

Evaluating The Effect of Lead Rubber Bearing and Single Arc Friction Pendulum System with Different Periods In Improving The Seismic Behavior of Steel Framed Buildings

Houshyar Eimani Kalehsar

1- Associate Professor, Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

ABSTRACT

In the present study, the evaluation of the seismic performance of steel framed buildings on two types of seismic isolation systems under far-fault earthquakes has been investigated. The isolator used are lead rubber bearing and single arc friction pendulum system. In order to compare the behavior of these isolators, the effective time period is considered as one of the most important properties of the isolator. The effective time period of the isolators is 2.5, 3.5 and 4.5. Three types of steel framed buildings with special moment resistant steel frames of 3, 7 and 12 stories are placed on these isolators. These three buildings represent low-rise, mid-rise and high-rise buildings. The effect of these two types of seismic isolators has been investigated in reducing the acceleration response and the relative displacement (drift) of the floors. The results show that the efficiency of both types of lead rubber bearing and single arc friction pendulum system decreases with the increase in the height of the building. The efficiency of the single arc friction pendulum system is 14% lower than that of the lead rubber bearing. Increasing the target natural period (decreasing the stiffness of the isolator) in reducing the response of the buildings in the lead rubber bearing has an average of 27% better performance than the single arc friction pendulum system.

ARTICLE INFO

Receive Date: 20 January 2023

Revise Date: 07 April 2023

Accept Date: 16 April 2023

Keywords:

*Lead Rubber Bearing,
Single Arc Friction Pendulum
System,
Far-Fault Earthquake,
Special Moment Resistant
Frame,
Steel Framed Building*

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2023.382356.3017>

*Corresponding author: Houshyar Eimani Kalehsar
Email address: uma.ac.ir@hek

ارزیابی تأثیر سامانه‌های جداساز لرزه‌ای لاستیکی هسته سربی و اصطکاکی آونگی تک قوسی با دوره تناوب‌های مختلف در بهبود رفتار لرزه‌ای ساختمان‌های فولادی

هوشیار ایمانی کله‌سر*

۱- دانشیار، دانشکده فنی مهندسی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

چکیده

در مطالعه حاضر، ارزیابی عملکرد لرزه‌ای ساختمان‌های فولادی بر روی دو نوع سامانه جداساز لرزه‌ای تحت زلزله‌های حوزه دور از گسل مورد بررسی قرار گرفته است. جداسازهای مورد استفاده، جداساز لاستیکی هسته سربی و جداساز آونگی تک قوسی می‌باشند. جهت مقایسه رفتار این جداسازها زمان تناوب مؤثر به‌عنوان یکی از مهم‌ترین خصوصیات جداساز انتخاب و زمان تناوب مؤثر جداسازها ۲/۵، ۳/۵ و ۴/۵ در نظر گرفته شده است. سه ساختمان فولادی دارای قاب خمشی فولادی ویژه ۳، ۷ و ۱۲ طبقه بر روی جداگرها قرار گرفته و تحلیل شده‌اند. این سه ساختمان نمایانگر ساختمان‌های کوتاه مرتبه، میان مرتبه و بلندمرتبه می‌باشند. در این پژوهش، اثر این دو نوع جداساز لرزه‌ای در کاهش پاسخ شتاب و تغییر مکان نسبی بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهند کارایی هر دو نوع سامانه جداساز لاستیکی هسته سربی و جداساز اصطکاکی تک قوسی با افزایش ارتفاع ساختمان کاهش پیدا می‌کند. میزان کاهش کارایی توسط سامانه جداساز آونگی تک قوسی ۱۴ درصد نسبت به جداساز لاستیکی هسته سربی بیشتر می‌باشد. افزایش دوره تناوب طبیعی هدف (کاهش سختی جداساز) در کاهش پاسخ ساختمان‌ها در سامانه جداساز لاستیکی هسته سربی به طور متوسط ۲۷ درصد نسبت به سامانه جداساز اصطکاکی تک قوسی عملکرد بهتری دارد.

کلمات کلیدی: جداساز لاستیکی هسته سربی، جداساز اصطکاکی آونگیتک قوسی، زلزله حوزه دور از گسل، قاب خمشی فولادی ویژه، ساختمانهای فولادی

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:			
doi:	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
https://doi.org/10.22065/jsce.2023.382356.3017	۱۴۰۲/۱۰/۳۰	۱۴۰۲/۰۱/۲۷	۱۴۰۲/۰۱/۲۷	۱۴۰۲/۰۱/۱۸	۱۴۰۱/۱۰/۳۰
هوشیار ایمانی کله‌سر hek@uma.ac.ir				*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:	

۱- مقدمه

جداسازی لرزه‌ای یک روش طراحی ساده سازه‌ای برای کاهش یا حذف پتانسیل خسارات زمین‌لرزه می‌باشد. استفاده صحیح از این فن آوری سبب بهبود رفتار سازه‌ها شده و رفتار سازه در حین زمین‌لرزه‌های بزرگ، عمدتاً در محدوده ارتجاعی باقی می‌ماند [۱]. مهم‌ترین مسئله در طراحی سازه‌ها چگونگی به حداقل رساندن تغییر مکان نسبی بین طبقه‌ای و شتاب‌های طبقات است. تغییر مکان‌های بین طبقه‌ای زیاد سبب خسارت دیدن اجزای سازه‌ای و تجهیزات حساس به جابجایی نسبی طبقات می‌شود. تغییر مکان بین طبقه‌ای را میتوان با افزایش سختی سازه کاهش داد، اما این عمل سبب افزایش جذب انرژی به سازه ناشی از زمین‌لرزه گردیده و منجر به خسارت تاسیسات حساس داخلی خواهد شد. شتاب‌های طبقات را می‌توان با نرم کردن سامانه سازه‌ای کاهش داد اما این کار منجر به تغییر مکان‌های بین طبقه‌ای بزرگی می‌شود. از این رو بایستی به دنبال راهی بود که تغییر مکان جانبی بین طبقه‌ای و شتاب‌های همزمان کاهش داد. فعلاً ایده جداساز لرزه‌ای تنها راه عملی کاهش همزمان تغییر مکان بین طبقه‌ای و شتاب‌های طبقات است؛ سامانه جداساز با متمرکز کردن تغییر مکانهای حاصله در تراز جداساز، نرمی مورد نیاز سازه را فراهم می‌کند [۲].

در سال‌های اخیر جهت حفظ سازه در برابر آسیب‌های ناشی از زمین‌لرزه روش جداسازی ساختمان از زمین رو به گسترش بوده و این تکنولوژی در بسیاری از کشورها به‌عنوان تکنولوژی تکامل‌یافته مورد استفاده قرار می‌گیرد. با وجود این‌که همه ساله سامانه‌های جداساز مختلفی به ثبت می‌رسند، ولی به‌طور کلی سامانه‌های جداساز لرزه‌ای به دو دسته‌ی جداسازهای اصطکاکی و لاستیکی تقسیم‌بندی می‌شوند [۳].

سامانه‌های جداساز الاستومری (لاستیکی) یکی از سامانه‌های معمول و ساده هستند که در فن جداسازی سازه‌ها کاربرد دارند. کاربرد الاستومرها جهت جداسازی نیروهای افقی بعد از کاربرد آن برای کنترل ارتعاش قائم صورت می‌گیرد. این جداسازها در ابتدا برای کنترل ارتعاش قائم در پل‌ها مورد استفاده قرار می‌گرفت؛ ولی بعدها برای حفاظت ساختمان‌ها در برابر زلزله نیز مورد استفاده قرار گرفتند. جداسازهای فوق با تغییر تناوب اصلی سازه، از طریق کاهش سختی افقی به‌منظور اجتناب از فرکانسی که از طرف زمین، در پی به‌وقوع پیوستن زمین‌لرزه اجازه انتقال به سازه را نمی‌دهد [۴-۶]. جداسازهای لاستیکی با هسته‌ی سربی که در دسته‌ی جداسازهای الاستومری قرار دارند، دارای یک یا چند هسته سربی در مرکز یا گوشه‌ها هستند که با اعمال نیرو یا تزریق در حفره از پیش تعبیه شده در جداساز لاستیکی قرار می‌گیرند. جهت ایجاد پیوستگی لازم در عملکرد مناسب اجزای جداساز، تغییر شکل برشی در تمام حجم هسته سربی، لازم است هسته سربی به‌خوبی در داخل سوراخ ایجاد شده در داخل جداساز الاستومری اولیه قرار گیرد. به این منظور لازم است قطر هسته سربی را کمی بیشتر از قطر سوراخ تعبیه شده در جداساز در نظر گرفته و با ایجاد اختلاف درجه حرارت در داخل سوراخ قرار داد. ورق‌های فولادی جداساز به دلیل تماس مستقیم با هسته سربی، در زمان ارتعاش، نیروی برشی ایجاد شده را به هسته سربی منتقل می‌کنند، که در این صورت اگر میزان نیروی جانبی وارده کوچک باشد، هسته‌ی سربی مانع از تغییر شکل جداساز می‌شود و جداساز، هم به‌صورت افقی و هم به‌صورت قائم سختی بالایی از خود نشان می‌دهد که این ویژگی از حرکت سازه‌ی جداسازی شده در برابر بارهای جانبی سطح بهره‌برداری، مانند باد یا زلزله‌های خفیف جلوگیری می‌کند و در صورتی که نیروی جانبی افزایش یابد، به تبع آن تغییر شکل جداساز و هسته سربی افزایش می‌یابد [۳].

سامانه‌های جداساز اصطکاکی (لغزشی) از رایج‌ترین و مؤثرترین روش‌ها در جداسازی لرزه‌ای به شمار می‌آیند. این نوع سامانه‌ها، در برابر انواع بارگذاری‌های لرزه‌ای عملکرد خوبی از خود نشان داده و در کاهش شتاب و جابه‌جایی نسبی طبقات بسیار مؤثر هستند [۷]. جداسازهای اصطکاکی دارای قابلیت خوبی در استهلاک انرژی زلزله و افزایش دوره تناوب سازه به طور همزمان می‌باشند. نکته مهم در مورد جداسازهای اصطکاکی این است که در این جداسازها کنترل تغییر مکان جانبی سازه و همچنین کنترل نیروی انتقالی به روسازه ناشی از ضریب اصطکاک مناسب می‌باشد. از آنجایی که رفتار سامانه‌های اصطکاکی مستقل از سرعت، تعداد چرخه یا فرکانس و دامنه بارگذاری بوده و این سامانه نیروی بازدارنده داشته و تا زمانیکه دچار انحراف عمودی دائمی نگردند نیازی به تعویض پس از زلزله احساس نمی‌شود و رفتار هیستریزس پایدار و بدون افتی در چرخه‌های متعدد بارگذاری در آنها مشاهده می‌شود، استفاده از سامانه‌های اصطکاکی به‌عنوان

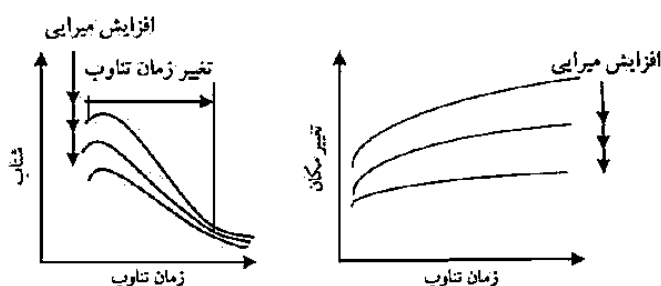
یک سامانه اتلاف انرژی ارزان در حال پیشرفت و گسترش می‌باشد. در سازه‌هایی که به سامانه جداساز لرزه ای مجهز شده اند، روسازه و جداساز به‌عنوان یک سامانه واحد در نظر گرفته می‌شوند. از آنجایی که تغییر سختی روسازه بر کل مجموعه تأثیرگذار است، جداساز نیز به‌عنوان یک عامل تأثیر گذار بر این سختی بسیار مورد اهمیت قرار دارد [۲].

آرانی و همکاران [۸] در مطالعه‌ای به مقایسه کارایی دو نوع سامانه جداساز لاستیکی با هسته سربی و آونگی اصطکاکی، پرداختند. نتایج مطالعه آنها نشان داد که استفاده از سامانه جداساز لرزه‌ای لاستیکی هسته سربی نسبت به جداساز لرزه‌ای آونگی اصطکاکی، پاسخ جابجایی نسبی طبقه اول و برش پایه را بیشتر کاهش می‌دهد. کومور [۹] در مطالعه‌ای به بررسی اثر طبقه نرم در پاسخ سازه با پای ثابت و سازه مجهز به سامانه جداساز لرزه‌ای پرداخت. نتایج مطالعه فوق نشان داد که تأثیر طبقه نرم در سازه مجهز به سامانه جداساز لرزه‌ای نسبت به سازه با پای ثابت ناچیز است. جانگید [۱۰] در مطالعه‌ای، پاسخ پل مجهز به سامانه جداساز لرزه‌ای آونگی اصطکاکی با ضریب اصطکاک بهینه شده تحت زلزله‌های حوزه نزدیک گسل را مورد بررسی قرار داد. نتایج این مطالعه نشان داد که استفاده از سامانه جداساز لرزه‌ای آونگی اصطکاکی با ضریب اصطکاک بهینه در کاهش برش پایه و شتاب عرشه پل مؤثر می‌باشد.

در پژوهش حاضر سه ساختمان فولادی با سامانه باربر جانبی قاب خمشی ویژه با تعداد طبقات ۳، ۷ و ۱۲ طبقه و ۴ دهانه‌ی ۷ متری در هر دو راستا، همراه با جداسازهای اصطکاکی آونگی و جداسازهای الاستومری هسته سربی با استفاده از تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی (NTH)، در دو سطح زلزله سطح طرح (DBE) و بیشینه زلزله محتمل (MCE) مورد ارزیابی لرزه‌ای قرار گرفته‌اند. جهت بررسی اثر جداسازهای مذکور بر عملکرد لرزه‌ای ساختمان‌ها، تغییرمکان نسبی طبقات بررسی شده است تا میزان توانمندی هر کدام از سامانه‌های جداساز لرزه‌ای در بهبود عملکرد لرزه‌ای با افزایش ارتفاع ساختمان‌ها و کاهش سختی سامانه جداساز لرزه‌ای مورد مطالعه قرار گیرد.

