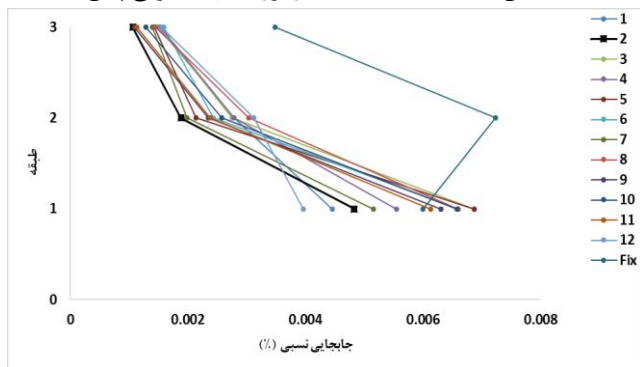
ساختمان ۷ طبقه تحت ۷ جفت رکورد-جهت عرضی پلان ۲



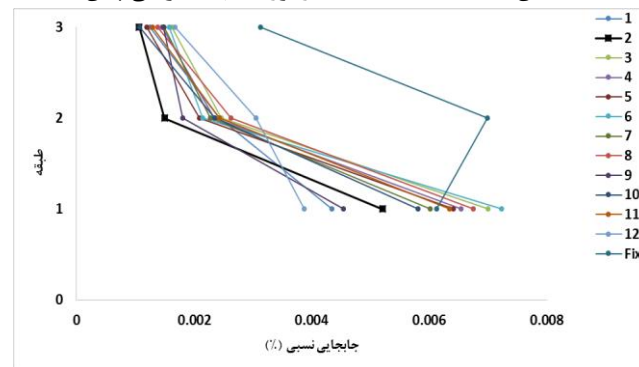
ساختمان ۱۰ طبقه تحت ۷ جفت رکورد-جهت طولی پلان ۲



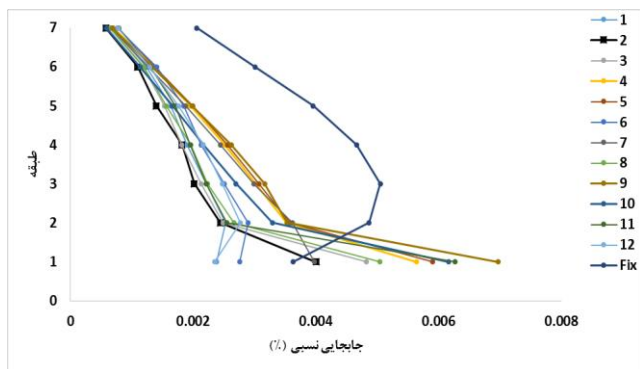
ساختمان ۱۰ طبقه تحت ۷ جفت رکورد-جهت عرضی پلان ۲



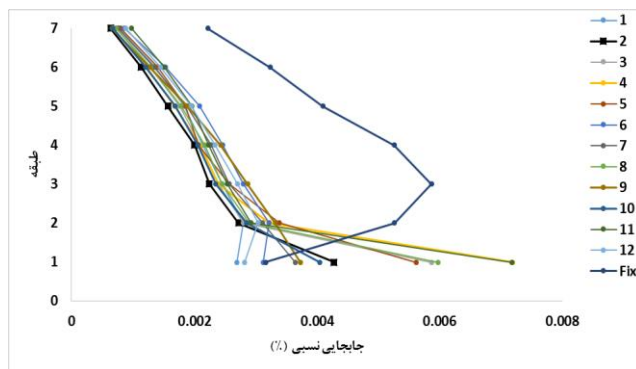
ساختمان ۳ طبقه تحت ۷ جفت رکورد-جهت طولی پلان ۳



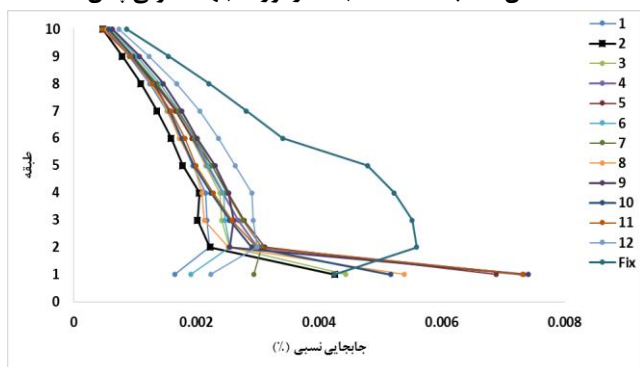
ساختمان ۳ طبقه تحت ۷ جفت رکورد-جهت عرضی پلان ۳



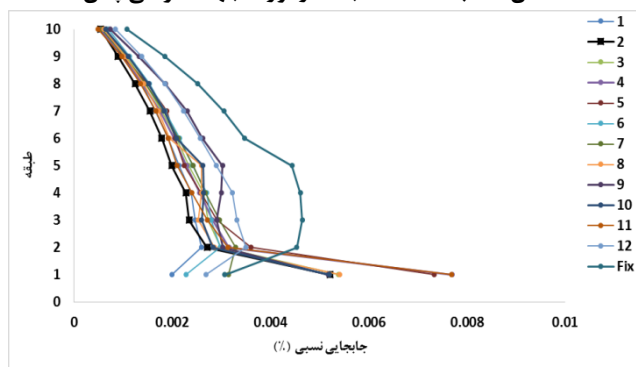
ساختمان ۷ طبقه تحت ۷ جفت رکورد-جهت طولی پلان ۳



