

بررسی استفاده از شاخص عملکرد مبتنی بر انرژی در طراحی میراگر اصطکاکی پال و ویسکوز و جداساز لرزه ای در سازه بتن آرمه

حامد پلویی^۱، سپیده رحیمی^{۲*}، محمد حسین زاده^۳، مرتضی حسینعلی بیگی^۳

- ۱- دانشجوی دکترای مهندسی عمران، دانشکده عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نور
۲- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نور
۳- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

* sepideh.rahimi@iau.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۸/۱۶

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۵/۲۶

چکیده

روش‌های مختلفی برای طراحی اتلاف‌کننده‌های انرژی وجود دارد. با توجه به نوع عملکرد این المان‌ها بهتر است روش طراحی متناسب با انرژی مستهلک‌شده اتخاذ شود تا مشخص شود چه باری برای المان‌های اتلاف‌کننده انرژی باید به‌عنوان بار طرح در نظر گرفته شود تا این المان‌ها بهترین عملکرد لرزه‌ای را داشته باشند. یکی از این روش‌ها استفاده از شاخص عملکرد مبتنی بر انرژی است. این روش معمولاً برای طراحی میراگرهای اصطکاکی پال استفاده می‌شود. در این تحقیق سعی شده است تا با استفاده از این روش برای یک سازه ۱۲ طبقه بتن‌آرمه میراگرهای اصطکاکی پال، ویسکوز و جداساز لرزه‌ای از نوع تکیه‌گاه لاستیکی سربی طراحی و عملکرد آن‌ها با یکدیگر بررسی شود. بر این اساس برای رکوردهای زلزله‌ی طرح شاخص عملکرد مبتنی بر انرژی محاسبه و بار طرح بهینه برای این سه اتلاف‌کننده انرژی محاسبه شده است. سازه‌ها با بار بهینه طرح تحت بارهای دینامیکی قرار گرفته و مواردی مانند سهم المان‌ها در اتلاف انرژی و منحنی شکنندگی آن‌ها مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد در یک شتاب طیفی ثابت (Sa) احتمال فراگذشت از سطح عملکرد مشخص سازه‌ی دارای میراگر اصطکاکی پال که بر این اساس طراحی شده است کمتر از سایر سازه‌هاست. همچنین در شتاب طرح جداساز لرزه‌ای مقدار انرژی بیشتری را نسبت به دو سازه‌ی دیگر تلف کرده است.

واژگان کلیدی: میراگر اصطکاکی پال، ویسکوز، جداساز لرزه‌ای، شاخص عملکرد مبتنی بر انرژی، سازه بتن‌آرمه

۱- مقدمه

لرزه‌ای در فونداسیون سازه ساختمانی نصب می‌شود تا انرژی

زلزله را جذب کند و از صدمه دیدن سازه در اثر حرکات زمین- لرزه که به ساختمان منتقل می‌شود جلوگیری کند [2]. در میان

جداسازها و میراگرها با اتلاف انرژی ورودی در سازه می‌تواند سهم اتلاف انرژی المان‌های تیر و ستون را کاهش می‌میزان آسیب وارد شده به این المان‌ها را کنترل نمایند [1]. جداساز

انواع گوناگون سیستم جداساز لرزه‌ای تکیه‌گاه لاستیکی سربی^۱ (LRB) در نیوزلند، ژاپن و ایالات متحده آمریکا مورد استفاده زیادی قرار گرفته است [3]. لی و همکاران (۲۰۲۱) تأثیر استفاده از جداساز لرزه‌ای را با در نظر گرفتن آثار اندرکنش خاک و سازه بررسی کردند [2]. بیلال (۲۰۲۲) رفتار لرزه‌ای سازه‌های جداسازی شده را تحت زلزله‌های بزرگ مورد ارزیابی قرار دادند [4]. دلوکا و همکاران (۲۰۲۲) نیز ظرفیت باربری افقی جداسازهای لرزه‌ای را به صورت آزمایشگاهی مورد ارزیابی قرار دادند [5].

از میان سیستم‌های کنترل غیرفعال، میراگرهای اصطکاکی به دلیل دارا بودن سازوکار ساده، عدم حساسیت به تغییر دما و تأثیر اصطکاک در کاهش انرژی ناشی از زلزله یکی از راه‌های بهبود رفتار لرزه‌ای سازه‌ها محسوب می‌شوند [6]. یکی از این میراگرهای اصطکاکی که از متداول‌ترین انواع میراگرها محسوب می‌شود میراگر اصطکاکی پال است. این میراگر طوری طراحی می‌شود که در برابر بارهای سرویس معمولی و زلزله‌های متوسط نلغزد [7]. قولمغانی و همکاران (۲۰۲۱) تأثیر استفاده از میراگر اصطکاکی پال را روی بهبود عملکرد لرزه‌ای مورد ارزیابی قرار دادند [8]. ویس مرادی و همکاران (۲۰۲۲) تأثیر استفاده از میراگرهای ویسکوز را در سازه‌های دارای حرکت گهواره‌ای بررسی کردند [9].

میراگرهای ویسکوز برای بار اول در مهندسی هوافضا و نظامی برای جذب ضربه تولیدشده از موشک‌های پرتابی یا فرود یک هواپیما استفاده شده است [10]. سرچشمه پور و همکاران (۲۰۲۰) محل بهینه قرارگیری میراگرهای ویسکوز را برای عملکرد بهتر در بارهای لرزه‌ای مورد ارزیابی قرار دادند [11]. سوزس و همکاران (۲۰۲۱) قابلیت اطمینان سازه‌های دارای میراگر ویسکوز را تحت بار لرزه‌ای مورد ارزیابی قرار دادند [12]. هو و همکاران (۲۰۲۱) روشی ساده را برای طراحی سازه‌های دارای میراگر ویسکوز تحت بارهای لرزه‌ای ارائه دادند [13]. در این تحقیق سعی شده است تا ابتدا یک روش مبتنی بر انرژی برای طراحی جاذب‌های انرژی در سازه‌ها بررسی شود و سپس

عملکرد لرزه‌ای و شکنندگی لرزه‌ای آن‌ها با یکدیگر مقایسه شود تا مشخص شود کدام جاذب عملکرد بهتری از خود نشان می‌دهد. برای این منظور یک سازه‌ی بتن‌آرمه و سپس اتلاف کنده‌هایی شامل جداساز لرزه‌ای، میراگر ویسکوز و میراگر اصطکاکی پال برای آن طراحی شده است. در ادامه مشخصات سازه و روند طراحی متنی بر انرژی ارائه شده است.