۲- مبانی سامانه‌های جداساز لرزه‌ای

دو عامل در پدید آمدن آسیب در اعضای غیرسازه‌ای و سازه‌ای در هنگام وقوع زمین‌لرزه مؤثر هستند. اولین مولفه شتاب مطلق پدید آمده در طبقات و مولفه‌ی دوم تغییرمکان نسبی به وجود آمده در طبقات (دریفت) است؛ بنابراین در کاهش آسیب در اعضای غیرسازه‌ای و سازه‌ای دو بحث مطرح است. در وهله اول ساختمان‌های با سختی کم با وجود شتاب طبقات کمتر به دلیل جذب انرژی کمتر، دارای تغییرمکان جانبی زیادی هستند که این موضوع به اجزای حساس به تغییرمکان نسبی آسیب می‌زند، در مقابل ساختمان‌های با سختی زیاد به دلیل سختی زیاد، شتاب زیادی را به طبقات وارد می‌کنند ولی از این نظر که سازه دارای سختی بیشتری است و باعث کاهش تغییرمکان جانبی بین طبقات می‌شود مطلوب هست. بنابراین بایستی به دنبال راهکاری بود که هم شتاب طبقات و هم تغییرمکان جانبی نسبی طبقات تقلیل پیدا کند. ایده جداسازی لرزه‌ای که هم شتاب و هم تغییرمکان نسبی طبقات همزمان کاهش دهد دارای چنین مفهومی است. به بیان دیگر نیاز لرزه‌ای سازه به جای ظرفیت لرزه‌ای دارای جداساز در حالت سازه بدون جداساز تغییر پیدا کرده و نیاز لرزه‌ای سازه کاهش می‌یابد [۵]. شکل ۱ اثر افزایش میرایی و افزایش دوره تناوب به دلیل بهره‌گیری از سامانه جداساز را نشان می‌دهد.



شکل ۱: تأثیر استفاده از جداساز لرزه‌ای بر طیف پاسخ سازه [۱۱]

به‌طور کلی سامانه جداساز لرزه‌ای به دودسته‌ی جداسازهای اصطکاکی و لاستیکی تقسیم‌بندی می‌شود [۱۱]. جداسازهای لاستیکی خود شامل انواع زیر می‌باشند:

- جداسازهای لاستیکی با هسته‌ی سربی
- جداسازهای لاستیکی با میرایی زیاد
- جداسازهای لاستیکی با ورق‌های فولادی (و میرایی کم)

جداسازهای اصطکاکی نیز خود شامل انواع زیر می‌باشند:

- جداسازهای اصطکاکی آونگی

- جداسازهای اصطکاکی تخت

جداساز لاستیکی هسته سربی که از نوع جداسازهای الاستومری است دارای یک یا چند هسته سربی در مرکز یا گوشه‌ها بوده و با اعمال نیرو یا تزریق در حفره از پیش تعبیه شده در جداساز لاستیکی قرار می‌گیرد. جهت ایجاد پیوستگی لازم در عملکرد مناسب اجزای جداساز، تغییر شکل برشی در تمام حجم هسته سربی، لازم است هسته سربی به خوبی در سوراخ ایجاد شده در داخل جداساز الاستومری اولیه قرار گیرد. به این منظور لازم است قطر هسته سربی را کمی بیشتر از قطر سوراخ در نظر گرفته و با ایجاد اختلاف درجه حرارت در داخل سوراخ قرار گیرد. ورق‌های فولادی به دلیل تماس مستقیم با هسته سربی، در زمان ارتعاش نیروی برشی ایجاد شده را به هسته سربی منتقل می‌کنند که در این صورت اگر میزان نیروی جانبی وارده کوچک باشد، هسته‌ی سربی مانع از تغییر شکل جداساز می‌شود، و جداساز، هم به صورت افقی و هم به صورت قائم سختی بالایی از خود نشان می‌دهد که این ویژگی از حرکت سازه‌ی جداسازی شده در برابر بارهای جانبی سطح بهره‌برداری، مانند باد یا زلزله‌های خفیف جلوگیری می‌کند و در صورتی که نیروی جانبی افزایش یابد، به تبع آن تغییر شکل جداساز و هسته سربی افزایش یافته تا آنجا که هسته سربی تحت تنش در حدود ۸ تا ۱۰ نیوتن بر میلی‌متر مربع به حد تسلیم می‌رسد و سختی جانبی جداساز کاهش می‌یابد که موجب کاهش میزان قابل توجهی از انرژی، در زمان رخداد زلزله‌های نسبتاً بزرگ از طریق رفتار هیستریزس پایدار می‌شود [۱۱-۱۳].

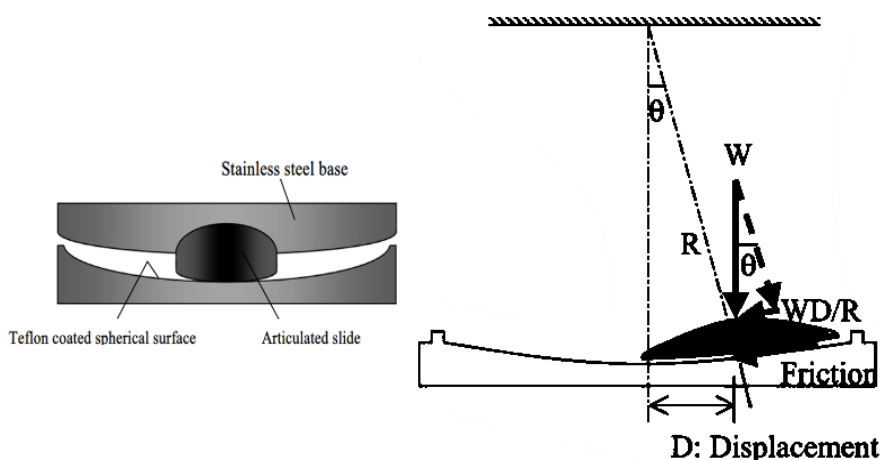


شکل ۲: جداساز لاستیکی با هسته‌ی سربی [۱۱]

سامانه‌های جداساز اصطکاکی (لغزشی) از رایج‌ترین و مؤثرترین روش‌ها در جداسازی لرزه‌ای به شمار می‌آیند. این نوع سامانه‌ها، در برابر انواع بارگذاری‌های لرزه‌ای عملکرد خوبی از خود نشان داده و در کاهش شتاب و جابه‌جایی نسبی طبقات بسیار مؤثر هستند. [۱۴]. جداسازهای اصطکاکی دارای قابلیت خوبی در استهلاک انرژی زلزله و افزایش دوره تناوب سازه به طور همزمان هستند. نکته مهمی که در مورد جداسازهای اصطکاکی وجود دارد، این است که در این جداسازها کنترل تغییر مکان جانبی سازه و همچنین کنترل نیروی انتقالی به روسازه به سبب ضریب اصطکاک مناسب می‌باشد. در این سامانه جداساز، با کم بودن ضریب اصطکاک، در طی ارتعاش، شتاب اعمال شده به سازه کاهش می‌یابد. برای کاهش میزان اصطکاک، از موادی نظیر، تفلون (PTFE)^۱ بر روی فولاد ضدزنگ که دارای ضریب اصطکاک پایینی و در حدود ۳ درصد است استفاده می‌شود. در این سامانه جداساز، ضریب اصطکاک تابعی از بار فشاری و سرعت لغزش است؛ به این صورت که با افزایش فشار، ضریب اصطکاک کاهش یافته و با افزایش سرعت، ضریب اصطکاک به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد، در سرعت زلزله ۰/۲ تا ۱ متر بر ثانیه ضریب اصطکاک در حدود ۸ تا ۱۲ درصد است؛ از این رو، برای طراحی دقیق، مدل المان باید

^۱-PolyTetraFluoroEthylene (PTFE)

تغییر این ضریب نسبت به تغییر مکان و سرعت را دربر گیرد [۱۵]. جداسازهای آونگی اصطکاکی نوعی از جداسازهای اصطکاکی هستند که به نام جداسازهای لغزشی منحنی^۲ نیز شناخته می‌شود، با ایجاد نیروی بازگرداننده توسط جاذبه‌ی زمین، وزن سازه و هندسه سطح لغزنده که به صورت منحنی است، ضعف جداساز اصطکاکی تحت را پوشش قرار می‌دهد. این سامانه جداساز از سه قسمت یا سطوح منحنی تشکیل شده است. این موضوع باعث به وجود آمدن امکان لغزش افقی و چرخشی می‌شود [۱۶]. بخش داخلی این جداساز متشکل از یک سطح مقعر فولادی است و یک قطعه‌ی فولادی، با مقاومت زیاد و اصطکاک کم بر روی آن حرکت می‌کند. این سطح لغزش کروی، به طور معمول با لایه‌ای از مواد با اصطکاک کم، نظیر تفلون با ضریب اصطکاک تقریبی ۳ درصد پوشانده می‌شود. سطح دیگر این لغزنده نیز کروی بوده و با لایه‌ای از فولاد ضدزنگ پوشیده شده است. این سطح در یک شیار کروی که آن هم از ترکیباتی با اصطکاک کم پوشیده شده است قرار می‌گیرد [۱۷].



شکل ۳: جزئیات و عملکرد جداساز آونگ اصطکاکی [۱۸]

۳- ساختمان‌های مورد مطالعه

در این پژوهش، سه ساختمان فولادی ۳، ۷ و ۱۲ طبقه با سامانه باربر جانبی قاب خمشی ویژه و دارای پلان مربع با چهار دهانه در هر دو راستا در نظر گرفته شده است (شکل ۴). طول هر دهانه در همه ساختمان‌ها، ۷ متر و ارتفاع تمامی طبقات نیز ۳/۲ متر می‌باشد. برای استفاده از پارامترهای طراحی آیین‌نامه ASCE ساختمان‌ها دارای $S_1 = 0.56g$ ، $S_s = 1.31g$ ، $T_L = 12s$ و خاک نوع C در نظر گرفته شده است. مقاطع به کار رفته در طراحی ستون‌ها و تیرها از مقاطع بال پهن^۳ (تیر آهن W) بوده و در جدول ۲ تا ۴ آورده شده‌اند. تیرها دارای مهار جانبی می‌باشند. تیرها و ستون‌ها طوری طراحی شده‌اند که نسبت تنش‌ها بین ۰/۹۵ و ۱/۰۵ (دارای مقدار میانگین ۱) باشند. کلیه ضوابط «آیین‌نامه طراحی ساختمان‌های فولادی (AISC)» [۱۲] در طراحی ساختمان‌ها رعایت شده و مشخصات مصالح مصرفی برای تیرها و ستون‌ها از جنس فولاد ST37 می‌باشد (جدول ۵).

^۲ Friction Pendulum System

^۳ Wide Flang

جدول ۱: بارگذاری ثقلی ساختمان‌ها

بارگذاری ثقلی (کیلوگرم بر مترمربع)	بارگذاری ثقلی
۶۰۰	بار مرده طبقات و بام
۲۰۰	بار زنده طبقات
۱۵۰	بار زنده بام

جدول ۲: مقاطع تیرها و ستون‌های بکار رفته در ساختمان ۳ طبقه

طبقه	مقطع ستون	مقطع تیر
۱	W14X211	W18X40
۲	W14X211	W18X40
۳	W14X120	W16X31

جدول ۳: مقاطع تیرها و ستون‌های بکار رفته در ساختمان ۷ طبقه

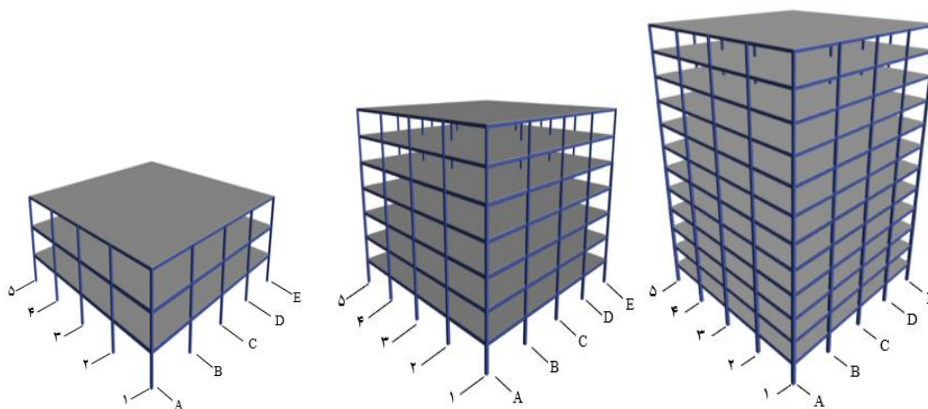
طبقه	مقطع ستون	مقطع تیر
۱	W14X311	W18X50
۲	W14X311	W18X50
۴	W14X283	W18X50
۵	W14X283	W21X44
۶	W14X283	W21X44
۷	W14X283	W21X44

جدول ۴: مقاطع تیرها و ستون‌های بکار رفته در ساختمان ۱۲ طبقه

طبقه	مقطع ستون	مقطع تیر
۱	W14X398	W24X55
۲	W14X370	W24X55
۴	W14X370	W24X55
۵	W14X342	W24X55
۶	W14X342	W24X55
۷	W14X342	W24X55
۸	W14X342	W21X50
۹	W14X342	W21X50
۱۰	W14X257	W21X50
۱۱	W14X257	W21X44
۱۲	W14X257	W18X46