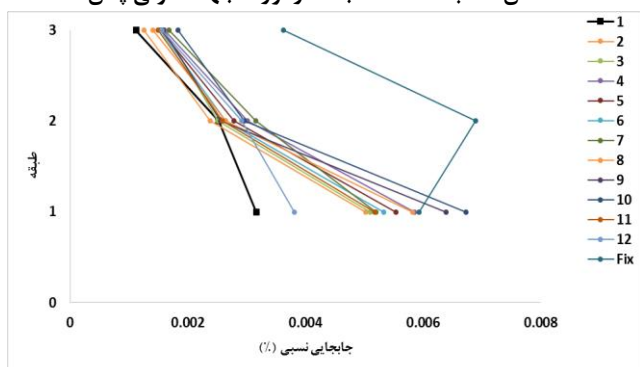
ساختمان ۷ طبقه تحت ۷ جفت رکورد-جهت عرضی پلان ۳



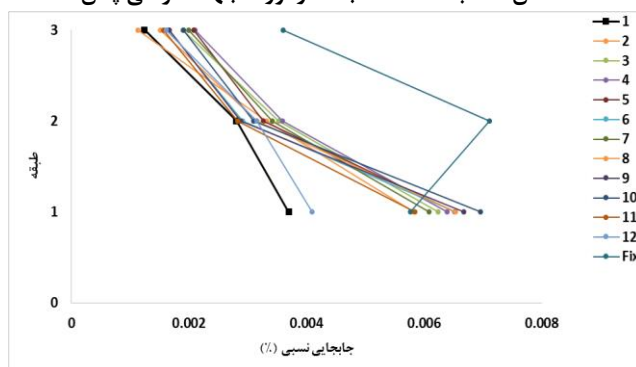
ساختمان ۱۰ طبقه تحت ۷ جفت رکورد-جهت طولی پلان ۳



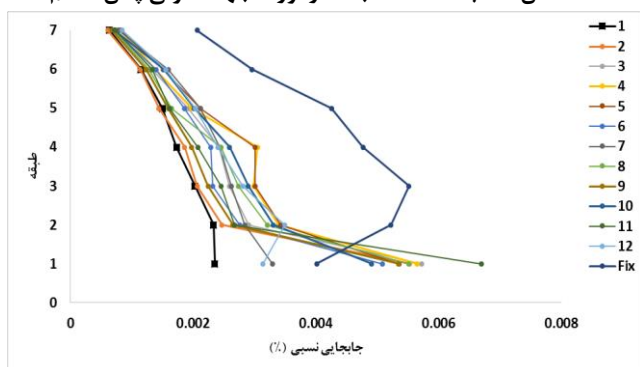
ساختمان ۱۰ طبقه تحت ۷ جفت رکورد-جهت عرضی پلان ۳



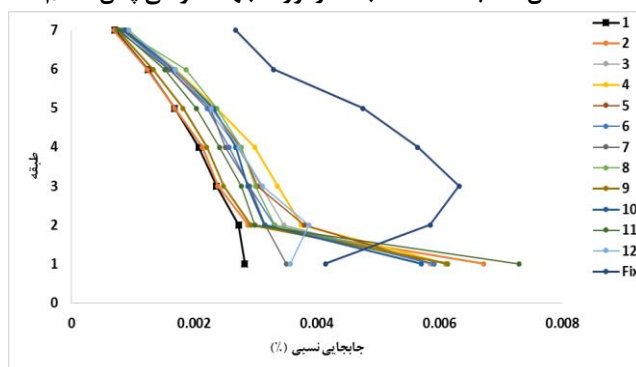
ساختمان ۳ طبقه تحت ۷ جفت رکورد-جهت طولی پلان منظم



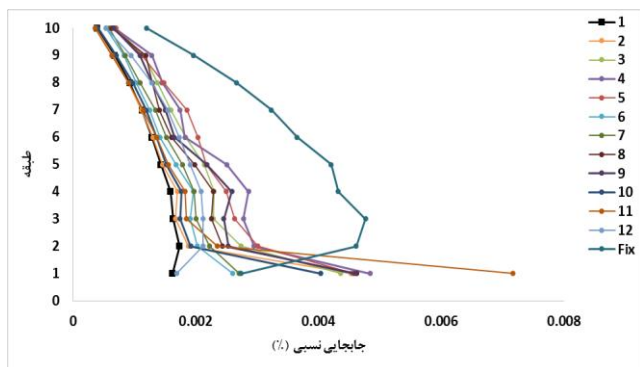
ساختمان ۳ طبقه تحت ۷ جفت رکورد-جهت عرضی پلان منظم



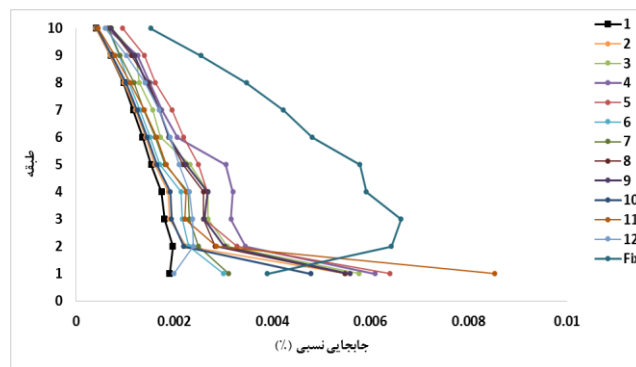
ساختمان ۷ طبقه تحت ۷ جفت رکورد-جهت طولی پلان منظم