۲- روش تحقیق

روشی که برای طراحی سازه و میراگرها پیشنهاد می‌شود روشی مبتنی بر تعیین بار بهینه طرح بر اساس انرژی تلف شده در سازه است. این روش پیش از این تنها برای طراحی میراگر پال کاربرد داشته است. در این تحقیق بررسی خواهد شد که این روش با توجه به سادگی آیا می‌تواند مورد استفاده میراگرهای ویسکوز و جداسازها نیز قرار بگیرد یا خیر. در این روش برای طراحی میراگرهای اصطکاکی پال با استفاده از میزان انرژی ورودی در سازه و مقدار انرژی تلف شده توسط میراگرها، شاخصی را به عنوان شاخص عملکرد میراگر معرفی می‌کنند (رابطه ۱) [14]:

$$R_e = \frac{(E_I - E_H)}{E_I} \quad (1)$$

که در آن E_I انرژی ورودی به سازه دارای میراگر اصطکاکی و E_H انرژی هیسترتیک اتلاف شده توسط میراگر است [14]. بار طرح میراگر از مقادیر کم انتخاب شده و برای آن شاخص عملکرد محاسبه می‌شود. این بار گام به گام افزایش می‌یابد تا در نهایت به مقدار بهینه خود برسد. بار بهینه به عنوان نیروی طرح میراگر در نظر گرفته می‌شود.

در طراحی میراگرهای اصطکاکی پال و سایر جاذب‌های انرژی می‌توان از مقادیر مختلفی به عنوان بار طرح استفاده کرد. اما این بارها زمانی می‌توانند بهینه محسوب شوند که شاخص عملکرد میراگر (رابطه ۱) در کمترین حالت خود قرار گیرد. این کمترین حالت تعیین‌کننده این مطلب است که سهم اتلاف انرژی در میراگر نسبت به سازه در بیشترین حالت خود قرار دارد که نشان می‌دهد میراگر یا جاذب انرژی دارای بهترین عملکرد خود است.

انرژی) برای ۷۵٪ بار جانبی طراحی شده است. برای طراحی این قاب از بتنی با مقاومت ۲۸ روزه برابر ۲۱ Mpa و آرماتوری با تنش تسلیم ۴۰۰۰ Mpa و مدول الاستیسیته 2.1×10^5 Mpa استفاده شده است. سازه در نرم افزار ایتبس مدل سازی و طراحی شده است (شکل ۱). در این تحقیق در مدل های مربوط به میراگر اصطکاکی پال و ویسکوز از مهاربندی با مساحت ۵۱ سانتی متر مربع استفاده شده است.

شکل ۱. مدل سازی سازه اولیه در ایتبس

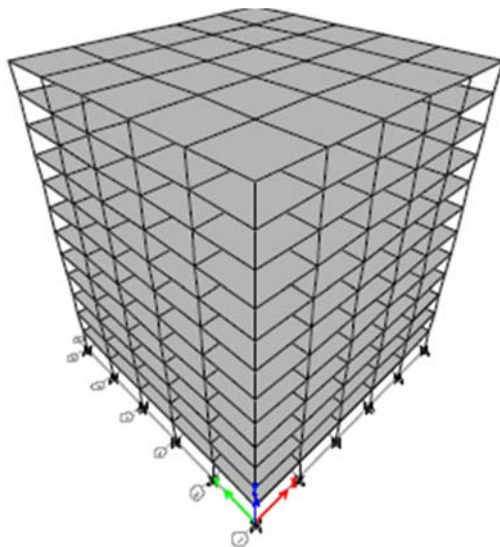


Fig 1. Modeling of the initial structure in ETABS

سپس به سازه مدل سازی شده اتلاف کننده های انرژی شامل جداساز لرزه ای LRB، میراگر ویسکوز و میراگر اصطکاکی پال به صورت شکل (۲) اضافه شده است. برای مدل سازی میراگر اصطکاکی پال از المان Inelastic Bar در نرم افزار پرفورم بر اساس مدل مدل وو (۲۰۰۵) [16] استفاده شده است. برای مدل سازی میراگری ویسکوز از المان fluid damper در نرم افزار پرفورم استفاده شده است. برای اعتبارسنجی نتایج و رفتار مربوط به میراگر ویسکوز از تحقیق آزمایشگاهی مبتنی بر رفتار سیکلیک توسط یائو و همکاران (۲۰۱۴) [17] استفاده شد. همچنین برای مدل سازی جداساز لرزه ای از المان base isolator در نرم افزار پرفورم استفاده شده است. اعتبارسنجی جداساز لرزه ای با مدل عددی کنستانتینو (۲۰۰۷) [18] انجام شده است. تحلیل قاب ها

در این تحقیق پیشنهاد شده است تا ابتدا یک سازه بر اساس ۷۵٪ نیروی زلزله با سیستم قاب خمشی ویژه طراحی شود [15] و سپس با استفاده از شاخص عملکرد، بار طرح برای اتلاف کننده های انرژی محاسبه شود. برای محاسبه بار طرح اتلاف کننده های انرژی از تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی استفاده شود. بار طرح از مقادیر کم به اتلاف کننده ها اختصاص داده شود و سپس به صورت گام های ثابت افزایش یابد. در هر گام یک شاخص عملکردی محاسبه و سپس میانگین شاخص های عملکردی برای مجموعه ای از رکوردها محاسبه شود. از بین مقادیر میانگین شاخص عملکردی مقدار بهینه انتخاب و طراحی سازه و اتلاف کننده های انرژی کامل شود. در مورد چگونگی محاسبه شاخص بهینه در بخش ۳ توضیح داده شده است.

۱-۲- مدل سازه ای

برای رسیدن به اهداف تحقیق یک سازه ی سه بعدی ۱۲ طبقه با ۵ دهانه ۶ متری با پلان مربع در نظر گرفته شده است. برای طراحی سازه فرض شده است سازه در یک منطقه با لرزه خیزی زیاد ($A=0.3g$) و در زمین نوع سه واقع شده است. بار مرده برابر 600 Kg/m^2 و بار زنده برابر 200 Kg/m^2 در نظر گرفته شده است. برای بارگذاری جانبی (و طراحی لرزه ای) از استاندارد ۲۸۰۰ ویرایش چهارم ایران استفاده شده و قاب بتن آرمه بر اساس استاندارد ASCE7-10 (در سازه های دارای اتلاف کننده های پس از طراحی اولیه یکی از قاب های پیرامونی انتخاب و به صورت غیرخطی در نرم افزار پرفورم مدل سازی شده است. برای مدل سازی غیرخطی از روش مفصل پلاستیک متمرکز بر اساس آئین نامه FEMA 360 استفاده شده است. دو مفصل متمرکز خمشی (با در نظر گرفتن اندرکنش خمش و برش برای تیرها و خمش و نیروی محوری برای ستون ها) در ابتدا و انتهای اعضا لحاظ شده است. برای مدل سازی غیرخطی تیرها از المان FEMA BEAM و برای مدل سازی ستون ها نیز از المان Column استفاده شده است. در منحنی رفتاری از پارامترهای مدل سازی و معیارهای پذیرش معرفی شده در نشریه ۳۶۰ استفاده شده است.