جدول ۵: مشخصات ساختمان های طراحی شده

تعداد طبقات	سامانه باربر جانبی	میرایی ذاتی (درصد)	دوره تناوب (ثانیه)	نسبت جرمی مود اصلی	وزن کل ساختمان تن	ارتفاع کل ساختمان (متر)
۳	قاب خمشی فولادی ویژه	۵	۰/۸۴	۰/۸۱	۲۴۶۵/۴۰	۹/۶
۷	قاب خمشی فولادی ویژه	۵	۱/۷۲	۰/۸	۵۰۶۳/۹۴	۲۲/۴
۱۲	قاب خمشی فولادی ویژه	۵	۲/۴۸	۰/۷۸	۸۳۴۱/۸۴	۳۸/۴



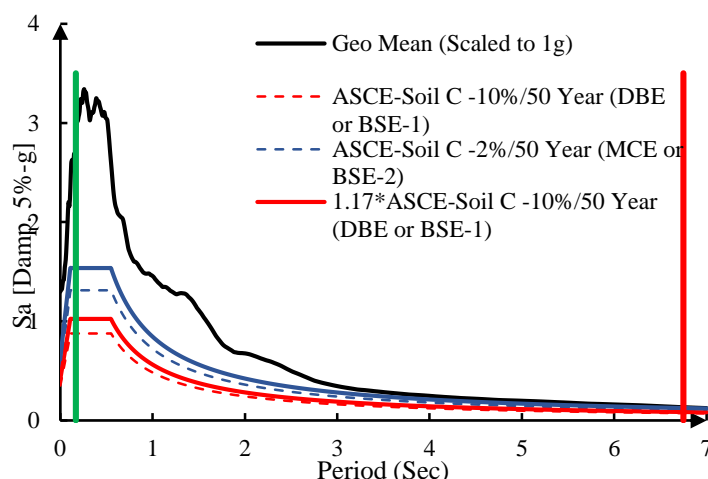
شکل ۴: هندسه ساختمان های ۳، ۷ و ۱۲ طبقه مورد مطالعه

مطابق با آیین نامه ASCE7 [۱۹]، تحریک ورودی زمین باید مشخصات اصلی منبع زلزله در محل ساختمان شامل مکانیزم گسل، فاصله تا گسل، شرایط خاک و مشخصه بزرگی زلزله را بازتاب دهد. بسیاری از خواص زلزله مانند محتوای فرکانسی، دامنه و شکل طیفی و مدت زمان زلزله به این پارامترها وابسته اند. با توجه به عدم قطعیت های ذاتی تحریک زمین، برای تحلیل دینامیکی غیرخطی طبق ضوابط آیین نامه (حداقل سه شتاب نگاشت که پاسخ بیشینه پاسخ به دست آمده از سه تحریک ورودی را به عنوان پارامتر نیاز سازه در نظر گرفته شود) مورد نیاز است که این شتاب نگاشت ها بایستی بیانگر آثار منطقه طرح، خاک و ویژگی های چشمه لرزه ای باشد. در این پژوهش از ۷ جفت شتاب نگاشت پیشنهادی توسط آیین نامه FEMA P695 [۲۰] که جزء رکوردهای پیشنهادی دور از گسل همان آیین نامه است، استفاده شده است. مشخصات رکوردهای مورد استفاده در این پژوهش در جدول ۶ آورده شده است.

جدول ۶: رکوردهای زلزله حوزه دور مورد استفاده در این مطالعه [۲۰]

Record Seq. No	Earthquake			Recorded Motions		Recorded Motions		Source (Fault Type)	
	M	Year	Name	Station Name	NEHRP Class	Vs ₃₀ (m/sec)	PGA _{max} (g)		PGV _{max} (cm/s)
1787	7.1	1999	Hector Mine	Hector	C	685	0.34	42	Strike-slip
1111	6.9	1995	Kobe, Japan	Nishi-Akashi	C	609	0.51	37	Strike-slip
1158	7.5	1999	Kocaeli, Turkey	Duzce	D	276	0.36	59	Strike-slip
900	7.3	1992	Landers	Yermo Fire Station	D	354	0.24	52	Strike-slip
1633	7.4	1990	Manjil, Iran	Abbar	C	724	0.51	54	Strike-slip
829	7.0	1992	Cape Mendocino	Rio Dell Overpass	D	312	0.55	44	Thrust
68	6.6	1971	San Fernando	LA - Hollywood Stor	D	316	0.21	19	Thrust

جهت مقیاس سازی رکوردهای زلزله انتخابی از دستورالعمل آیین نامه ASCE7 استفاده می شود. نتیجه مقیاس سازی در شکل ۵ و ضریب مقیاس رکوردها به سطح زلزله طرح (DBE یا BSE-1) و بیشینه زلزله محتمل (MCE یا BSE-2) در جدول ۷ آورده شده است.



شکل ۵: میانگین هندسی ترکیب SRSS ۱۰ رکورد زلزله هم پایه شده قبل از مقیاس

جدول ۷: رکوردهای زلزله‌ی انتخابی و ضریب مقیاس هر کدام

Record Seq. No	Earthquake				Scale Factor (BSE-1)	Scale Factor (BSE-2)
	M	Year	Name	Station Name		
1787	7.1	1999	1787	Hector	1.88	2.83
1111	6.9	1995	1111	Nishi-Akashi	1.25	1.87
1158	7.5	1999	1158	Duzce	1.77	2.66
900	7.3	1992	900	Yermo Fire Station	2.59	3.89
1633	7.4	1990	1633	Abbar	1.23	1.85
829	7.0	1992	829	Rio Dell Overpass	1.16	1.73
68	6.6	1971	68	LA - Hollywood Stor	3.02	4.53

لازم به ذکر است برای افزایش دقت مدل‌سازی و جلوگیری از مشکلات مربوط به ناپایداری در SAP2000، ساختمان‌ها به طور کامل و سه‌بعدی مدل‌سازی شده و رکوردهای زلزله نیز در دو جهت X و Y به ساختمان‌ها وارد می‌شوند.

۴- طراحی سامانه‌های جداساز لرزه‌ای لاستیکی هسته سربی و جداساز اصطکاکی آونگی تک قوسی

۴-۱- طراحی جداساز اصطکاکی آونگی تک قوسی

برای طراحی سامانه‌های جداساز لرزه‌ای اصطکاکی آونگی تک قوسی بایستی مطابق با راهنمای طراحی و اجرای سیستم‌های جداساز لرزه‌ای در ساختمان‌ها (ضابطه شماره ۵۲۳)، ابتدا بایستی یک سری فرضیات را در نظر گرفت. مشخصات زیر برای سامانه جداساز اصطکاکی آونگی تک قوسی فرض می‌شود [۲۱]:

- دوره تناوب طرح جداساز (T_D) برابر با $2/5$ ، $3/5$ و $4/5$ ثانیه
- تغییر مکان افقی طرح (D_D) ۲۰ سانتی‌متر
- ضریب اصطکاک برای سطح کروی جداساز (μ) ۶ درصد

با لحاظ فرضیات فوق‌الذکر، طبق دستورالعمل نشریه ۵۲۳ در گام اول با توجه به مقدار دوره تناوب طرح انتخابی به محاسبه شعاع انحنا سطح کروی پرداخته می‌شود:

$$T_D = 2\pi \sqrt{\frac{R_{eff}}{g}} \Rightarrow R_{eff} = g \left(\frac{T_D}{2\pi}\right)^2 \quad (1)$$

در رابطه (۱):

T_D : دوره تناوب طرح جداساز؛

g : شتاب ثقل زمین؛

T_D : دوره تناوب طرح جداساز؛

R_{eff} : شعاع انحنا سامانه جداساز لرزه‌ای آونگی تک قوسی.

باتوجه به مقدار شعاع انحنا (R_{eff})، نسبت میرایی تولیدی توسط عمل اصطکاک محاسبه می‌شود:

$$\xi_{eff} = \frac{2\mu}{\pi \left(\mu + \frac{D_D}{R_{eff}}\right)} \quad (2)$$

در رابطه (۲):

ξ_{eff} : نسبت میرایی معادل مؤثر؛

μ : ضریب اصطکاک سطح سامانه جداساز لرزه‌ای آونگی تک قوسی؛

D_D : تغییر مکان افقی طرح؛

R_{eff} : شعاع انحنا سامانه جداساز لرزه‌ای آونگی تک قوسی.

با نسبت میرایی معادل مؤثر به دست آمده از رابطه (۲) مقدار ضریب میرایی (B_D) با استفاده از درون‌یابی در جدول ۸ محاسبه می‌شود. با مقدار به دست آمده برای ضریب میرایی (B_D) مقدار جابه‌جایی طرح با استفاده از رابطه زیر دوباره محاسبه می‌شود که بایستی از مقدار فرض شده کمتر باشد:

$$D_D = \frac{g}{4\pi^2} \times \frac{S_{D1} \times T_D}{B_D} \quad (3)$$

در رابطه (۳):

S_{D1} : شتاب طیفی در ثانیه ۱؛

B_D : ضریب میرایی؛

D_D : تغییر مکان افقی طرح؛

T_D : دوره تناوب طرح جداساز.

جدول ۸: مقادیر ضریب میرایی متناظر با نسبت میرایی مؤثر جداساز [۲۱]

ضریب میرایی (B_D) نسبت میرایی معادل مؤثر (ξ_{eff})

< ٪۲	۰/۸
٪۵	۱/۰
٪۱۰	۱/۲
٪۲۰	۱/۵
٪۳۰	۱/۷
٪۴۰	۱/۹
≥ ٪۵۰	۲/۰

به تبع از نسبت میرایی به دست آمده و بررسی این که آیا جابه جایی طرح محاسبه شده مقدار درستی بوده است، مقدار ضریب میرایی مؤثر با استفاده از رابطه (۴) به دست می آید:

$$C_{eff} = \frac{2\xi_{eff}\omega M}{N} \quad (۴)$$

در رابطه (۴) :

M: جرم مؤثر لرزه‌ای کل؛

ω : فرکانس طبیعی هدف و

N: تعداد ستون‌هایی است که در زیر آن جداساز اصطکاکی آونگی تک قوسی بکار می‌رود.

در مرحله بعد به محاسبه سختی مؤثر حداقل و حداکثر پرداخته می‌شود. سختی جداسازهای اصطکاکی به نیروی ثقلی لرزه‌ای اعمالی به آن (P_{DL+LL}) وابسته می‌باشد. مقدار سختی مؤثر با استفاده از رابطه (۵) بدست می‌آید:

$$K_{eff} = \frac{P_{DL+LL}}{R_{eff}} + \frac{\mu P_{DL+LL}}{D_D} \quad (۵)$$

در رابطه (۵):

P_{DL+LL} : نیروی ثقلی لرزه‌ای اعمالی به سامانه جداساز لرزه‌ای؛

K_{eff} : سختی مؤثر.

در گام بعد، سختی قائم جداسازها با توجه به مشخصات آلیاژ بکار رفته در ساخت آنها و همچنین هندسه نهایی جداگر از شرکت سازنده قابل حصول است. نکته مهم اینکه این سختی دارای مقدار بسیار بالایی می‌باشد؛ بنابراین می‌توان عدد بزرگی را به آن اختصاص داد. در این مطالعه مقدار سختی قائم ۲ میلیارد کیلوگرم بر متر ($k_v = 2 \times 10^9 \frac{kg}{m}$) در نظر گرفته می‌شود. در گام آخر، در زلزله طرح مقدار جابه‌جایی قائم جداساز طبق رابطه ۶ محاسبه می‌شود:

$$\delta_v = \frac{D_D^2}{2k_{eff}} \quad (۶)$$

در رابطه (۶):

δ_v : جابه‌جایی قائم سامانه جداساز لرزه‌ای؛

K_{eff} : سختی مؤثر؛

D_D : تغییر مکان افقی طرح.

لازم به ذکر است که در حالت غیرخطی بر اساس منابع معتبر مقدار سختی مؤثر غیرخطی ۲۰ برابر سختی مؤثر جانبی خطی است و در پژوهش حاضر این موضوع رعایت شده است. با استفاده از روابط (۱) تا (۶) مشخصات جداساز به کار رفته محاسبه و به صورت خلاصه مشخصات مدل دوخطی جداساز در جدول ۹ تا جدول ۱۱ آورده شده است.