ساختمان ۷ طبقه تحت ۷ جفت رکورد-جهت عرضی پلان منظم

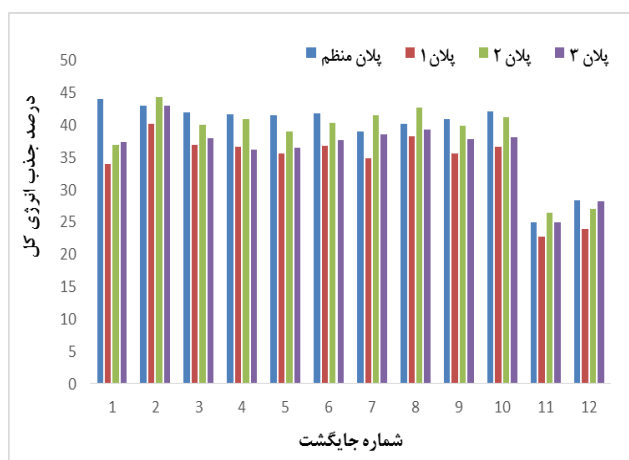


ساختمان ۱۰ طبقه تحت ۷ جفت رکورد-جهت طولی پلان منظم

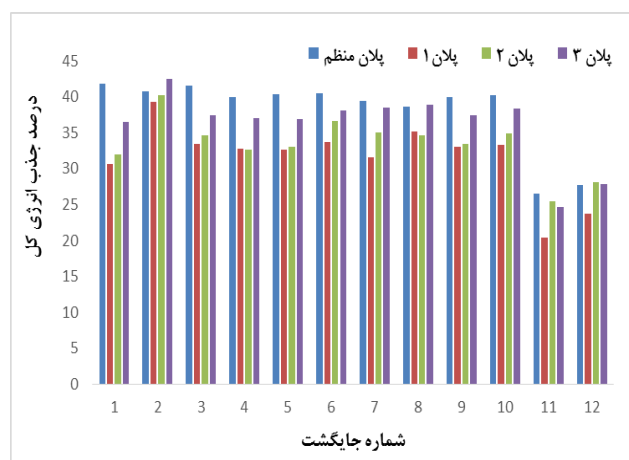


ساختمان ۱۰ طبقه تحت ۷ جفت رکورد-جهت عرضی پلان منظم

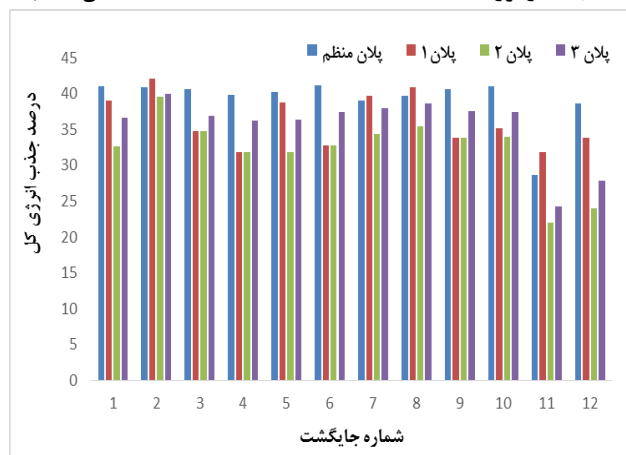
شکل ۸: میانگین بیشترین جابجای نسبی طبقات طبقه تحت ۷ جفت رکورد



ساختمان ۳ طبقه تحت ۷ جفت رکورد



ساختمان ۷ طبقه تحت ۷ جفت رکورد



ساختمان ۱۰ طبقه تحت ۷ جفت رکورد

شکل ۹: مقادیر درصد جذب انرژی کل سازه توسط جداگرها

۸-۶- بررسی طراحی های صورت گرفته جداگرها

در جدول ۶ و ۷ نیز بیشترین مقادیر جابجایی روی جداگر در ۷ رکورد اعمالی (در جهت طولی و عرضی) ارائه شده است. مقایسه این نتایج با مقادیر جابجایی طراحی شده جداگرها در جدول ۲ و ۳، نشان از طراحی مناسب جداگرها داشته و جابجایی هیچ یک از جداگرها از حد نهایی آن بیشتر نشده است.