در نرم افزار نتایج حاصل از مدل عددی در تحقیق حاضر و مدل های آزمایشگاهی مذکور نشان می دهد چگونگی مدل سازی از دقت کافی برخوردار است (شکل ۳).

برای انجام تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی و تحلیل های IDA از ۲۰ رکورد حوزه ی نزدیک استفاده شده است. در انتخاب رکوردها سعی شده است از ایستگاه هایی بافاصله ی کانونی کمتر از ۳۰ کیلومتر، بزرگراهایی بیشتر از ۵۸ استفاده شود که دارای پالس نیز باشند. این رکوردها در جدول (۱) معرفی شده اند.

جدول ۱. مشخصات رکوردها

Record	Station	PGA (g)	Mw
Chi-Chi, Taiwan	TCU084	1.16	7.6
Chi-Chi, Taiwan	TCU065	0.789	7.6
Cape Mendocino	Cape Mendocino	1.43	7
Coalinga-05	Oil City	0.841	5.8
Imperial Valley-06	Elcentro#5	0.528	6.5
Imperial Valley-06	Elcentro#8	0.602	6.5
Kocaeli, Turkey	Izmit	0.22	7.5
Loma Prieta	BRAN	0.64	6.9
Morgan Hill	Coyote Lake Dam	1.3	6.2
Nahanni	Site 2	0.45	6.8
Northridge	Sylmar-Converter Station	0.897	6.7
Northridge	Sylmar-Olive View	0.843	6.7
San Fernando	Pacoima Dam	1.24	6.6
Nigata	NIGH11	0.59	6.63
Kobe	Nishi-Akashi	0.48	6.9
Gazli, USSR	Karakyr	0.71	6.8
Bam	Bam	0.8	6.6
Tabas	Tabas	0.85	7.35
Manjil	Abhar	0.51	7.37

Table 1. Records properties

همچنین در شکل (۴) نمودارهای منحنی های شاخص عملکردی و بار طرح برای سه سازه به تفکیک ارائه شده است. در این

شکل ۲. مدل های اجزای محدود در نرم افزار پرفورم، سازه های دارای الف) میراگر اصطکاکی پال ب) میراگر ویسکوز ج) جداساز لرزه ای

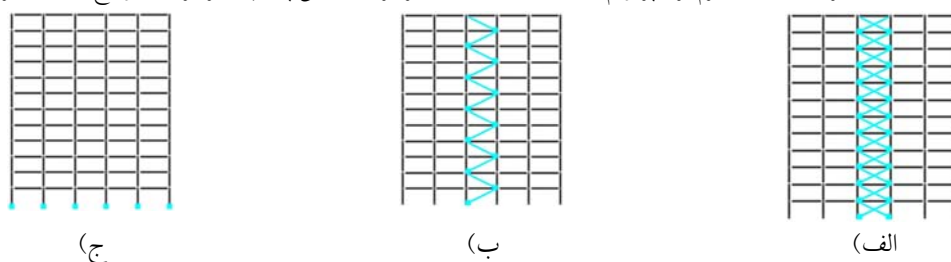


Fig. 2. Finite element models in Perform software, structures with a) Pall damper b) Viscous damper c) Seismic isolator

شکل ۳. اعتبار سنجی میراگر اصطکاکی پال بر اساس مدول وو (ب) منحنی نیرو و تغییر مکان در مدل عددی تحقیق حاضر با تحقیق یائو برای میراگر ویسکوز (ج) اعتبار سنجی جداساز لرزه‌ای مدل عددی کنستانتینو

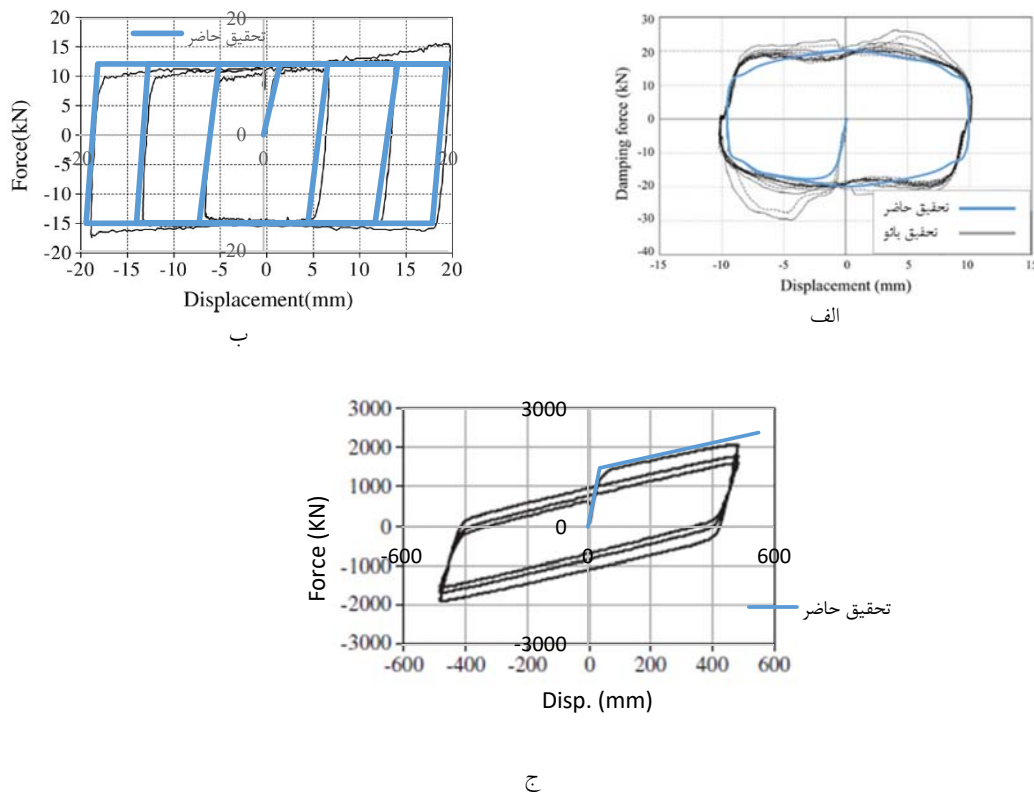


Fig. 3. Validation of Pal Damper for Wu model b) Displacement force curve of viscose damper in the numerical model of the present research with Yao's research c) Seismic isolator validation of Constantino's numerical model