جدول ۹: مشخصات جداسازهای اصطکاکی آونگی تک قوسی بکار رفته در ساختمان ۳ طبقه

قطر جداساز (cm)	سختی افقی مؤثر غیرخطی (kg/m)	ضریب میرایی مؤثر ($\frac{kg \cdot Sec}{m}$)	شعاع انحنا سطح کروی (m)	ضریب اصطکاک در سرعت زیاد	ضریب اصطکاک در سرعت کم	سختی قائم خطی (kg/m)	سختی افقی مؤثر خطی (kg/m)	نیروی قائم (kg)	دوره تناوب طرح جداساز (T_D)
۴۰	۳۰۲۴۹۷۴/۰۷	۱۰۲۲۴/۱۹	۱/۵۵	۰/۰۶	۰/۰۴	۲×۱۰^۹	۱۵۱۲۴۸/۷	۱۶۰۲۴۰	۲/۵
۵۲	۱۷۹۲۳۹۲/۷۳۶	۹۴۸۰/۸۲	۳/۰۴	۰/۰۶	۰/۰۴	۲×۱۰^۹	۸۹۶۱۹/۶۴	۱۶۰۲۴۰	۳/۵
۶۲	۱۲۵۷۱۷۷/۱۰۳	۸۸۱۷/۵۹	۵/۰۳	۰/۰۶	۰/۰۴	۲×۱۰^۹	۶۲۸۵۸/۸۶	۱۶۰۲۴۰	۴/۵

جدول ۱۰: مشخصات جداسازهای اصطکاکی آونگی تک قوسی بکار رفته در ساختمان ۷ طبقه

قطر جداساز (cm)	سختی افقی مؤثر غیرخطی (kg/m)	ضریب میرایی مؤثر ($\frac{kg \cdot Sec}{m}$)	شعاع انحنا سطح کروی (m)	ضریب اصطکاک در سرعت زیاد	ضریب اصطکاک در سرعت کم	سختی قائم خطی (kg/m)	سختی افقی مؤثر خطی (kg/m)	نیروی قائم (kg)	دوره تناوب طرح جداساز (T_D)
۴۰	۷۲۹۹۲۷۰/۰۴۶	۲۱۰۰۰/۵۲	۱/۵۵	۰/۰۶	۰/۰۴	۲×۱۰^۹	۳۶۴۹۶۳/۹۵	۳۸۶۶۶۰	۲/۵
۵۲	۴۳۲۵۰۵۲/۵۱۶	۱۹۴۷۳/۶۴	۳/۰۴	۰/۰۶	۰/۰۴	۲×۱۰^۹	۲۱۶۲۵۲/۶۸	۳۸۶۶۶۰	۳/۵
۶۲	۳۰۳۳۵۷۵/۲۵۳	۱۸۱۱۱/۳۶	۵/۰۳	۰/۰۶	۰/۰۴	۲×۱۰^۹	۱۵۱۶۷۸/۷۶	۳۸۶۶۶۰	۴/۵

جدول ۱۱: مشخصات جداسازهای اصطکاکی آونگی تک قوسی بکار رفته در ساختمان ۱۲ طبقه

قطر جداساز (cm)	سختی افقی مؤثر غیرخطی (kg/m)	ضریب میرایی مؤثر ($\frac{kg \cdot Sec}{m}$)	شعاع انحنا سطح کروی (m)	ضریب اصطکاک در سرعت زیاد	ضریب اصطکاک در سرعت کم	سختی قائم خطی (kg/m)	سختی افقی مؤثر خطی (kg/m)	نیروی قائم (kg)	دوره تناوب طرح جداساز (T_D)
۴۰	۱۲۹۱۵۴۱۶	۳۴۵۹۴/۲۱	۱/۵۵	۰/۰۶	۰/۰۴	۲×۱۰^۹	۶۴۵۷۷۰/۸۰	۶۸۴۱۶۰	۲/۵
۵۲	۷۶۵۲۷۹۲/۱۵۳	۳۲۰۷۸/۹۷	۳/۰۴	۰/۰۶	۰/۰۴	۲×۱۰^۹	۳۸۲۶۳۹/۶۱	۶۸۴۱۶۰	۳/۵
۶۲	۵۳۶۷۶۳۷/۸۳۵	۲۹۸۳۴/۸۹	۵/۰۳	۰/۰۶	۰/۰۴	۲×۱۰^۹	۲۶۸۳۸۱/۸۹	۶۸۴۱۶۰	۴/۵

۲-۴- طراحی جداساز لاستیکی هسته سربی

برای طراحی جداسازهای لاستیکی هسته سربی نیز بایستی طبق راهنمای طراحی و اجرای سیستم‌های جداساز لرزه‌ای در ساختمان‌ها (ضابطه شماره ۵۲۳) یک سری از مقادیر یا فرض شوند یا به صورت مجزا محاسبه شده و وارد روند طراحی گردند. اکثر این

مقادیر برای جداسازهای مورد استفاده در ساختمان‌های مورد مطالعه یکسان می‌باشند. مشخصات زیر برای سامانه جداساز لاستیکی هسته سربی فرض می‌شوند [۲۱]:

- دوره تناوب طبیعی جداسازها برابر با (T_D) ۲/۵، ۳/۵ و ۴/۵ ثانیه
- نسبت میرایی معادل مؤثر برابر (ξ_{eff}) ۱۵ درصد
- تنش تسلیم سرب (f_{py}) برابر با ۸۸۲۰ کیلونیوتن بر متر مربع
- حداکثر تغییر شکل نسبی کششی لاستیک در زمان گسیختگی (ϵ_b) ۵۰۰ درصد
- حداکثر تغییر شکل برشی (γ_{max}) برابر با ۱۵۰ درصد
- مقدار ضریب شکل (S) برابر با ۱۵
- لاستیک مورد استفاده از نوع IRHD-65 دارای مشخصات زیر است:

جدول ۱۲: خصوصیات لاستیک مورد استفاده در سامانه جداساز لاستیکی هسته سربی

ضریب اصلاح k	مدول برشی E (N/cm^2)	مدول الاستیسیته E (N/cm^2)
۰/۵۴	۱۳۷	۵۸۵

طبق دستورالعمل نشریه ۵۲۳ جهت طراحی سامانه جداساز لاستیکی هسته سربی بایستی در گام نخست مقدار سختی مؤثر با استفاده از رابطه زیر محاسبه شود:

$$K_{eff} = \frac{4\pi^2}{g} \times \frac{W}{T_D^2} \quad (7)$$

در رابطه (۷):

W : وزن مؤثر لرزه‌ای؛

T_D : دوره تناوب طرح جداساز؛

K_{eff} : سختی مؤثر؛

g : شتاب ثقل زمین.

در گام بعدی مقدار جابه‌جایی هدف با استفاده از رابطه (۸) محاسبه می‌شود:

$$D_D = \frac{g}{4\pi^2} \times \frac{S_{D1} \times T_D}{B_D} \quad (8)$$

در رابطه (۸):

S_{D1} : شتاب طیفی در ثانیه ۱؛

B_D : ضریب میرایی؛

D_D : تغییر مکان افقی طرح؛

T_D : دوره تناوب طرح جداساز.

در گام بعد، مقاومت مشخصه طبق رابطه ۹ محاسبه می شود:

$$Q_d = \frac{\pi K_{eff} D_D \xi_{eff}}{2} \quad (9)$$

در رابطه (۹):

K_{eff} : سختی مؤثر؛

Q_d : مقاومت مشخصه؛

D_D : تغییرمکان افقی طرح؛

ξ_{eff} : نسبت میرایی معادل مؤثر.

با محاسبه مقدار مقاومت مشخصه، مقدار سختی ثانویه با استفاده از رابطه‌ی زیر بدست می آید:

$$K_d = K_{eff} - \frac{Q_d}{D_D} \quad (10)$$

در رابطه (۱۰) منظور از K_d سختی ثانویه سامانه‌ی جداساز لاستیکی هسته سربی است. مقدار سختی الاستیک در این مطالعه ۱۰ برابر سختی ثانویه لحاظ می شود که در این صورت با مشخص شدن سختی ثانویه و سختی الاستیک، جابجایی تسلیم بدست می آید:

$$D_y = \frac{Q_d}{K_e - K_d} \quad (11)$$

در رابطه (۱۱):

K_e : سختی الاستیک؛

Q_d : مقاومت مشخصه؛

K_d : سختی ثانویه؛

D_y : جابجایی تسلیم.

در گام آخر مقدار نیروی تسلیم با استفاده از رابطه‌ی ۱۲ محاسبه می شود:

$$F_y = Q_d + K_d D_y \quad (12)$$

در رابطه (۱۲) منظور از F_y نیروی تسلیم جداساز لاستیکی هسته سربی است. با استفاده از روابط (۷) تا (۱۲) مشخصات جداساز به کار رفته در این مطالعه محاسبه شده و به صورت خلاصه مشخصات مدل دوخطی جداساز در جدول ۱۳ تا ۱۵ آورده شده است.

جدول ۱۳: مشخصات جداساز لاستیکی هسته سربی بکار رفته در ساختمان ۳ طبقه

دوره تناوب طرح جداساز (T_D)	مقاومت مشخصه Q_d (Tonf)	سختی اولیه K_e ($\frac{\text{Tonf}}{\text{m}}$)	سختی ثانویه K_d ($\frac{\text{Tonf}}{\text{m}}$)	سختی مؤثر K_{eff} ($\frac{\text{Tonf}}{\text{m}}$)	جابه‌جایی تسلیم D_y (cm)	تغییرمکان طرح سامانه جداساز لرزه‌ای D_D (m)
۲/۵	۵/۹۹	۳۸۸/۵۱	۳۸/۸۵	۶۴/۹۰	۱/۷۱	۰/۲۳

۳/۵	۴/۳۲	۱۹۱/۶۷	۱۹/۱۷	۳۳/۱۱	۲/۵۱	۰/۳۱
۴/۵	۳/۵۹	۱۱۰/۵۳	۱۱/۰۵	۲۰/۰۳	۳/۶۱	۰/۴۰

جدول ۱۴: مشخصات جداساز لاستیکی هسته سربی بکار رفته در ساختمان ۷ طبقه

دوره تناوب طرح جداساز (T_D)	مقاومت مشخصه $Q_d(\text{Tonf})$	سختی اولیه $K_e \left(\frac{\text{Tonf}}{\text{m}} \right)$	سختی ثانویه $K_d \left(\frac{\text{Tonf}}{\text{m}} \right)$	سختی مؤثر $K_{\text{eff}} \left(\frac{\text{Tonf}}{\text{m}} \right)$	جابه‌جایی تسلیم $D_y(\text{cm})$	تغییر مکان طرح سامانه جداساز لرزه‌ای $D_D(m)$
۲/۵	۸/۶۵	۱۱۵۸/۲۰	۱۱۵/۸۲	۱۵۳/۴۱	۰/۸۳	۰/۲۳
۳/۵	۶/۰۳	۵۸۸/۰۵	۵۸/۸۰	۷۸/۲۷	۱/۱۴	۰/۳۱
۴/۵	۴/۶۶	۳۵۷/۰۵	۳۵/۷۱	۴۷/۳۵	۱/۴۵	۰/۴۰

جدول ۱۵: مشخصات جداساز لاستیکی هسته سربی بکار رفته در ساختمان ۱۲ طبقه

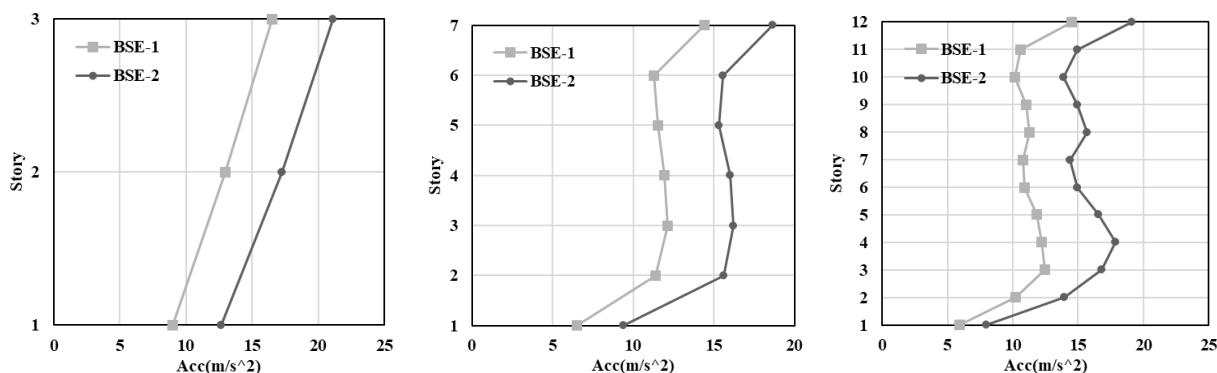
دوره تناوب طرح جداساز (T_D)	مقاومت مشخصه $Q_d(\text{Tonf})$	سختی اولیه $K_e \left(\frac{\text{Tonf}}{\text{m}} \right)$	سختی ثانویه $K_d \left(\frac{\text{Tonf}}{\text{m}} \right)$	سختی مؤثر $K_{\text{eff}} \left(\frac{\text{Tonf}}{\text{m}} \right)$	جابه‌جایی تسلیم $D_y(\text{cm})$	تغییر مکان طرح سامانه جداساز لرزه‌ای $D_D(m)$
۲/۵	۱۵/۰۱	۲۰۰۲/۲۰	۲۰۰/۲۲	۲۶۵/۵۰	۰/۸۳	۰/۲۳
۳/۵	۷/۷۹	۱۱۳۱/۹۴	۱۱۳/۱۹	۱۳۵/۴۶	۰/۷۶	۰/۳۱
۴/۵	۸/۲۱	۶۱۴/۰۹	۶۱/۴۱	۸۱/۹۴	۱/۴۹	۰/۴۰

۵- بحث و بررسی تحلیل مدل‌ها

به منظور ارزیابی رفتار ساختمان‌ها، تغییر مکان نسبی طبقات آنها و میزان شتاب طبقات در دو حالت ساختمان دارای جداساز و ساختمان بدون جداساز مقایسه می‌گردند. در این قسمت در ساختمان‌های مورد مطالعه دوره تناوب طراحی جداساز (سختی سامانه جداساز) به عنوان متغیر در نظر گرفته می‌شود. به این صورت که سامانه‌های جداساز با دوره تناوب طرح متفاوت (T_D) ۲/۵، ۳/۵ و ۴/۵ ثانیه برای ساختمان‌های مورد مطالعه به کار گرفته می‌شوند.

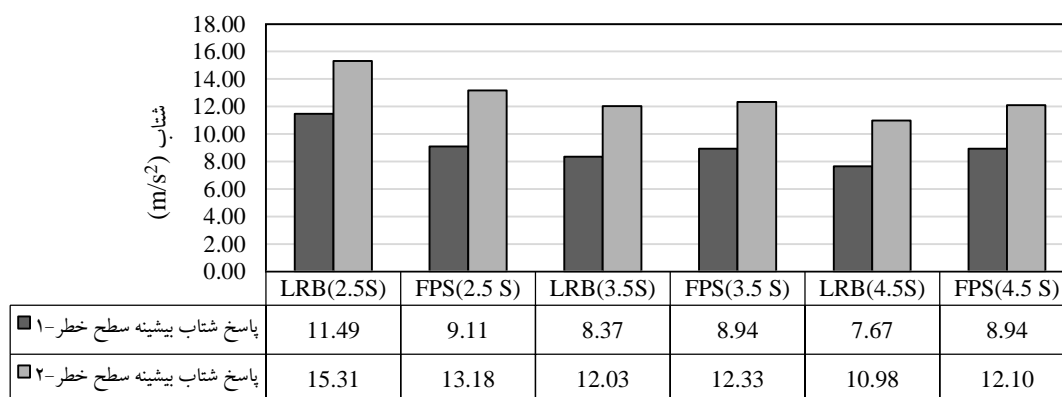
۵-۱- تأثیر استفاده از سامانه جداساز لرزه‌ای لاستیکی هسته سربی و اصطکاکی آونگی تک قوسی بر پاسخ شتاب

در این قسمت در مورد میزان تأثیر افزایش دوره تناوب طرح جداساز بر روی بیشینه شتاب طبقات بحث و بررسی صورت می‌گیرد. همان گونه که در نمودارهای شکل ۶ ملاحظه می‌گردد، طبقات ساختمان‌ها در حالت پایه ثابت شتاب‌های بسیار زیادی را تجربه می‌کنند، همین مسئله موجب تشکیل مفاصل پلاستیک در این سازه‌ها می‌شود.