جدول ۶: مقادیر بیشترین جابجایی‌ها بر روی جداگرها در مدل‌های مختلف در جهت طولی

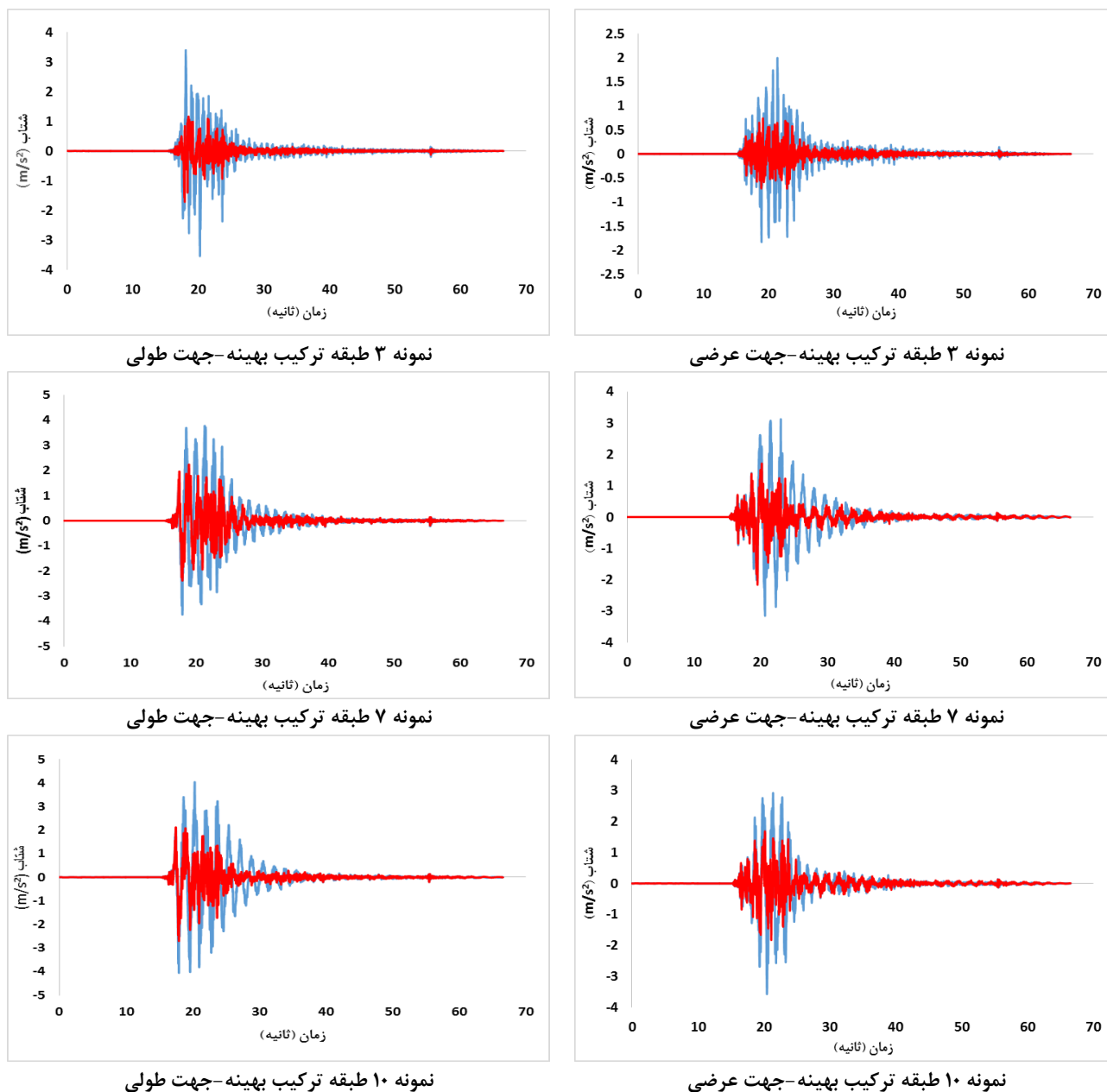
ترکیب (cm)۱	ترکیب (cm)۲	ترکیب (cm)۳	ترکیب (cm)۴	ترکیب (cm)۵	ترکیب (cm)۶	ترکیب (cm)۷	ترکیب (cm)۸	ترکیب (cm)۹	ترکیب (cm)۱۰	ترکیب (cm)۱۱	ترکیب (cm)۱۲	نوع پلان
۸/۱	۸/۷	۷/۷	۸/۴	۸/۲	۸/۵	۷/۵	۷/۷	۷/۹	۷/۳	۸	۷/۱	پلان منظم ۳ طبقه
۱۲/۴	۱۲/۸	۱۱/۱	۱۲/۵	۱۲/۳	۱۲/۳	۱۱/۹	۱۱/۵	۱۱/۳	۱۱	۱۰/۸	۱۰/۶	پلان منظم ۷ طبقه
۱۴/۳	۱۵/۷	۱۴/۵	۱۵/۱	۱۵/۴	۱۴/۹	۱۴/۴	۱۴/۷	۱۴/۱	۱۳/۹	۱۱/۹	۱۱/۲	پلان منظم ۱۰ طبقه
۵/۵	۹/۳	۶/۱	۷/۳	۶/۸	۶/۳	۶/۱	۵/۸	۷/۵	۵/۷	۶/۶	۴/۷	پلان ۳-۱ طبقه
۱۰/۸	۱۳/۳	۱۰/۸	۱۱	۱۰/۵	۱۱/۲	۱۱/۷	۱۲/۵	۱۲/۲	۱۱/۸	۱۱/۳	۹/۵	پلان ۷-۱ طبقه
۱۲/۸	۱۵/۹	۱۲/۸	۱۱/۸	۱۲/۵	۱۱/۶	۱۱/۸	۱۴/۳	۱۴/۱	۱۳/۷	۱۲/۲	۱۰/۱	پلان ۱۰-۱ طبقه
۳/۶	۸/۲	۵/۴	۶/۶	۷/۵	۷/۴	۷/۸	۸/۲	۶/۱	۵/۱	۶/۹	۴	پلان ۳-۲ طبقه
۹/۸	۱۳/۷	۹/۷	۱۲/۱	۱۱/۸	۱۱/۵	۱۲/۸	۱۲/۵	۱۰/۴	۹/۳	۱۱/۷	۷/۹	پلان ۷-۲ طبقه
۱۰/۳	۱۵/۸	۱۰/۸	۱۵/۲	۱۴/۸	۱۲/۵	۱۴/۸	۱۴/۷	۱۲/۲	۱۰/۸	۱۲/۷	۹/۱	پلان ۱۰-۲ طبقه
۷/۶	۹/۱	۷/۲	۸/۳	۸/۷	۸/۱	۷/۹	۸/۴	۸/۲	۷/۷	۸/۶	۶/۸	پلان ۳-۳ طبقه
۱۲	۱۳/۵	۱۰/۹	۱۲/۵	۱۲	۱۲/۳	۱۲/۶	۱۱/۸	۱۱/۵	۱۰/۸	۱۱/۹	۱۰/۴	پلان ۷-۳ طبقه
۱۴/۷	۱۵/۵	۱۲/۳	۱۳/۷	۱۴/۴	۱۴/۷	۱۳/۳	۱۳/۱	۱۳/۴	۱۲/۶	۱۳/۹	۱۱/۱	پلان ۱۰-۳ طبقه