شکل ۳. منحنی نیروی طرح و شاخص عملکرد برای سازه‌های دارای الف) میراگر اصطکاکی پال ب) میراگر ویسکوز ج) جداساز لرزه‌ای

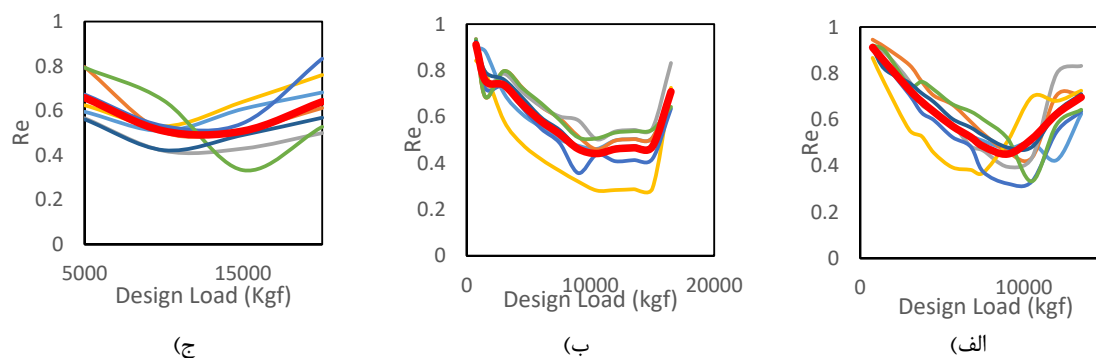


Fig. 4 design load – Re curve for structure with a) pall damper b) viscouse damper c) Base Isolation

۴- ارزیابی عملکرد لرزه‌ای سازه‌ها

کننده‌های انرژی مستهلک کردن انرژی ورودی به سازه و کم کردن سهم انرژی کرنشی پلاستیک در المان‌های تیر و ستون در اثر اعمال بار لرزه‌ای است. در شکل (۵) مقادیر انرژی کرنشی

پس از طراحی اتلاف کننده‌های انرژی، عملکرد لرزه‌ای سازه‌ها در زلزله‌های طرح بررسی شده است. وظیفه اصلی اتلاف

کننده‌ها بتوانند انرژی بیشتری را اتلاف کنند، سهم تیر و ستون‌ها از اتلاف انرژی کاهش می‌یابد و آن‌ها تغییر شکل‌های پلاستیک و آسیب کمتری را متحمل می‌شوند. بر اساس شکل (۵) در رکورد زلزله چی چی مقدار انرژی تلف شده در جداساز لرزه‌ای بیشتر از دو المان میراگر اصطکاکی پال و ویسکوز است. این مسئله باعث شده است تا مقدار انرژی‌های تلف شده توسط المان‌های تیر و ستون در سازه دارای جداساز لرزه‌ای کمتر از المان‌های تیر در دو سازه دیگر باشد. در زلزله نورزرچ سازه دارای میراگر ویسکوز انرژی بیشتری را نسبت به اتلاف کننده‌های دیگر مستهلک کرده است. این مسئله باعث شده است تا تیرها در سازه دارای میراگر ویسکوز در این رکورد، مقدار انرژی کمتری را نسبت به تیرهای سازه‌های دیگر در این رکورد تلف کرده باشند.

پلاستیک تلف شده در المان‌های مختلف سازه‌ای در اثر اعمال زلزله‌های طرح ارائه شده است. انرژی ورودی به سازه باید با انرژی‌های درونی در سازه به تعادل برسد تا سازه پایدار باقی بماند. انرژی درونی در سازه شامل انرژی جنبشی، انرژی تلف شده ناشی از میرایی، انرژی کرنشی الاستیک و انرژی کرنشی پلاستیک در سازه است. هرچه میزان انرژی کرنشی پلاستیک در المان‌های سازه‌ای بیشتر باشد نشان می‌دهد آن المان تغییر شکل پلاستیک بیشتری را تحمل کرده است. بنابراین در المان‌های اصلی سازه که شامل تیر و ستون است هرچه میزان انرژی مستهلک شده بیشتر باشد میزان آسیب نیز بیشتر خواهد بود. اما در المان‌های اتلاف کننده انرژی هرچه این المان‌ها انرژی بیشتری را اتلاف کرده باشند نقش خود را بهتر ایفا کرده‌اند. از آنجایی که انرژی ورودی در سازه ثابت است هرچه اتلاف

شکل ۵. انرژی کرنشی پلاستیک تلف شده در سازه‌های موردنظر تحقیق تحت رکوردهای زلزله طرح

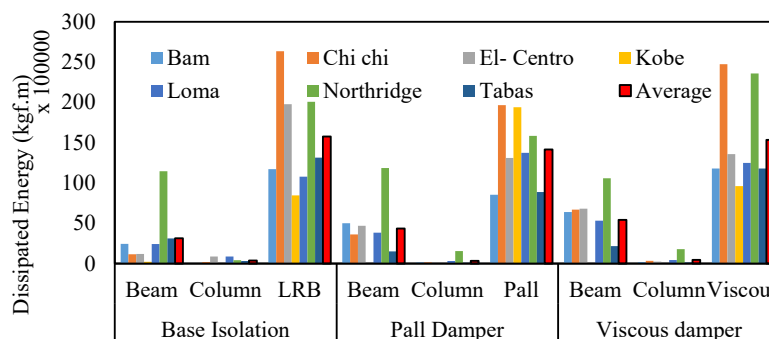


Fig. 5. The plastic strain energy dissipated in the structures under the design earthquake records

در شکل (۶) منحنی‌های جابه‌جایی افقی بام در حالت‌های مختلف بررسی شده است. جابه‌جایی افقی بام میزان پاسخ دینامیکی سازه را نسبت به رکوردهای زلزله نشان می‌دهد. هرچه میزان جابه‌جایی افقی بام بیشتر باشد، پاسخ دینامیکی سازه نیز بیشتر خواهد بود. شکل (۶) جابه‌جایی افقی جداساز لرزه‌ای و سازه را با هم نشان می‌دهد. به عبارت دیگر جابه‌جایی افقی موجود در شکل (۶) جابه‌جایی افقی بام مجموع جابه‌جایی افقی جداساز لرزه‌ای و خود سازه است. به همین دلیل علی‌رغم اینکه جابه‌جایی افقی سازه‌ی جداسازی شده در رکورد زلزله‌ی نورزرچ بیشتر از سازه‌های دیگر است اما ماکزیمم دریافت در این سازه کمتر از سایر سازه‌ها محاسبه شده است. از طرفی علی