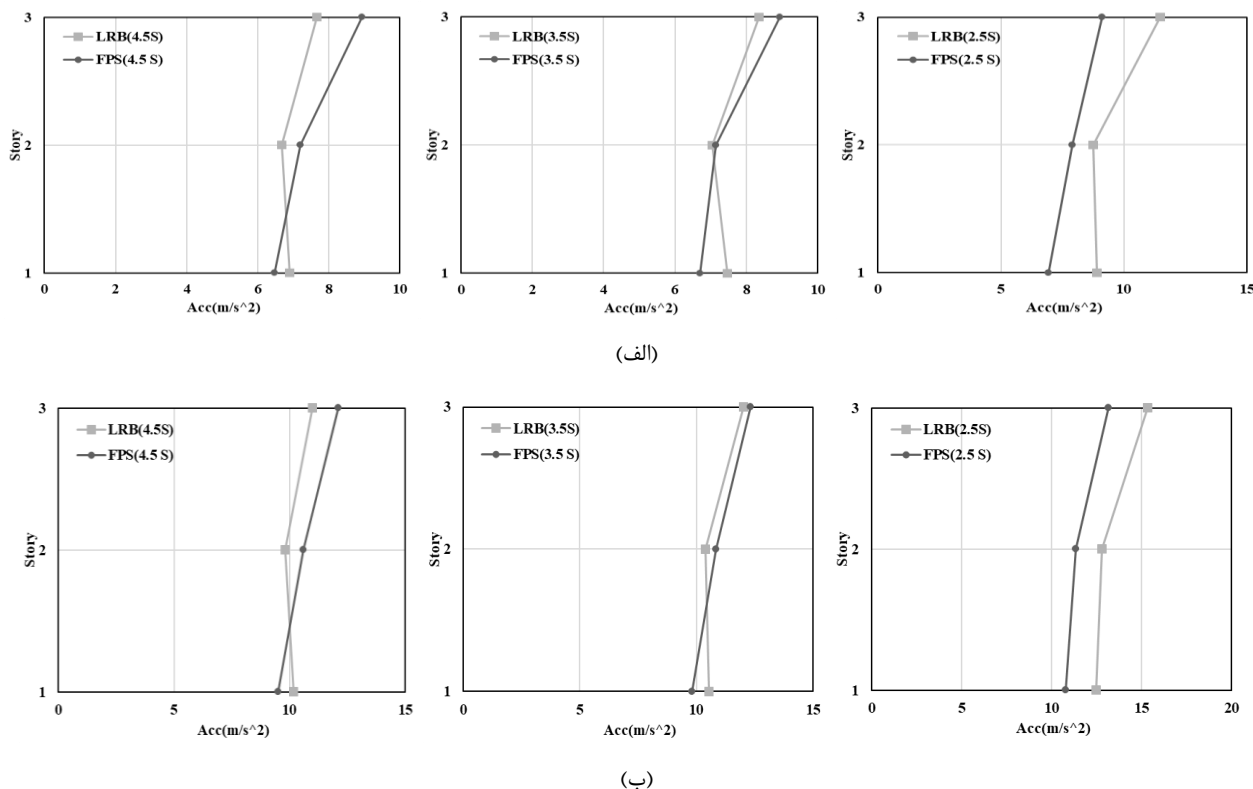


شکل ۶: نمودارهای ماکزیمم شتاب طبقات ساختمان‌های مختلف با پایه ی ثابت

باتوجه به جداول و نمودارهای ارائه شده مشاهده می‌گردد که به علت جداسدن سازه از زمین و به تبع آن دورماندن روسازه از انرژی مخرب زلزله شتاب مطلق بیشینه کاهش قابل‌ملاحظه‌ای دارد؛ به طوری که در ساختمان ۳ طبقه در صورت استفاده از سامانه جداساز لرزه‌ای اصطکاکی آونگی تک قوسی و لاستیکی هسته سربی به ترتیب بین $0.37/52\%$ تا $0.45/80\%$ و $0.27/39\%$ تا $0.53/51\%$ شتاب کاهش پیدا می‌کند. همچنین با مقایسه حداکثر مقدار درصد کاهش پاسخ در دوره تناوب طرح $4/5$ ثانیه مشخص می‌شود که عملکرد جداساز لاستیکی هسته سربی در کاهش پاسخ شتاب ساختمان ۳ طبقه در سطح خطر ۱ به میزان ۸ درصد و در سطح خطر ۲- به میزان ۵ درصد عملکرد بهتری نسبت به جداساز از نوع اصطکاکی آونگی تک قوسی دارد. نکته مهم قابل توجه این است که طبق شکل ۷ و شکل ۸ در دوره تناوب طرح پایین تر از $2/5$ ثانیه عملکرد جداساز اصطکاکی آونگی تک قوسی نسبت به جداساز لاستیکی هسته سربی در سطح خطر ۱ و سطح خطر ۲ به ترتیب به میزان $14/5$ و 10 درصد عملکرد بهتری نسبت به کاهش پاسخ شتاب ساختمان ۳ طبقه دارد.



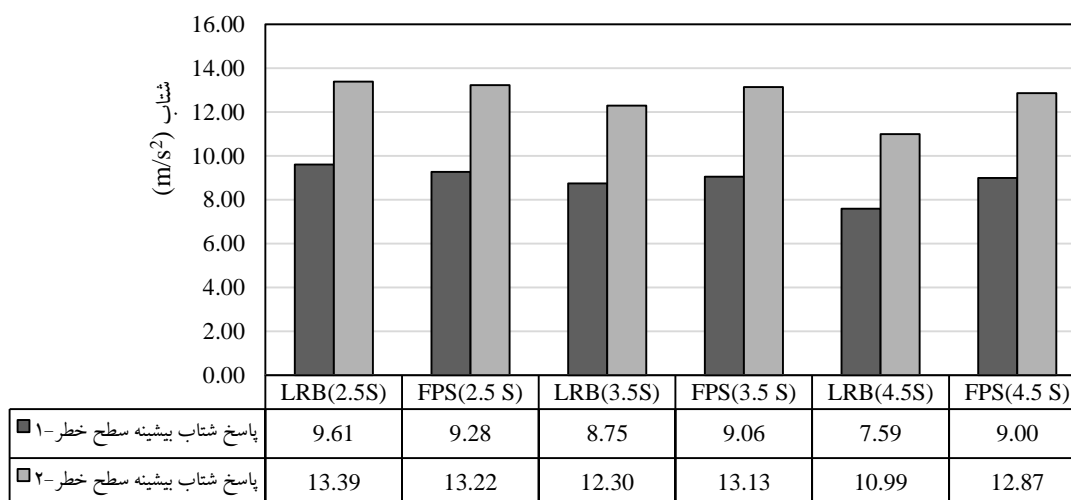
شکل ۷: مقدار شتاب بیشینه ساختمان ۳ طبقه مجهز به سامانه جداساز لرزه‌ای اصطکاکی (FPS) و لاستیکی هسته سربی (LRB)



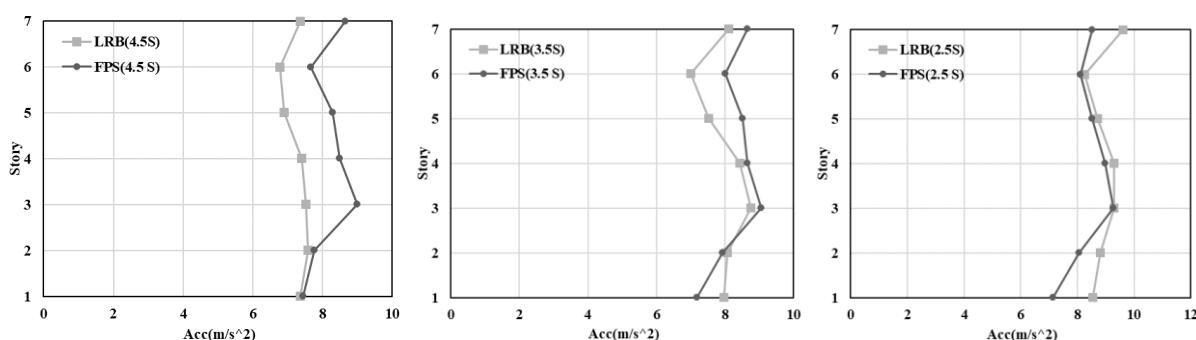
شکل ۸: مقایسه پاسخ شتاب ساختمان ۳ طبقه مجهز به سامانه جداساز (الف) سطح خطر-۱ (ب) سطح خطر-۲

نکته قابل توجه تأثیر افزایش دوره تناوب طرح سامانه‌های جداساز لرزه‌ای می‌باشد؛ به این صورت که در مورد سامانه جداساز لرزه‌ای FPS در صورت افزایش دوره تناوب طرح از ۲/۵ ثانیه به ۴/۵ ثانیه مقدار درصد کاهش پاسخ شتاب در سطح خطر ۱ و ۲ به ترتیب ۱ و ۵ درصد افزایش می‌یابد؛ در مورد سامانه جداساز لرزه‌ای LRB مقدار درصد کاهش پاسخ در صورت افزایش دوره تناوب طرح از ۲/۵ ثانیه به ۴/۵ ثانیه در سطح خطر ۱ و سطح خطر ۲ به ترتیب ۲۳ و ۲۱ درصد افزایش می‌یابد و نشان می‌دهد تأثیر افزایش دوره تناوب طرح در عملکرد کاهش پاسخ شتاب ساختمان ۳ طبقه، جداساز LRB نسبت به جداساز FPS بهتر می‌باشد.

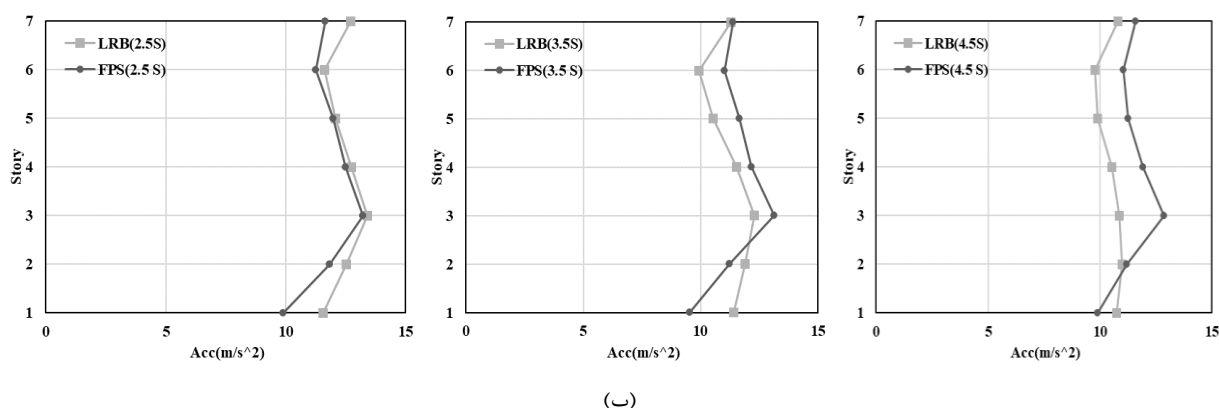
در ساختمان ۷ طبقه در صورت استفاده از سامانه‌های جداساز لرزه‌ای FPS و LRB شتاب به ترتیب بین ۲۹/۰۶٪ تا ۳۷/۶۳٪ و ۲۸/۱۷٪ تا ۴۱/۰۳٪ کاهش پیدا می‌کند. با مقایسه حداکثر مقدار درصد کاهش پاسخ در دوره تناوب طرح ۴/۵ ثانیه مشخص می‌شود که عملکرد جداساز LRB در کاهش پاسخ شتاب ساختمان ۷ طبقه در سطح خطر ۱- و سطح خطر ۲- به میزان ۱۰ درصد عملکرد بهتری نسبت به جداساز FPS دارد. با توجه به شکل ۹ و شکل ۱۰ در دوره تناوب طرح پایین تر از ۲/۵ ثانیه همانند سازه ۳ طبقه عملکرد جداساز FPS نسبت به جداساز LRB در سطح خطر ۱ و سطح خطر ۲ به ترتیب به میزان ۲/۳ و ۱ درصد عملکرد بهتری در کاهش پاسخ شتاب ساختمان ۷ طبقه دارد.