جدول ۷: مقادیر بیشترین جابجایی‌ها بر روی جداگرها در مدل‌های مختلف در جهت عرضی

ترکیب (cm)۱	ترکیب (cm)۲	ترکیب (cm)۳	ترکیب (cm)۴	ترکیب (cm)۵	ترکیب (cm)۶	ترکیب (cm)۷	ترکیب (cm)۸	ترکیب (cm)۹	ترکیب (cm)۱۰	ترکیب (cm)۱۱	ترکیب (cm)۱۲	نوع پلان
۸/۴	۸/۳	۷/۶	۸/۰	۷/۱	۷/۷	۷/۶	۷/۴	۷/۸	۷/۳	۸/۱	۶/۶	پلان منظم ۳ طبقه
۱۳/۷	۱۳/۵	۱۳/۳	۱۳/۵	۱۲/۶	۱۳/۳	۱۳/۰	۱۲/۶	۱۲/۸	۱۳/۰	۱۳/۹	۹/۶	پلان منظم ۷ طبقه
۱۶/۴	۱۶/۶	۱۶/۰	۱۵/۸	۱۴/۶	۱۶/۲	۱۵/۲	۱۵/۰	۱۵/۸	۱۶/۰	۱۵/۴	۱۲/۰	پلان منظم ۱۰ طبقه
۴/۶	۸/۴	۵/۸	۷/۶	۶/۸	۵/۹	۵/۵	۶/۲	۶/۰	۵/۸	۶/۴	۴/۱	پلان ۳-۱ طبقه
۷/۶	۱۳/۹	۹/۶	۱۲/۶	۱۱/۳	۹/۸	۹/۱	۱۰/۲	۱۰/۰	۹/۶	۱۰/۸	۶/۸	پلان ۷-۱ طبقه
۱۳/۸	۱۶/۲	۱۳/۰	۱۳/۸	۱۴/۸	۱۳/۴	۱۲/۲	۱۳/۴	۱۵/۶	۱۲/۶	۱۶/۰	۱۰/۰	پلان ۱-۱۰ طبقه
۶/۶	۹/۷	۷/۱	۷/۸	۸/۸	۷/۷	۸/۳	۷/۶	۸/۵	۷/۱	۸/۸	۵/۹	پلان ۳-۲ طبقه
۱۰/۰	۱۳/۱	۱۰/۵	۱۱/۷	۱۲/۴	۱۰/۹	۱۱/۳	۱۱/۷	۱۱/۵	۱۰/۵	۱۱/۹	۸/۹	پلان ۷-۲ طبقه
۱۲/۰	۱۵/۶	۱۲/۸	۱۲/۶	۱۳/۸	۱۲/۰	۱۳/۰	۱۲/۸	۱۴/۰	۱۲/۸	۱۴/۱	۹/۶	پلان ۲-۱۰ طبقه
۶/۶	۸/۸	۷/۰	۸/۱	۸/۳	۷/۴	۷/۷	۷/۴	۷/۸	۷/۱	۸/۴	۶/۰	پلان ۳-۳ طبقه
۹/۸	۱۳/۹	۱۰/۷	۱۲/۸	۱۲/۴	۱۰/۲	۱۱/۱	۱۱/۸	۱۱/۵	۱۰/۷	۱۳/۸	۹/۱	پلان ۷-۳ طبقه
۱۱/۶	۱۵/۸	۱۲/۶	۱۴/۰	۱۳/۸	۱۲/۰	۱۳/۰	۱۳/۶	۱۳/۰	۱۲/۸	۱۴/۴	۱۰/۶	پلان ۳-۱۰ طبقه

۹-۶- عملکرد ترکیب بهینه انتخابی

با انتخاب استفاده از ترکیب جداگرهای اصطکاکی پاندولی در ستون های بیرونی و جداگرهای لاستیکی هسته سربی در ستون های داخلی بعنوان طرح بهینه در سازه های نامنظم، عملکرد جداگرها و استفاده از این نوع ترکیب در مدل ها مورد بررسی بیشتری قرار گرفته است. در شکل ۱۰ مقادیر کنترل شتاب بام در رکورد زلزله بم توسط ترکیب جداگرها در مقایسه با تکیه گاه گیرداری آن نشان داده شده است. عملکرد مناسب استفاده از جداگرهای اصطکاکی پاندولی در ستون های بیرونی و جداگرهای لاستیکی در ستون های داخلی در این شکل قابل مشاهده می باشد. شتاب بام نیز در قسمت پیشینه رکورد، کاهش چشم گیر داشته است. همچنین در جدول ۸ مقادیر ماکزیمم شتاب در جهت مقایسه کمی نتایج ارائه شده است.