بررسی مقادیر میانگین انرژی‌های کرنشی تلف شده در تیرها نشان می‌دهد، تیرها در سازه‌ی دارای جداساز لرزه‌ای کمترین مقدار و در سازه‌ی دارای میراگر ویسکوز بیشترین میزان اتلاف انرژی را داشته‌اند. این روند برای ستون‌ها نیز حاکم است. در ارزیابی مقادیر انرژی اتلاف شده در اتلاف کننده‌های انرژی مشخص شده است مقدار میانگین انرژی تلف شده در زلزله‌های طرح در جداساز لرزه‌ای بیشتر و در سازه دارای میراگر اصطکاکی پال کمتر است. بنابراین به‌طور کلی می‌توان عنوان نمود جداساز لرزه‌ای توانایی اتلاف انرژی بیشتری را نسبت به سایر اتلاف کننده‌های موردبررسی در این تحقیق دارد.

بیشتر از میراگر اصطکاکی پال است. بنابراین سازه‌ی دارای جداساز لرزه‌ای که بر اساس شاخص عملکرد بر مبنای انرژی طراحی شده است پاسخ‌های دینامیکی بیشتری نسبت به سازه‌های دارای میراگر دارد.

رغم اینکه جابه‌جایی افقی در سازه‌ی جداسازی شده بیشتر از سازه‌های دارای میراگر است اما میزان جابه‌جایی پسماند در این سازه کمتر از سازه‌های دارای میراگر است. مقادیر میانگین جابه‌جایی افقی بام نشان می‌دهد میانگین جابه‌جایی افقی در بام سازه‌ی جداسازی شده بیشتر از میراگر ویسکوز و در این میراگر

شکل ۶. منحنی تاریخچه زمانی جابه‌جایی افقی بام در زلزله‌های طرح در سازه‌های دارای الف) میراگر ویسکوز ب) میراگر پال ج) جداساز لرزه‌ای د) مقادیر ماکزیم جابه‌جایی افقی

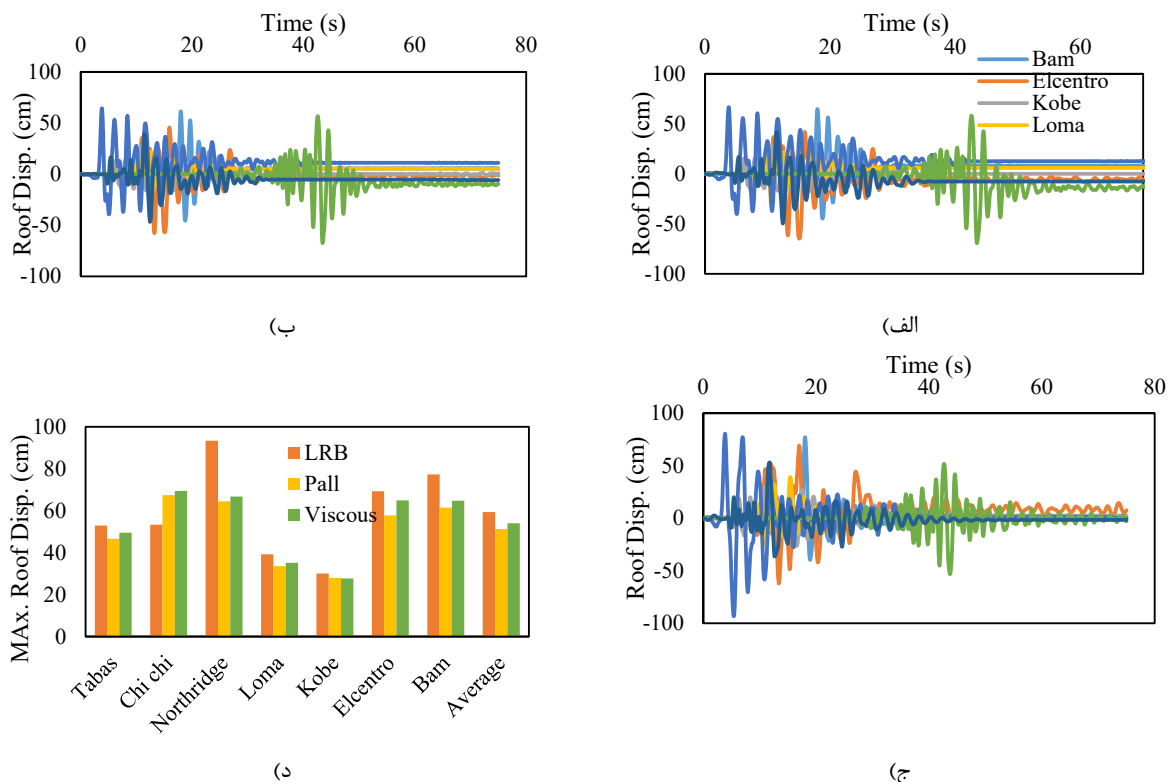


Fig 6. The time history curve of roof horizontal displacement in design earthquakes in structures with a) Viscous damper b) Pal damper c) Seismic isolator d) Maximum values of horizontal displacement

عملکرد این اتلاف کننده‌ها از تحلیل دینامیکی افزایشی و تحلیل شکنندگی استفاده شده است. در تحلیل دینامیکی افزایشی هر یک از رکوردهای معرفی شده در جدول (۱) به مقادیر مختلف شتاب طیفی (S_a) مقیاس شده و سپس به سازه اعمال شده است. در شکل (۷) منحنی‌های IDA برای سه سازه مورد نظر این تحقیق ارائه شده است.