شکل ۹: مقدار شتاب بیشینه ساختمان ۷ طبقه مجهز به سامانه جداساز لرزه‌ای اصطکاکی (FPS) و لاستیکی هسته سربی (LRB)



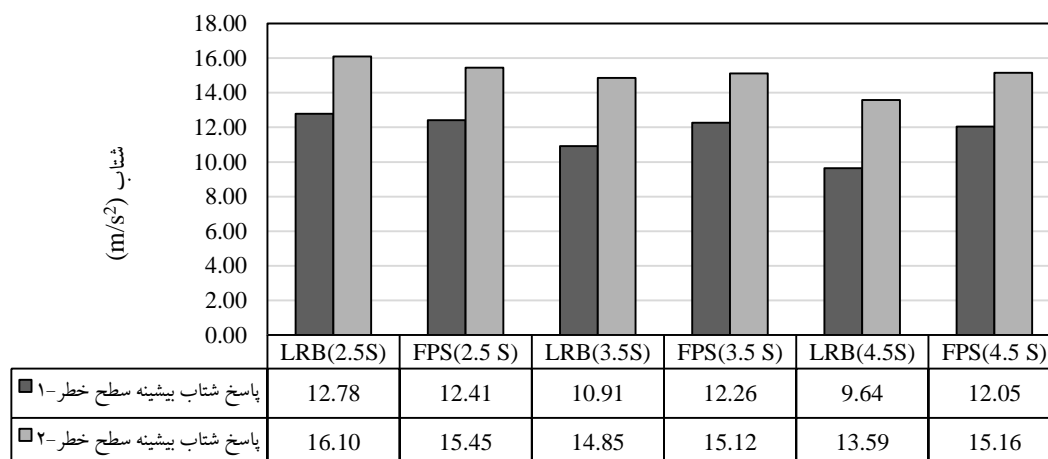
(الف)



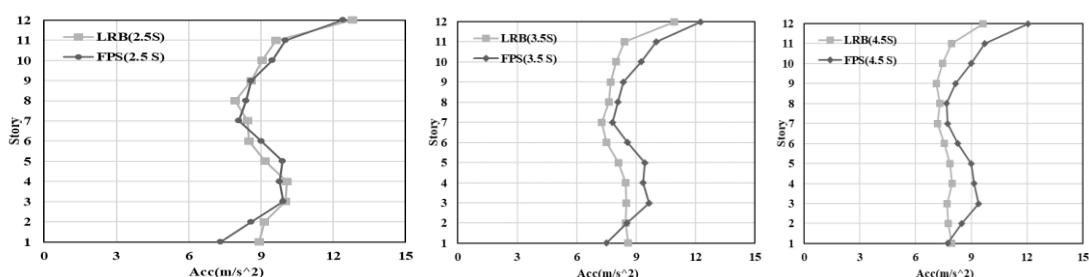
شکل ۱۰: مقایسه پاسخ شتاب ساختمان ۷ طبقه مجهز به سامانه جداساز (الف) سطح خطر-۱ (ب) سطح خطر-۲

تأثیر دوره تناوب طرح سامانه‌های جداساز لرزه‌ای به این صورت است که در مورد سامانه جداساز لرزه‌ای FPS در صورت افزایش دوره تناوب طرح از ۲/۵ ثانیه به ۴/۵ ثانیه شتاب در سطح خطر-۱ و سطح خطر-۲، ۲ درصد کاهش می‌یابد؛ ولی در مورد سامانه جداساز لرزه‌ای LRB در صورت افزایش دوره تناوب طرح از ۲/۵ ثانیه به ۴/۵ ثانیه در سطح خطر-۱ و سطح خطر-۲ به ترتیب ۱۴ و ۱۳ درصد می‌باشد که نشان‌دهنده تأثیر افزایش دوره تناوب طرح در جداساز LRB نسبت به جداساز نوع FPS همانند ساختمان ۳ طبقه عملکرد بهتر در کاهش پاسخ شتاب ساختمان ۷ طبقه دارد همچنین با مقایسه کاهش کارایی سامانه جداساز زمانی که ارتفاع ساختمان از ۳ به ۷ طبقه افزایش پیدا می‌کند در مورد جداساز FPS درصد کاهش کارایی در سطح خطر-۱ برابر با ۹ درصد و در سطح خطر-۲ برابر با ۱۲ درصد می‌باشد که این موضوع برای سامانه جداساز LRB در سطح خطر-۱ و سطح خطر-۲ به ترتیب برابر با ۶ و ۷ درصد می‌باشد و نشان‌دهنده آن است که حساسیت جداساز FPS در خصوص کاهش کارایی در بهبود عملکرد پاسخ شتاب سازه با افزایش ارتفاع ساختمان نسبت به جداساز نوع LRB بیشتر است.

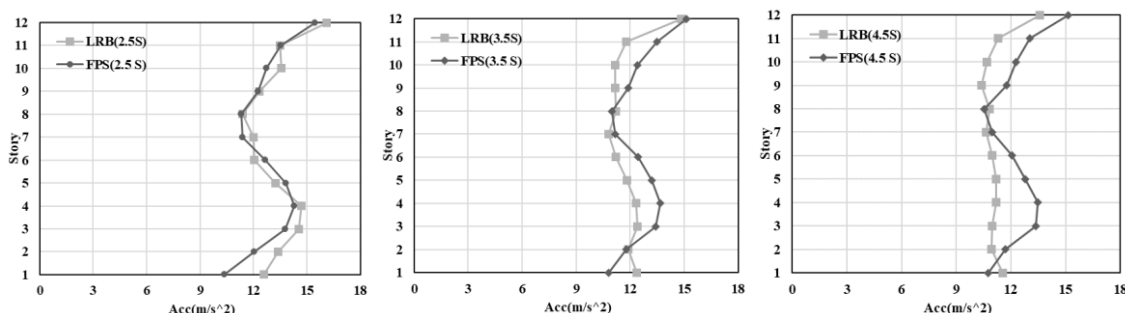
در ساختمان ۱۲ طبقه در صورت استفاده از سامانه جداساز لرزه‌ای FPS و LRB شتاب به ترتیب بین ۱۴/۴۷٪ تا ۲۰/۶۴٪ و ۱۱/۹۴٪ تا ۳۳/۵۷٪ کاهش می‌یابد. با مقایسه حداکثر مقدار درصد کاهش پاسخ در دوره تناوب طرح ۴/۵ ثانیه مشخص می‌شود که عملکرد جداساز نوع LRB در کاهش پاسخ شتاب ساختمان ۱۲ طبقه نیز مشابه با ساختمان‌های ۳ و ۷ طبقه در سطح خطر-۱ و سطح خطر-۲ به ترتیب به میزان ۱۷ و ۸ درصد عملکرد بهتری نسبت به جداساز نوع FPS دارد. نکته مهم قابل توجه که از روی شکل ۱۱ و شکل ۱۲ می‌توان به دست آورد این است که در دوره تناوب طرح پایین ۲/۵ ثانیه همانند ساختمان‌های ۳ و ۷ طبقه عملکرد جداساز FPS نسبت به جداساز LRB در سطح خطر-۱ و سطح خطر-۲ به ترتیب به میزان ۲/۵ و ۳/۴ درصد بهتر می‌باشد.



شکل ۱۱: مقدار شتاب بیشینه ساختمان ۱۲ طبقه مجهز به سامانه جداساز لرزه‌ای اصطکاکی (FPS) و لاستیکی هسته سربی (LRB)



(الف)



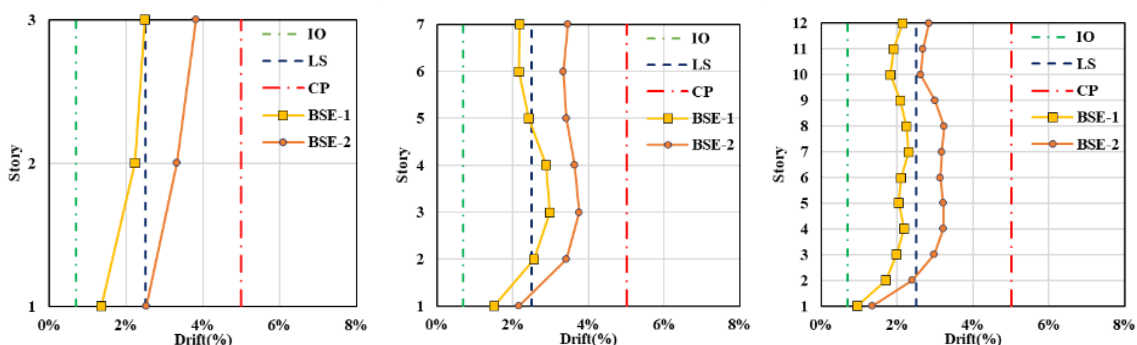
(ب)

شکل ۱۲: مقایسه پاسخ شتاب ساختمان ۱۲ طبقه مجهز به سامانه جداساز (الف) سطح خطر-۱ (ب) سطح خطر-۲

با افزایش دوره تناوب طرح از $\frac{2}{5}$ ثانیه به $\frac{4}{5}$ ثانیه سامانه جداساز لرزه‌ای FPS مقدار درصد کاهش شتاب در سطح خطر-۱ و سطح خطر-۲، به ترتیب به میزان $\frac{2}{5}$ و $\frac{1}{5}$ درصد افزایش می‌یابد؛ ولی در مورد سامانه جداساز لرزه‌ای LRB مقدار درصد کاهش پاسخ در صورت افزایش دوره تناوب طرح از $\frac{2}{5}$ ثانیه به $\frac{4}{5}$ ثانیه در سطح خطر-۱ و سطح خطر-۲ به ترتیب ۲۲ و ۱۳ درصد افزایش می‌یابد. این امر نشان می‌دهد تأثیر افزایش دوره تناوب طرح در جداساز LRB نسبت به جداساز FPS مانند ساختمان‌های ۷ و ۳ طبقه عملکرد بهتر در کاهش پاسخ شتاب سازه ۱۲ طبقه دارد. همچنین با مقایسه کاهش کارایی سامانه جداساز زمانی که ارتفاع سازه از ۳ به ۱۲ طبقه افزایش پیدا می‌کند در مورد جداساز FPS درصد کاهش کارایی در سطح خطر-۱ برابر با ۲۹ درصد و در سطح خطر-۲ برابر با ۲۲ درصد می‌باشد که این موضوع برای سامانه جداساز LRB در سطح خطر-۱ و سطح خطر-۲ به ترتیب برابر با ۲۰ و ۱۹ درصد بوده و نشان‌دهنده آن است حساسیت جداساز FPS در خصوص کاهش کارایی در بهبود عملکرد پاسخ شتاب سازه با افزایش ارتفاع سازه نسبت به جداساز LRB بیشتر است.

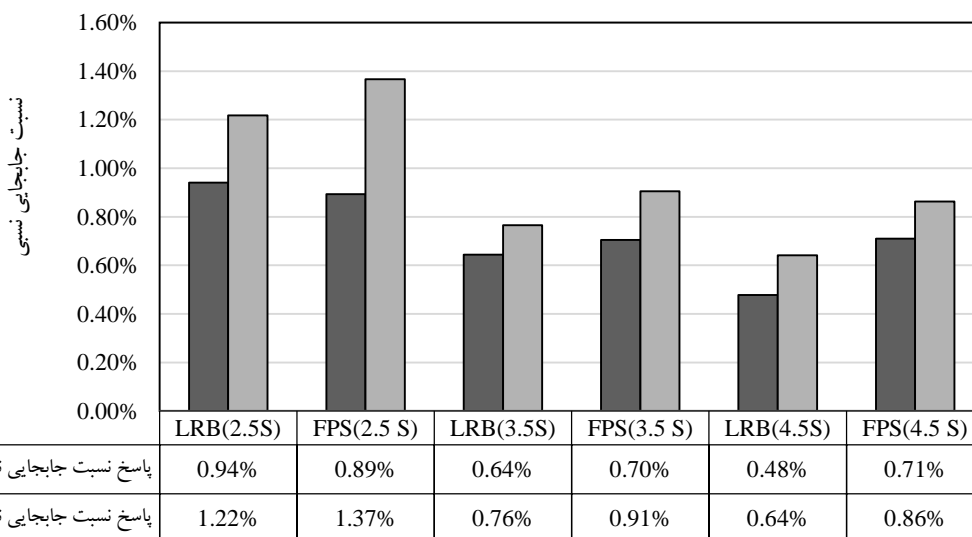
۲-۵- تأثیر استفاده از سامانه جداساز لرزه‌ای لاستیکی هسته سربی و اصطکاکی آونگی تک قوسی بر جابه‌جایی نسبی طبقات و سطح عملکرد

در این قسمت در مورد میزان تأثیر افزایش دوره تناوب طرح جداساز بر روی بیشینه نسبت جابه‌جایی نسبی طبقات بحث می‌شود. همان گونه که در نمودارهای شکل ۱۳ ملاحظه می‌گردد، طبقات ساختمان‌ها در حالت پایه ثابت نسبت جابه‌جایی نسبی بسیار زیادی را تجربه می‌کنند به طوری که در سطح خطر ۲- تمامی ساختمان‌ها در سطح عملکرد CP قرار می‌گیرند.