شکل ۱۰: نمودار شتاب ماکزیمم-زمان طبقه بام

جدول ۸: مقایسه کمی بیشینه شتاب

نمونه ۱۰ طبقه	نمونه ۱۰ طبقه	نمونه ۷ طبقه	نمونه ۷ طبقه	نمونه ۳ طبقه	نمونه ۳ طبقه	
جهت طولی	جهت عرضی	جهت طولی	جهت عرضی	جهت طولی	جهت عرضی	
۴/۰۶	۳/۵۷	۳/۷۷	۳/۱۵	۳/۲۵	۱/۹	ماکزیمم شتاب (تکیه گاه ثابت) - (m/s ²)
۲/۳۵	۱/۸۲	۲/۱	۱/۷	۱/۷۱	۰/۷۴	ماکزیمم شتاب (جداگر) - (m/s ²)

۷- مقایسه با نتایج سایر تحقیقات

با توجه به نتایج بدست آمده در این تحقیق، در این بخش به مقایسه کمی و کیفی نتایج با تحقیقات انجام شده در زمینه استفاده از جداگرهای اصطکاکی پاندولی و لاستیکی هسته سربی بصورت منفرد و ترکیبی پرداخته می شود.

تحقیقات شربتدار و همکاران در سال ۲۰۱۱ نشان میدهد که عملکرد جداگرهای اصطکاکی پاندولی در کنترل برش پایه و عملکرد جداگرهای لاستیکی هسته سربی در کنترل شتاب بام مناسب تر می باشد [۳۰]. در طی تحقیق انجام شده توسط بذرافشان و خاجی در سال ۲۰۱۶، جداگرهای اصطکاکی پاندولی و لاستیکی هسته سربی بصورت جداگانه و منفرد در سازه های بلند مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت. نتایج این تحقیق نشان می دهد که در نظر گرفتن پارامترهای طرح یکسان جداگرهای اصطکاکی کنترل جابجایی مطلوب تری را فراهم می کنند و در مقابل جداگرهای لاستیکی هسته سربی از نظر شرایط عملکردی و کاهش شتاب مناسب تر می باشند [۳۱]. نتایج تحقیق مונجی و همکاران در سال ۲۰۱۵ [۱۹] نشان از عملکرد بهتر جداگرهای هسته سربی در ستون های بیرونی و جداگرهای اصطکاکی پاندولی در ستون های درونی در هر دو پلان منظم و نامنظم دارد. حسینی واعظ و همکاران در سال ۲۰۱۶، با توجه به تحلیل های صورت گرفته و با در نظر گرفتن پارامترهای همچون میزان اتلاف انرژی سیستم و شتاب روسازه، پیشنهاد ترکیب ۲۵ درصد جداگر های اصطکاکی پاندولی و ۷۵ درصد جداگرهای لاستیکی هسته سربی را ارائه کرده اند و می تواند عملکرد مناسب تری نسبت به سایر ترکیب ها و یا استفاده منفرد از جداگرها در سازه های منظم و کوتاه مرتبه داشته باشد اما در مورد نحوه آرایش و چینش جداگرها بررسی انجام نشده است [۳۲]. در تحقیقات صورت گرفته در سال ۲۰۱۶ کنسلارا و همکاران با تحلیل های غیرخطی انجام گدفته و بر اساس میزان برش پایه و جابجایی طبقات ترکیب موازی جداگر های لاستیکی و اصطکاکی پیشنهاد شده است [۲۲].

از جمله نتایج مشترک تمامی تحقیقات صورت گرفته می توان به بهبود عملکرد جداگرهای لرزه ای در صورت استفاده ترکیبی صحیح از آنها اشاره کرد. همچنین از جمله تفاوت چشم گیر و ضعف های موجود در نتایج تحقیقات نامبرده می توان به موارد زیر اشاره کرد:

- ❖ عدم در نظر گرفتن نامنظمی های مختلف
- ❖ عدم در نظر گرفتن سازه با تعداد طبقات مختلف
- ❖ عدم در نظر گرفتن ترکیب های مختلف در چینش جداگرها
- ❖ تعداد اندک تحلیل ها
- ❖ عدم بررسی تمامی پاسخ های لرزه ای سازه

با توجه به موارد مطرح شده، در این تحقیق سعی شده است تا ضمن پوشش ضعف های موجود در تحقیقات فعلی، ترکیب بهینه جداگرهای اصطکاکی پاندولی و لاستیکی هسته سربی در سازه های منظم و نامنظم در پلان مورد بررسی قرار گیرد. بدین منظور با انجام تحلیل های مختلف بر روی پلان های مختلف، تعداد طبقات مختلف و ترکیب های مختلف، ترکیب بهینه برای ساختمان های نامنظم در پلان ارائه شده است و با مورد منظم آن مورد مقایسه قرار گرفته است. این ترکیب بهینه که با قرارگیری جداگرهای اصطکاکی پاندولی در ستون های بیرونی و جداگرهای لاستیکی هسته سربی در ستون های داخلی سازه ها صورت پذیرفته است منجر به کاهش مطلوب برش پایه، جابجایی نسبی طبقات و شتاب وارد به سازه و جذب انرژی بهتر نسبت به سایر ترکیب های جداگرها شده است. این نتایج با توجه به تعداد مناسب تحلیل ها، از قابلیت اطمینان بسیار بهتر و درصد خطای کمتری نسبت به سایر تحقیقات انجام شده دارد.