۵- تحلیل شکنندگی

سازه‌های مورد نظر این تحقیق بر اساس شاخص عملکرد مبتنی بر انرژی طراحی شده‌اند. بارهای لرزه‌ای بر اساس استاندارد ۲۸۰۰ مقیاس شده و به سازه اعمال شده است. اتلاف کننده‌های انرژی بر اساس این بارهای طرح طراحی شده و سپس عملکرد سازه‌ها تحت این بارها ارزیابی شده است. برای ارزیابی بهتر

شکل ۷. منحنی IDA در سازه‌های دارای الف) میراگر ویسکوز ب) میراگر اصطکاکی پال ج) جداساز لرزه‌ای

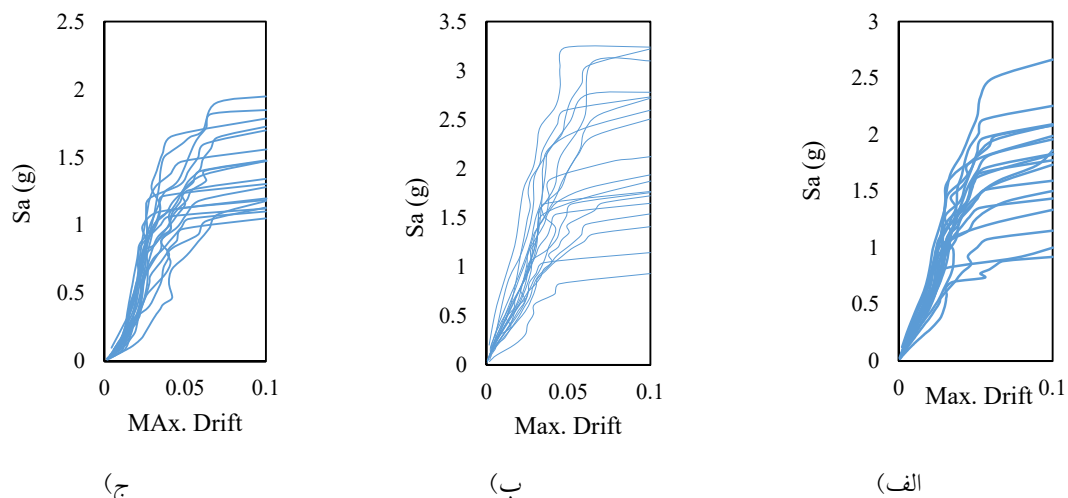
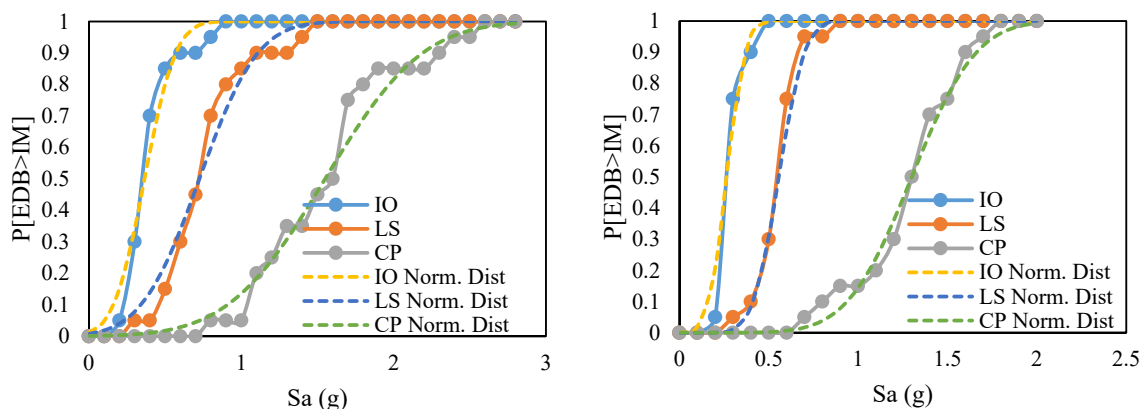


Fig. 7. IDA curve in structures with a) Viscous damper b) Pall damper c) Seismic isolator

احتمال فراگشت سازه‌ها از سطوح عملکرد مشخص یا همان شکنندگی سازه است. شکنندگی برابر است با $fragility = P(EDP > AC|IM)$ که در آن EDB پارامتر تقاضای مهندسی، AC حالت حدی و IM شدت بار لرزه‌ای است. برای ارزیابی منحنی‌های شکنندگی سطوح عملکرد استفاده بی‌وقه IO، ایمنی جانی LS و آستانه فروریزش CP در نظر گرفته شده است. بر اساس آئین‌نامه FEMA 365 برای سازه‌ی بتن آرمه می‌توان مقدار دریافت مجاز در سطوح عملکرد IO، LS و CP را به ترتیب برابر با ۰.۰۱، ۰.۰۲ و ۰.۰۴ در نظر گرفت. احتمال فراگشت هریک از سازه‌ها در شتاب‌های طیفی مختلف از این سطوح عملکرد در شکل (۸) نشان داده شده است.

در ارزیابی منحنی‌های IDA باید به این نکته دقت نمود که پریود سه سازه مورد نظر این تحقیق مقادیر متفاوتی هستند. سازه دارای میراگر اصطکاکی پال کمترین پریود (۱.۰۸ ثانیه)، سازه دارای میراگر ویسکوز پریودی بیشتر (۱.۲۲ ثانیه) و سازه دارای جداساز لرزه‌ای بیشترین پریود را دارد (۱.۹۴ ثانیه). مقادیر طیف پاسخ در پریود ۱.۹۴ ثانیه کمتر از دو پریود دیگر است. علت این امر نیز این است که رکوردها مربوط به حوزه نزدیک هستند. با این تفاسیر ماکزیمم شتاب وارد بر سازه در یک مشخص در سازه‌ی دارای جداساز لرزه‌ای ممکن است بیشتر از سایر سازه‌ها باشد. به این خاطر دامنه تغییرات شتاب طیفی در منحنی‌های IDA برای سازه‌های دارای میراگر از سازه جداسازی شده بیشتر است. کاربرد اصلی منحنی‌های IDA در ارزیابی

شکل ۸. منحنی شکنندگی در سازه‌های دارای الف) میراگر ویسکوز ب) میراگر اصطکاکی پال ج) جداساز لرزه‌ای



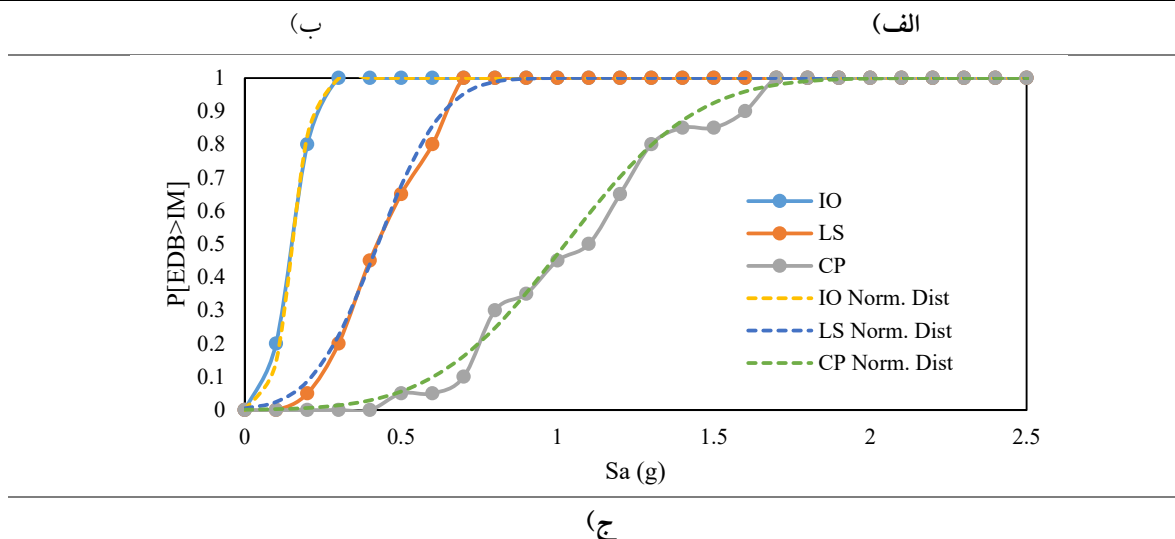


Fig. 8. Fragility curve in structures with a) viscous damper b) pall damper c) seismic isolator