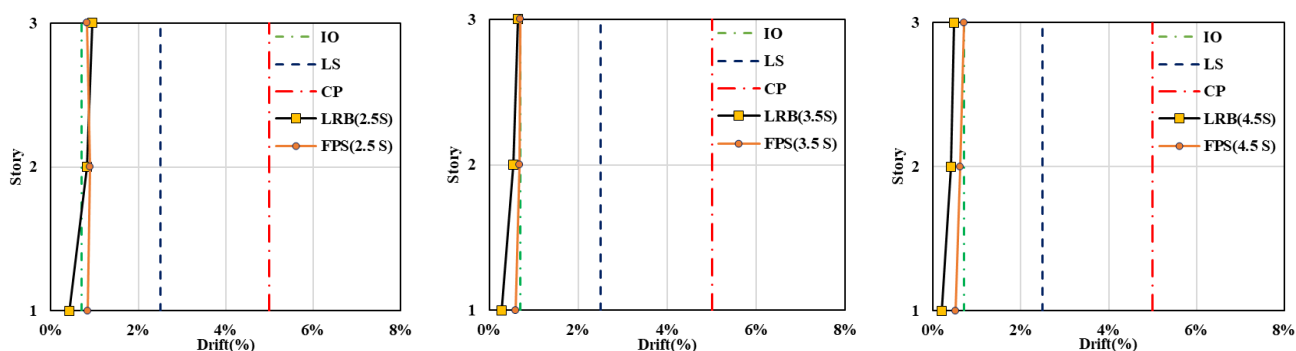


شکل ۱۳: نمودارهای ماکزیمم نسبت جابه‌جایی نسبی طبقات و سطوح عملکردی ساختمان‌های مختلف با پایه ی ثابت

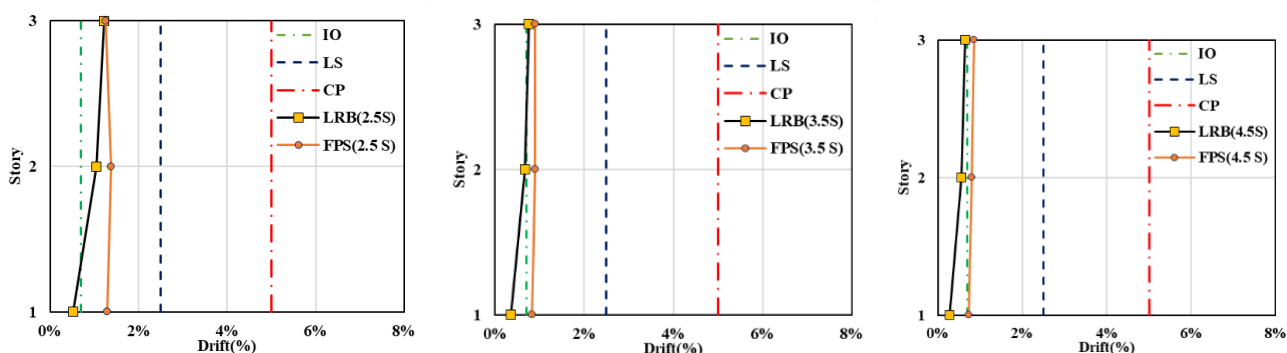
با در دست داشتن پاسخ نسبت جابه‌جایی نسبی طبقات و تعیین سطح عملکردی ساختمان‌های با پایه ی ثابت و ثبت پاسخ ساختمان‌های جداسازی شده با ویژگی‌های مختلف جهت مقایسه با یکدیگر ارائه می‌گردد. باتوجه به جداول و نمودارها مشاهده می‌گردد که به علت جداسازن ساختمان‌ها از زمین و به تبع آن دورماندن روسازه از انرژی مخرب زلزله پاسخ نسبت جابه‌جایی نسبی بیشینه کاهش قابل ملاحظه‌ای دارد؛ به طوری که در ساختمان ۳ طبقه در صورت استفاده از سامانه جداساز لرزه‌ای FPS و LRB به ترتیب بین ۶۴/۱۶٪ تا ۷۷/۳۸٪ و ۶۲/۳۳٪ تا ۸۳/۱۸٪ نسبت جابه‌جایی نسبی کاهش می‌یابد که در مقایسه با درصد کاهش پاسخ شتاب که در بخش قبل بررسی شد در بهبود عملکرد ساختمان ۳ طبقه بهتر عمل می‌کند؛ به طوری سطح عملکردی از CP به سطح عملکردی IO می‌رسد.



شکل ۱۴: مقدار نسبت جابه‌جایی نسبی بیشینه سازه ۳ طبقه مجهز به سامانه جداساز لرزه‌ای اصطکاکی (FPS) و لاستیکی هسته سربی (LRB)



(الف)



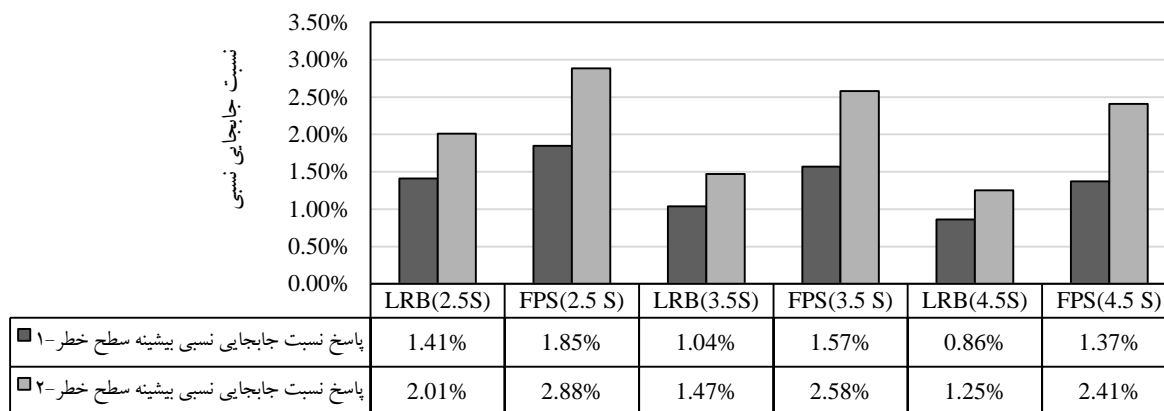
(ب)

شکل ۱۵: مقایسه پاسخ نسبت جابه‌جایی نسبی ساختمان ۳ طبقه مجهز به سامانه جداساز لرزه‌ای (الف) سطح خطر-۱ (ب) سطح خطر-۲

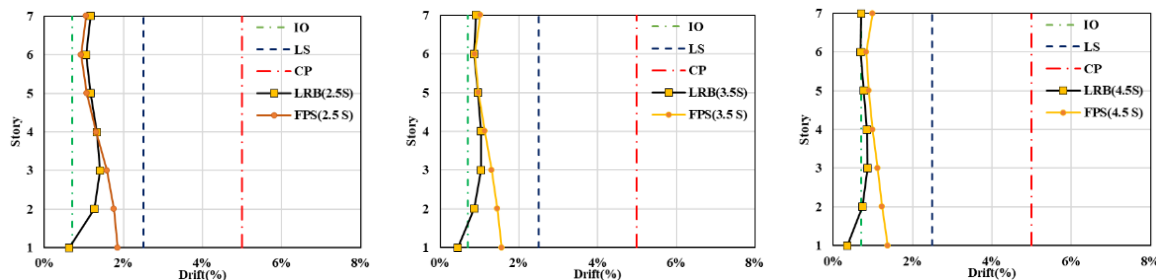
با مقایسه حداکثر مقدار درصد کاهش پاسخ در دوره تناوب طرح ۴/۵ ثانیه مشخص می‌شود که عملکرد جداساز LRB در کاهش پاسخ نسبت جابه‌جایی نسبی ساختمان ۳ طبقه در سطح خطر-۱ به میزان ۹ درصد و سطح خطر-۲ به میزان ۶ درصد عملکرد بهتری نسبت به جداساز FPS دارد. نکته مهم و قابل توجه که از روی شکل ۱۴ و شکل ۱۵ می‌توان به دست آورد تأثیر افزایش دوره تناوب طرح سامانه‌های جداساز لرزه‌ای می‌باشد؛ به این صورت که در مورد سامانه جداساز لرزه‌ای FPS در صورت افزایش دوره تناوب طرح از ۲/۵ ثانیه به ۴/۵ ثانیه مقدار درصد کاهش نسبت جابه‌جایی نسبی در سطح خطر-۱ و ۲ به ترتیب ۷ و ۱۳ درصد افزایش می‌یابد ولی در مورد سامانه جداساز لرزه‌ای LRB مقدار درصد کاهش پاسخ در صورت افزایش دوره تناوب طرح از ۲/۵ ثانیه به ۴/۵ ثانیه در سطح خطر-۱ و سطح خطر-۲ به ترتیب ۱۹ و ۱۵ درصد افزایش می‌یابد نتایج نشان می‌دهند تأثیر افزایش دوره تناوب طرح در جداساز LRB نسبت به جداساز FPS عملکرد بهتر در کاهش پاسخ نسبت جابه‌جایی نسبی ساختمان ۳ طبقه دارد.

در ساختمان ۷ طبقه در صورت استفاده از سامانه جداساز لرزه‌ای FPS و LRB به ترتیب بین ۲۳/۰۸٪ تا ۵۴/۰۱٪ و ۴۶/۴۰٪ تا ۷۱/۰۴٪ نسبت جابه‌جایی نسبی کاهش می‌یابد. شکل ۱۶ نشان می‌دهد درصد کاهش پاسخ شتاب که در بخش قبل بررسی شد در بهبود عملکرد ساختمان ۷ طبقه از جنبه پاسخ جابه‌جایی نسبی (دریفت) بهتر عمل می‌کند؛ به طوری سطح عملکردی از CP به سطح عملکردی LS می‌رسد. با مقایسه حداکثر مقدار درصد کاهش پاسخ در دوره تناوب طرح ۴/۵ ثانیه مشخص است که عملکرد جداساز LRB در کاهش پاسخ نسبت جابه‌جایی نسبی ساختمان ۷ طبقه در سطح خطر-۱ و سطح خطر-۲ به ترتیب به میزان ۱۷ و ۳۰ درصد عملکرد بهتری نسبت به جداساز FPS دارد. نکته قابل توجه که از روی شکل ۱۶ و شکل ۱۷ می‌توان به دست آورد، تأثیر افزایش دوره تناوب طرح سامانه‌های جداساز لرزه‌ای می‌باشد؛ به این صورت که در مورد سامانه جداساز لرزه‌ای FPS در صورت افزایش دوره تناوب طرح از ۲/۵ ثانیه به ۴/۵ ثانیه مقدار درصد کاهش نسبت جابه‌جایی نسبی در سطح خطر-۱ و سطح خطر-۲، به ترتیب ۱۶ و ۱۳ درصد افزایش می‌یابد؛ در مورد سامانه جداساز لرزه‌ای LRB مقدار درصد کاهش پاسخ در صورت افزایش دوره تناوب طرح از ۲/۵ ثانیه به ۴/۵ ثانیه در

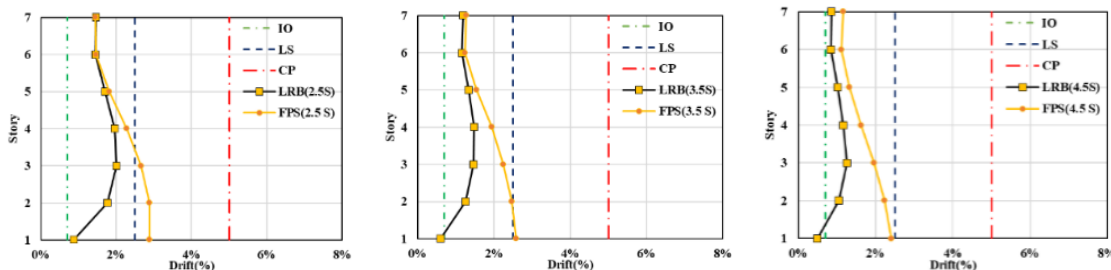
سطح خطر-۱ و سطح خطر-۲ به ترتیب ۱۹ و ۲۰ درصد افزایش می یابد که نشان دهنده تأثیر افزایش دوره تناوب طرح در جداساز LRB نسبت به جداساز FPS همانند ساختمان ۳ طبقه عملکرد بهتر در کاهش پاسخ نسبت جابه جایی نسبی ساختمان ۷ طبقه دارد.



شکل ۱۶: مقدار نسبت جابه جایی نسبی بیشینه سازه ۷ طبقه مجهز به سامانه جداساز لرزه ای اصطکاکی (FPS) و لاستیکی هسته سربی (LRB)



(الف)



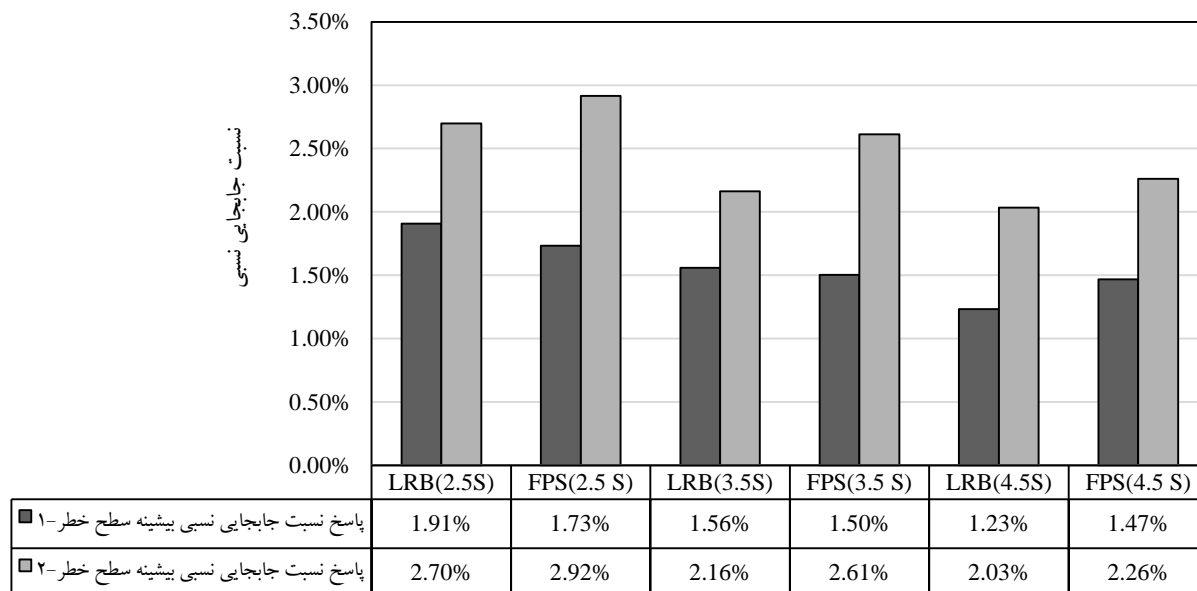
(ب)

شکل ۱۷: مقایسه پاسخ نسبت جابه جایی نسبی ساختمان ۷ طبقه مجهز به سامانه جداساز لرزه ای (الف) سطح خطر-۱ (ب) سطح خطر-۲