۸- نتیجه گیری

در این مقاله به بررسی ترکیب بهینه استفاده همزمان جداگرهای لاستیکی هسته سربی جداگرهای اصطکاکی پاندولی در سازه های نامنظم پرداخته شده است. بدین منظور ۳ پلان نامنظم برای سازه های ۳،۷ و ۱۰ طبقه مورد استفاده قرار گرفته و با مورد منظم آن مورد مقایسه قرار گرفته است. سازه ها با اعمال ۷ جفت رکورد در دو جهت اصلی سازه بصورت همزمان بوسیله تحلیل تاریخچه زمانی غیر خطی مورد تحلیل قرار گرفته اند که نتایج زیر حاصل شده است:

- جداگرهای اصطکاکی پاندولی در خروج از مرکزیت های تصادفی جرم، با استفاده از تنظیم نیروهای سختی و اصطکاکی، موجب قرار گیری مرکز سختی جداگرها در مرکز جرم می شوند. بنابراین در سازه های نامنظم که امکان پیچش سازه وجود دارد، استفاده از این جداگرها در ستون ها بیرونی موجب عملکرد مناسب سازه می شوند. همچنین در این سازه ها نامنظم، جداگرهای لاستیکی هسته سربی عملکرد مناسبی از خود نشان داده اند که در مجموع باعث انتخاب این ترکیب بعنوان ترکیب بهینه استفاده همزمان از جداگرها در سازه های نامنظم می شوند.
- استفاده از جداگرهای اصطکاکی پاندولی در ستون های بیرونی و جداگرهای هسته سربی در ستون های داخلی بعنوان ترکیب بهینه، برش پایه، جابجایی نسبی طبقات و شتاب وارد به سازه را به طرز مطلوب و مناسبی نسبت به سایر مدل ها کاهش می دهند و درصد جذب انرژی مناسبی نیز دارند. این مقادیر برای برش پایه حدود ۵ الی ۲۵ درصد، برای جابجایی نسبی طبقات حدود ۱۰ الی ۳۵ درصد و برای شتاب وارد به سازه حدود ۱۰ الی ۳۰ درصد کاهش نسبت به سایر جایگشت ها و برای جذب انرژی حدود ۱۰ الی ۴۰ درصد افزایش نسبت به سایر جایگشت ها می باشد.
- استفاده از جداگرهای اصطکاکی پاندولی و یا لاستیکی هسته سربی بصورت منفرد در مقایسه با نوع ترکیبی آن، عملکرد نامطلوبی در جذب انرژی، کاهش برش پایه و کاهش جابجایی نسبی طبقات داشته و استفاده از آنها بصورت ترکیبی علی الخصوص در سازه های نامنظم توصیه می شود.
- با منظم شدن سازه، استفاده از ترکیب های مختلف بطور مشابهی برش پایه را کنترل کرده و تفاوت عملکرد چشم گیری وجود ندارد، اما برای کنترل جابجایی نسبی طبقات، استفاده از جداگرهای اصطکاکی پاندولی در ستون های مرکزی بدلیل وجود وزن بیشتر سازه و جداگرهای لاستیکی هسته سربی در ستون های بیرونی عملکرد بسیار مناسبی نسبت به سایر ترکیب ها داشته و استفاده از این ترکیب در سازه های منظم توصیه می شود.
- استفاده از ترکیب های مختلف در سازه های منظم باعث بوجود آمدن بیشترین جابجایی نسبی در طبقات اول سازه ها شده و مقادیر آن به نسبت سایر طبقات بسیار زیاد بوده و تا ۵ برابر طبقات بالاتر می باشد، اما استفاده از جداگرهای لاستیکی در ستون های بیرونی موجب کنترل مناسب این امر می گردد.

۹- فهرست علائم

علائم انگلیسی

K_{eff}	سختی جانبی موثر جداگر لاستیکی هسته سربی
T_D	دوره ی تناوب طبیعی اصلی سازه ی جداسازی شده
W	وزن سازه
C	ضریب میرایی
D_D	جابجایی جداگر در در زلزله طرح آیین نامه
S_{1D}	شتاب طیفی در زمان تناوب یک ثانیه برای زلزله طرح
B_1	ضریب میرایی جداگرتوجه به نشریه ۳۶۰
Q	مقاومت تسلیم سرب
K_d	سختی پس از تسلیم جداگر لاستیکی هسته سربی

سختی الاستیک جداگر لاستیکی هسته سربی	K_e
تغییر مکان تسلیم جداگر لاستیکی هسته سربی	D_y
نیروی تسلیم جداگر لاستیکی هسته سربی	f_y
شعاع جداگر اصطکاکی	R_{FPS}
نیروی اصطکاک در سطح تماس	F_f
سختی جداگر اصطکاکی	K_{FPS}
علائم یونانی	
میرایی موثر جداگر	ξ_{eff}
ضریب اصطکاک سطح	μ