است. از سوی دیگر احتمال قطعی عبور سازه از سطح عملکرد IO برای سه سازه دارای میراگر اصطکاکی پال، ویسکوز و جداساز لرزه‌ای به ترتیب در شتاب‌های طیفی $0.9g$ ، $0.5g$ و $0.4g$ محاسبه شده است. این مقادیر برای سطوح LS برابر با 1.4 ، 0.9 و $0.7g$ و برای سطح عملکرد CP به ترتیب برابر با 2.4 ، 1.9 و $1.8g$ محاسبه شده است.

۶- نتیجه‌گیری

هدف از این تحقیق بررسی عملکرد سازه‌های ۱۲ طبقه دارای میراگر اصطکاکی پال، میراگر ویسکوز و جداساز لرزه‌ای بوده است که با استفاده از شاخص عملکرد مبتنی بر انرژی طراحی شده است. برای طراحی این اتلاف کننده‌های انرژی بارهای طراحی در نظر گرفته و سپس هفت رکورد بر اساس استاندارد ۲۸۰۰ به سازه اعمال شد. در هر رکورد مقدار انرژی ورودی و انرژی تلف شده توسط این اتلاف کننده‌ها محاسبه و سپس شاخص عملکرد متناسب با هر بار طرح استخراج شده است. با استفاده از نمودار شاخص عملکرد-بار طرح، بهینه‌ترین بار طرح که کمترین شاخص را ارائه داده است به عنوان بار بهینه‌ی طرح اتلاف کننده‌ها انتخاب شده است. سازه‌های مدل‌سازی شده با بار طرح در معرض بارهای دینامیکی قرار گرفته است و نتایج زیر به دست آمده است:

در شکل (۸) منحنی‌های شکنندگی در سه سطح عملکرد به دو صورت ارائه شده است. در حالت خط و نقطه مقادیر احتمال فراگشت برای هر S_a در گام‌های $0.1g$ محاسبه و ارائه شده است و در حالت خط چین مقادیر محاسباتی با منحنی نرمال هماهنگی داده شده‌اند. منحنی‌های شکل (۷) نشان می‌دهند که احتمال فراگشت برای سازه در سطح عملکرد IO در یک S_a مشخص در سازه‌ی دارای میراگر اصطکاکی پال کمتر از سازه‌ی دارای میراگر ویسکوز و در سازه دارای میراگر ویسکوز کمتر از سازه جداسازی شده است. به عنوان نمونه در $S_a=0.4g$ احتمال فراگشت از سطح عملکرد IO برای سازه‌ی دارای میراگر اصطکاکی پال، ویسکوز و جداساز لرزه‌ای به ترتیب برابر با 0.7 ، 0.95 و 1 محاسبه شده است. این موضوع نشان می‌دهد که در یک شتاب طیفی ثابت مقادیر دریافت در سازه جداسازی شده بیشتر از دو سازه دیگر خواهد بود. این در حالی است که قبلاً نشان داده شده است در یک PGA ثابت مقدار دریافت در سازه جداسازی شده کمتر از دو سازه مورد نظر دیگر است. محاسبات نشان می‌دهد این روند در سطوح عملکرد LS و CP نیز وجود دارد. به عنوان مثال در سطح عملکرد LS در $S_a=0.5g$ احتمال فراگشت در سه سازه میراگر اصطکاکی پال، ویسکوز و سازه جداسازی شده به ترتیب برابر با 15 ، 31 و 67 درصد محاسبه شده است. در سطح عملکرد CP احتمال فراگشت برای سه سازه در $S_a=1g$ به ترتیب برابر با 5 ، 14 و 46 درصد محاسبه شده