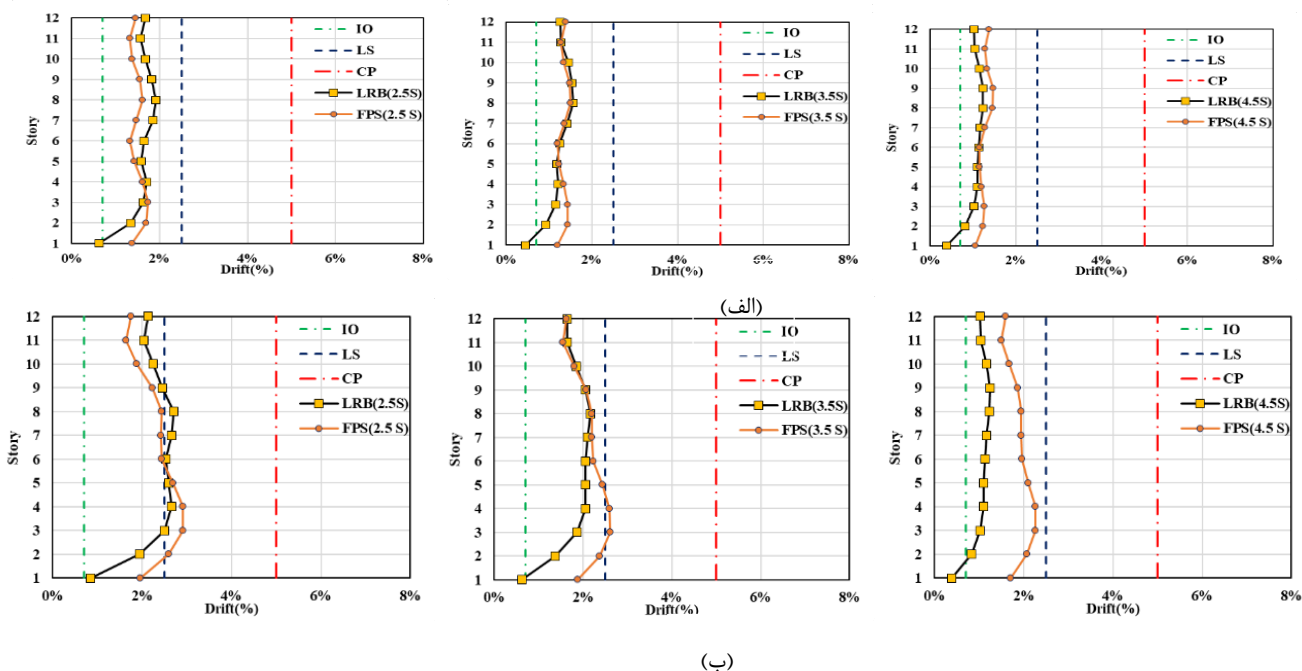
با مقایسه کاهش کارایی سامانه جداساز زمانی که ارتفاع ساختمان از ۳ به ۷ طبقه افزایش پیدا می کند، جداساز FPS درصد کاهش کارایی در بهبود پاسخ جابه جایی نسبی در سطح خطر-۱ برابر با ۱۸ درصد و در سطح خطر-۲ برابر با ۴۲ درصد می باشد که این موضوع برای سامانه جداساز LRB در سطح خطر-۱ و سطح خطر-۲ به ترتیب برابر با ۹ و ۱۷ درصد می باشد که نشان دهنده آن است حساسیت جداساز FPS در خصوص کاهش کارایی در بهبود عملکرد پاسخ نسبت جابه جایی نسبی ساختمان با افزایش ارتفاع آن نسبت به جداساز LRB بیشتر است.

در ساختمان ۱۲ در صورت استفاده از سامانه جداساز لرزه ای FPS و LRB نسبت به مقدار نظیرش در ساختمان با پای ثابت به ترتیب بین ۹/۸۶٪ تا ۳۶/۴۹٪ و ۱۶/۵۶٪ تا ۴۶/۵۶٪ کاهش نسبت جابه جایی نسبی به دست می آید که با توجه به مقادیری که در شکل ۱۸

آورده شده است مشاهده می شود که در مقایسه با درصد کاهش پاسخ شتاب که در بخش مربوط به شتاب بررسی شد در بهبود عملکرد ساختمان ۱۲ طبقه از جنبه پاسخ جابه جایی نسبی (دریفت) بهتر عمل می کند؛ به طوری که سطح عملکردی از CP به سطح عملکردی LS می رسد.



شکل ۱۸: مقدار نسبت جابه جایی نسبی بیشینه ساختمان ۱۲ طبقه مجهز به سامانه جداساز لرزه ای اصطکاکی (FPS) و لاستیکی هسته سری (LRB)



شکل ۱۹: مقایسه پاسخ نسبت جابه جایی نسبی ساختمان ۱۲ طبقه مجهز به سامانه جداساز لرزه ای (الف) سطح خطر-۱ (ب) سطح خطر-۲

با مقایسه حداکثر مقدار درصد کاهش پاسخ در دوره تناوب طرح ۴/۵ ثانیه مشخص می‌شود که عملکرد جداساز LRB در کاهش پاسخ نسبت جابه‌جایی نسبی ساختمان ۱۲ طبقه نیز مشابه با ساختمان‌های ۳ و ۷ طبقه در سطح خطر-۱ و سطح خطر-۲ به ترتیب به میزان ۱۰ و ۷ درصد عملکرد بهتری نسبت به جداساز FPS دارد. از شکل ۱۸ و

شکل ۱۹ نشان‌دهنده تأثیر افزایش دوره تناوب طرح سامانه‌های جداساز لرزه‌ای می‌باشد؛ به این صورت که در مورد سامانه جداساز لرزه‌ای FPS در صورت افزایش دوره تناوب طرح از ۲/۵ ثانیه به ۴/۵ ثانیه مقدار درصد کاهش پاسخ نسبت جابه‌جایی نسبی در سطح خطر-۱ و سطح خطر-۲، به ترتیب به میزان ۱۱/۵ و ۲۰ درصد افزایش می‌یابد. در مورد سامانه جداساز لرزه‌ای LRB مقدار درصد کاهش پاسخ در صورت افزایش دوره تناوب طرح از ۲/۵ ثانیه به ۴/۵ ثانیه در سطح خطر-۱ و سطح خطر-۲ به ترتیب ۲۹ و ۲۱ درصد افزایش می‌یابد. تأثیر افزایش دوره تناوب طرح در جداساز LRB نسبت به جداساز FPS همانند ساختمان‌های ۳ و ۷ طبقه عملکرد بهتر در کاهش پاسخ نسبت جابه‌جایی نسبی ساختمان ۱۲ طبقه دارد. همچنین با مقایسه کاهش کارایی سامانه جداساز زمانی که ارتفاع ساختمان از ۳ به ۱۲ طبقه افزایش پیدا می‌کند در جداساز FPS کاهش کارایی در سطح خطر-۱ برابر با ۳۵ درصد و در سطح خطر-۲ برابر با ۴۷ درصد می‌باشد که این موضوع برای سامانه جداساز LRB در سطح خطر-۱ و سطح خطر-۲ به ترتیب برابر با ۳۳ و ۴۴ درصد می‌باشد که نشان‌دهنده آن است حساسیت جداساز FPS در خصوص کاهش کارایی در بهبود عملکرد پاسخ نسبت جابه‌جایی نسبی ساختمان با افزایش ارتفاع آن نسبت به جداساز LRB بیشتر است.

۶- نتیجه‌گیری

از مقایسه رفتاری و تفسیر نمودارهای مطالعه حاضر، نتایج زیر به دست می‌آید:

- ۱) با افزایش تعداد طبقات، تأثیر جداساز لرزه‌ای، در بهبود پاسخ شتاب و جابه‌جایی نسبی طبقات کمتر می‌گردد. این تغییرات به صورت درصدی به‌ازای مدل‌های مختلف در جداول مربوطه نشان داده شده است.
- ۲) در ساختمان‌های کوتاه جداسازی شده، تغییرات شتاب نسبت به تغییرات ارتفاع ساختمان ناچیز بوده ولی با افزایش ارتفاع آنها، شتاب طبقات از پایه تا بام به صورت خطی افزایش می‌یابد.
- ۳) با وجود تأثیرگذاری جداسازها در کاهش شتاب طبقات، میزان تأثیرگذاری آنها در کنترل تغییرمکان نسبی طبقات، کنترل شتاب بسیار بیشتر می‌باشد. این نکته در میزان آسیب ناشی از شتاب و تغییرمکان نسبی حائز اهمیت می‌باشد.
- ۴) تأثیرگذاری سامانه جداساز لرزه‌ای LRB در کاهش تغییرمکان نسبی و شتاب طبقات، نسبت به سامانه جداساز لرزه‌ای FPS بیشتر می‌باشد.
- ۵) حساسیت سامانه جداساز لرزه‌ای FPS در خصوص کاهش کارایی سامانه جداساز با افزایش ارتفاع ساختمان نسبت به سامانه جداساز لرزه‌ای LRB بیشتر است و با افزایش ارتفاع ساختمان کاهش عملکرد بیشتری در بهبود پاسخ ساختمان در سامانه جداساز FPS نسبت به سامانه جداساز LRB اتفاق می‌افتد.
- ۶) در ساختمان‌های با پای ثابت، شتاب در طبقه بام نسبت به شتاب وارد در پایه تشدید می‌شود، اما در ساختمان‌های جداسازی شده تفاوت چندانی ندارد.

مراجع

1. Gkournelos, P.D., Triantafillou, T.C., Bournas, D.A.: Seismic upgrading of existing reinforced concrete buildings: A state-of-the-art review. Eng. Struct. 240, 112273 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112273>
2. Cheng, F.Y., Jiang, H., Lou, K.: Base Isolation Systems. In: Smart structures : innovative systems for seismic response control. pp. 51–110. CRC Press : Taylor & Francis Group, Boca Raton; London; New York (2008)

3. Mayes, R.L.: Design of Structures with Seismic Isolation. In: Naeim, F. (ed.) The Seismic Design Handbook. pp. 723–755. Springer US, Boston, MA (2001)
4. Cavdar, E., Ozdemir, G.: Amplification in maximum isolator displacement of an LRB isolated building due to mass eccentricity. *Bull. Earthq. Eng.* 20, 607–631 (2022). <https://doi.org/10.1007/s10518-021-01247-1>
5. Vibhute, A.S., Bharti, S.D., Shrimali, M.K., Datta, T.K.: Performance evaluation of FPS and LRB isolated frames under main and aftershocks of an earthquake. *Structures*. 44, 1532–1545 (2022). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.08.082>
6. Ozer, E., Inel, M., Cayci, B.T.: Seismic behavior of LRB and FPS type isolators considering torsional effects. *Structures*. 37, 267–283 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.01.011>
7. Castaldo, P., Palazzo, B., Alfano, G., Palumbo, M.F.: Seismic reliability-based ductility demand for hardening and softening structures isolated by friction pendulum bearings. *Struct. Control Heal. Monit.* 25, e2256 (2018). <https://doi.org/10.1002/stc.2256>
8. Pokhrel, A., Li, J.C., Li, Y.C., Maksis, N., Yu, Y.: Comparative Studies of Base Isolation Systems Featured with Lead Rubber Bearings and Friction Pendulum Bearings. *Appl. Mech. Mater.* 846, 114–119 (2016). <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.846.114>
9. Komur, M.A.: Soft-Story Effects on the Behavior of Fixed-Base and LRB Base-Isolated Reinforced Concrete Buildings. *Arab. J. Sci. Eng.* 41, 381–391 (2016). <https://doi.org/10.1007/s13369-015-1664-3>
10. Jangid, R.S.: Optimum friction pendulum system for near-fault motions. *Eng. Struct.* 27, 349–359 (2005). <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2004.09.013>
11. Cheng, F.Y., Jiang, H., Lou, K.: Basic Concept of SmartStructure Systems. In: *Smart structures : innovative systems for seismic response control*. pp. 1–50. , Boca Raton; London; New York (2008)
12. Naeim, F., Kelly, J.M.: Isolation System Components. In: *Design of Seismic Isolated Structures: From Theory to Practice*. pp. 47–62. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, USA (1999)
13. Jain, M., Sanghai, S.S.: A Review: On Base Isolation System. *Int. J. Sci. Adv. Res. Technol.* 3, 326–330 (2017)
14. Zordan, T., Liu, T., Briseghella, B., Zhang, Q.: Improved equivalent viscous damping model for base-isolated structures with lead rubber bearings. *Eng. Struct.* 75, 340–352 (2014). <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.05.044>
15. Federal Emergency Management Agency (FEMA): NEHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings and NEHER Commentary on the Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings, (1997)
16. Tyler, R.G., Robinson, W.H.: High-strain tests on lead-rubber bearings for earthquake loadings. *Bull. New Zeal. Soc. Earthq. Eng.* 17, 90–105 (1984). <https://doi.org/10.5459/bnzsee.17.2.90-105>
17. Robinson, W.H., Greenbank, L.R.: An extrusion energy absorber suitable for the protection of structures during an earthquake. *Earthq. Eng. Struct. Dyn.* 4, 251–259 (1976). <https://doi.org/10.1002/eqe.4290040306>
18. Li, M., Yang, J., Liang, S., Hou, H., Hu, J.: Review on clean recovery of discarded / spent lead-acid battery and trends of recycled products. *J. Power Sources*. 436, 226853 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2019.226853>
19. ASCE/SEI 7-10.: “Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures.” American Society of Civil Engineers, Reston, Virginia (2010)
20. NEHRP Consultants Joint Venture: Evaluation of the FEMA P-695 Methodology for Quantification of Building Seismic Performance Factors (NIST GCR 10-917-8). *Natl. Inst. Stand. Technol.* (2010)
21. Federal Emergency Management Agency (FEMA): “Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings (FEMA 356).” Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C. (2000)