مراجع

- [1] Zayas, V. A., Low, S. A., & Mahin, S. A. (1987). The FPS earthquake resisting system experimental report. Earthquake Engineering Research Center.
- [2] Jangid, R. S. (2005). Optimum friction pendulum system for near-fault motions. *Engineering Structures*, 27(3), 349-359.
- [3] Eröz, M., & DesRoches, R. (2013). The influence of design parameters on the response of bridges seismically isolated with the friction pendulum system (FPS). *Engineering Structures*, 56, 585-599.
- [4] Castaldo, P., & Ripani, M. (2016). Optimal design of friction pendulum system properties for isolated structures considering different soil conditions. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 90, 74-87.
- [5] Lomiento, G., Bonessio, N., & Benzoni, G. (2013). Friction model for sliding bearings under seismic excitation. *Journal of Earthquake Engineering*, 17(8), 1162-1191.
- [6] Krishnamoorthy, A., & Anita, S. (2016, February). Soil-structure interaction analysis of a FPS-isolated structure using finite element model. In *Structures* (Vol. 5, pp. 44-57). Elsevier.
- [7] Mazza, F., & Mazza, M. (2016). Nonlinear seismic analysis of irregular rc framed buildings base-isolated with friction pendulum system under near-fault excitations. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 90, 299-312.
- [8] Peng, P., Dongbin, Z., Yi, Z., Yachun, T., & Xin, N. (2018). Development of a tunable friction pendulum system for semi-active control of building structures under earthquake ground motions. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 47(8), 1706-1721.
- [9] Bao, Y., & Becker, T. C. (2018). Effect of design methodology on collapse of friction pendulum isolated moment-resisting and concentrically braced frames. *Journal of Structural Engineering*, 144(11), 04018203.
- [10] Dao, N. D., Ryan, K. L., & Nguyen-Van, H. (2019). Evaluating simplified models in predicting global seismic responses of a shake table-test building isolated by triple friction pendulum bearings. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 48(6), 594-610.
- [11] Mkrtychev, O. V., Dzhinchvelashvili, G. A., & Bunov, A. A. (2014). Study of lead rubber bearings operation with varying height buildings at earthquake. *Procedia Engineering*, 91, 48-53.
- [12] Hu, K., Zhou, Y., Jiang, L., Chen, P., & Qu, G. (2017). A mechanical tension-resistant device for lead rubber bearings. *Engineering Structures*, 152, 238-250.
- [13] Moghadam, S. R., & Konstantinidis, D. (2017). Finite element study of the effect of support rotation on the horizontal behavior of elastomeric bearings. *Composite Structures*, 163, 474-490.
- [14] Faal, H. N., & Poursha, M. (2017). Applicability of the N2, extended N2 and modal pushover analysis methods for the seismic evaluation of base-isolated building frames with lead rubber bearings (LRBs). *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 98, 84-100.
- [15] Hamaguchi, H., Wake, T., Yamamoto, M., & Kikuchi, M. (2019). Practical application of lead rubber bearings with fail-safe mechanism. *Japan Architectural Review*.

- [16] Bhandari, M., Bharti, S. D., Shrimali, M. K., & Datta, T. K. (2019). Seismic fragility analysis of base-isolated building frames excited by near-and far-field earthquakes. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 33(3), 04019029.
- [17] Torunbalci, N., & Ozpalkanlar, G. (2008, October). Earthquake response analysis of mid-story buildings isolated with various seismic isolation techniques. In *The 14th World Conference on Earthquake Engineering*, Beijing, China.
- [18] Vaez, S. H., Naderpour, H., Kalantari, S. M., & Fakharian, P. (2012). Proposing the Optimized Combination of Different Isolation Bearings Subjected to Near-Fault Ground Motions. *15th World Conference on Earthquake Engineering (15WCEE)*, September, pp. 24-28.
- [19] Deosarkar, M. U., & Gowardhan, S. D. (2015). Non Linear Dynamic Response Of Combined Isolation System On Symmetric And Asymmetric Buildings. *International Journal of Informative & Futuristic Research (IJIFR)*, 3, 1021-1035.
- [20] Zaheer, R., Samdani, Hassan., Banulatha.G.N, Manu.J.. (2015). Comparative Study on Performance of Multi-Storey Structure Rubber Bearing and Friction Pendulum Base Isolation Systems, *International Journal of Advanced Research in Education Technology (IJARET)*, 2(2).
- [21] Tolani, S., & Sharma, A. (2016). Effectiveness of base isolation technique and influence of isolator characteristics on response of a Base isolated building. *American Journal of Engineering Research*, 5(5), 198-209.
- [22] Cancellara, D., & De Angelis, F. (2016). Nonlinear dynamic analysis for multi-storey RC structures with hybrid base isolation systems in presence of bi-directional ground motions. *Composite Structures*, 154, 464-492.
- [23] Nithin, A. V., & Jayalekshmi, R. Seismic Analysis of Multi Storey RC Buildings supported on Single and Combined Base Isolation Systems.
- [24] Ryan, K. L., Okazaki, T., Coria, C. B., Sato, E., & Sasaki, T. (2018). Response of hybrid isolation system during a shake table experiment of a full-scale isolated building. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 47(11), 2214-2232.
- [25] B.H.R. Center, Guidelines for Seismic Isolated Buildings,(2010), BHRC, In persian,Tehran.Iran.
- [26] Cardone, D., Gesualdi, G., & Brancato, P. (2015). Restoring capability of friction pendulum seismic isolation systems. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 13(8), 2449-2480.
- [27] B.H.R. Center, Standard No.2800. Iranian Code of Practice for Seismic Resistant Design of Buildings, (2016), BHRC Publication, Forth Edition, In persian, Tehran.Iran.
- [28] Manual, S. C. (2005). American institute of steel construction. Inc., Thirteenth Edition, First Print.
- [29] Mokha, A. S., Constantinou, M. C., & Reinhorn, A. M. (1990). Experimental study and analytical prediction of earthquake response of a sliding isolation system with a spherical surface.
- [30] Sharbatdar, M. K., Vaez, S. H., Amiri, G. G., & Naderpour, H. (2011). Seismic response of base-isolated structures with LRB and FPS under near fault ground motions. *Procedia Engineering*, 14, 3245-3251.
- [31] Bazafshan, A., Khaji, N. (2016). Seismic response of base-isolated high-rise buildings under long-period ground motions. *Modares Civil Engineering journal*, 16(2), 41-52.
- [32] HOSEINI, V. S., & Naderpour, H. (2016). Base-isolated structures with optimized distribution of lrb and fps isolators. *journal of Modeling in engineering*, 14(44), 105-115.