- مقدار شاخص عملکرد بهینه برای سه سازه‌ی دارای میراگر اصطکاکی پال، ویسکوز و جداساز لرزه‌ای به ترتیب در مقادیر ۰.۴۵، ۰.۴۱ و ۰.۵۱ بهینه‌ترین مقدار بار طرح را ارائه کرده‌اند. مقدار بار بهینه‌ی طرح در میراگر اصطکاکی پال کمتر از میراگر ویسکوز و در جداساز لرزه‌ای بیشتر از دو سازه‌ی دیگر بدست آمده است.
- بررسی مقدار انرژی مستهلک‌شده در سازه‌ها تحت رکوردهای زلزله‌ی طرح نشان می‌دهد بیشترین مقدار انرژی مستهلک‌شده مربوط به اتلاف کننده‌های انرژی است و این المان‌ها نسبت به تیر و ستون مقدار بسیار بیشتری انرژی را تلف کرده‌اند. مقدار میانگین انرژی‌های تلف شده در رکوردهای زلزله‌ی طرح نشان می‌دهد که جداساز لرزه‌ای بیشترین مقدار انرژی را نسبت به دو اتلاف کننده دیگر مستهلک کرده است (۱۱٪ بیشتر از میراگر اصطکاکی پال و ۳٪ بیشتر از میراگر ویسکوز).
- نتایج جابه‌جایی افقی بام نسبت به پی سازه نشان می‌دهد علی‌رغم اینکه سازه دارای جداساز لرزه‌ای مقادیر ماکزیمم جابه‌جایی افقی بیشتری را نسبت به دو سازه‌ی دیگر تجربه کرده است اما مقدار جابه‌جایی پسماند در این سازه کمتر از دو سازه دیگر است. سازه دارای میراگر ویسکوز جابه‌جایی‌های بیشتری را نسبت به سازه دارای میراگر اصطکاکی پال تجربه کرده است.
- بررسی منحنی‌های شکنندگی سازه‌های طراحی شده با این روش نشان داده است سازه‌ی دارای میراگر اصطکاکی پال در یک شتاب طیفی مشخص دارای مقدار احتمال فراگشت کمتری نسبت به دو سازه‌ی دیگر است به عنوان نمونه در سطح عملکرد LS در $S_a=0.5g$ احتمال فراگشت در سه سازه میراگر اصطکاکی پال، ویسکوز و سازه جداسازی شده به ترتیب برابر با ۱۵، ۳۱ و ۶۷ درصد محاسبه شده است. لازم به ذکر است با توجه به پیوند سازه مقدار S_a در سازه جداسازی شده کمتر از دو سازه دیگر است.
- منابع**
- [1] Milanchian, R. and M. Hosseini, *Study of vertical seismic isolation technique with nonlinear viscous dampers for lateral*
 - [2] Pérez-Rocha, L.E., J. Avilés-López, and A. Tena-Colunga, *Base isolation for mid-rise buildings in presence of soil-structure interaction*. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2021. **151**: p. 106980.
 - [3] Cancellara, D. and F. De Angelis, *A base isolation system for structures subject to extreme seismic events characterized by anomalous values of intensity and frequency content*. Composite Structures, 2016. **157**: p. 285-302.
 - [4] Bilal, A., Z. Mohammad, and A. Baqi, *Seismic Response of Hill Buildings with Base Isolation and URM Infills*, in *Earthquakes and Structures*. 2022, Springer. p. 277-289.
 - [5] De Luca, A., et al., *Horizontal capacity of base isolation rubber devices under large vertical design stress, valued through full-scale tests*. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2022. **159**: p. 107264.
 - [6] Bagheri, S., et al. *U-shaped metallic-yielding damper in building structures: Seismic behavior and comparison with a friction damper*. in *Structures*. 2015. Elsevier.
 - [7] Jarrahi, H., et al., *Optimal design of rotational friction dampers for improving seismic performance of inelastic structures*. Journal of Building Engineering, 2020. **27**: p. 100960.
 - [8] Golmoghany, M.Z. and S.M. Zahrai. *Improving seismic behavior using a hybrid control system of friction damper and vertical shear panel in series*. in *Structures*. 2021. Elsevier.
 - [9] Veismoradi, S., et al., *Development and parametric study of a new self-centering rotational friction damper*. Engineering Structures, 2021. **235**: p. 112097.
 - [10] Miyamoto, H.K., et al., *Limit states and failure mechanisms of viscous dampers and the implications for large earthquakes*. Earthquake engineering & structural dynamics, 2010. **39**(11): p. 1279-1297.
 - [11] Sarcheshmehpour, M., H.E. Estekanchi, and M.A. Ghannad, *Optimum placement of supplementary viscous dampers for seismic rehabilitation of steel frames considering soil-structure interaction*. The Structural

- [15] Zhou, Y., et al., *A practical design method for reinforced concrete structures with viscous dampers*. Engineering structures, 2012. **39**: p. 187-198.
- [16] Wu, B., et al., *Hysteretic behavior of improved Pall-typed frictional dampers*. Engineering Structures, 2005. **27**(8): p. 1258-1267.
- [17] Yeh, F.-Y., et al., *The dynamic performance of a shear thickening fluid viscous damper*. Journal of the Chinese Institute of Engineers, 2014. **37**(8): p. 983-994.
- [18] Constantinou, M., et al., *Seismic isolation of bridges*. Department of Civil, Structural and Environmental Engineering, State University of New York at Buffalo, 200. V
- Design of Tall and Special Buildings, 2020. **29**(1): p. e1682.
- [12] Scozzese, F., et al., *Influence of viscous dampers ultimate capacity on the seismic reliability of building structures*. Structural Safety, 2021. **91**: p. 102096.
- [13] Hu, X., et al., *Simplified design method for structure with viscous damper based on the specified damping distribution pattern*. Journal of Earthquake Engineering, 2022. **26**(3): p. 1367-1387.
- [14] Mualla, I.H. and B .Belev, *Performance of steel frames with a new friction damper device under earthquake excitation*. Engineering Structures, 2002. **24**(3): p. 365-371.

Investigating the use of energy-based performance index in the design of pall friction and viscous dampers and vibration isolators in RC structures

Hamed Poloe¹ and Sepideh Rahimi^{2*}, Mohammad Hoseinzade², Morteza Hoseinali Beigi³

1- Ph.D. student of Civil Engineering, Faculty of Civil Engineering, Islamic Azad University, Noor branch

2- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Technical Engineering, Islamic Azad University, Noor branch

3-ssistant Professor, Department of Civil Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol

Abstract

There are different ways to design energy dissipators. According to the type of performance of these elements, it is better to adopt the design method according to the consumed energy in order to determine what load should be considered as the design load for the energy-dissipating elements so that these elements have the best seismic performance. One of these methods is the use of energy-based performance index. This method is usually used to design pall friction dampers. In this research, it has been tried to use this method for a 12-story reinforced concrete structure of friction dampers, viscous, and seismic isolators of the lead rubber support type, and their performance is investigated. Based on this, for the earthquake records, the energy-based performance index has been calculated and the optimal design load has been calculated for these three energy wasters. Structures with optimal design load are subjected to dynamic loads and the contribution of elements in energy loss and their fragility curve have been evaluated. The results show that in a constant spectral acceleration (S_a), the probability of exceeding the specified performance level of a structure with a friction damper that is designed on this basis is lower than other structures. Also, in the acceleration of the design, the seismic isolator has wasted more energy than the other two structures. The results of the horizontal displacement of the roof compared to the foundation of the structure show that despite the fact that the structure with seismic isolator has experienced more maximum horizontal displacement values than the other two structures, but the amount of residual displacement in this structure is less than the other two structures. The structure with the viscous damper has experienced more displacements than the structure with the pal friction damper. Examining the fragility curves of the structures designed with this method has shown that the structure with Pal friction damper in a specific spectral acceleration has a lower probability of overturning than the other two structures. Friction of Pall, Viscous and isolated structure is calculated as 15, 31 and 67%, respectively. It should be noted that according to the period of the structure, the value of S_a in the isolated structure is lower than the other two structures. Examining the amount of wasted energy in structures under the design earthquake records shows that the highest amount of wasted energy is related to energy dissipaters and these elements have wasted much more energy than beams and columns. The average amount of wasted energy in the earthquake records of the design shows that the seismic isolator consumed the most energy compared to the other two absorbers (11% more than the Pal friction damper and 3% more than the viscous damper). The value of the optimal performance index for three structures with pal friction damper, viscose and seismic isolator in the values of 0.45, 0.41 and 0.51, respectively, have provided the most optimal design load value. The optimal load value of the design in the Pall friction damper is lower than the viscous damper and in the seismic isolator is higher than the other two structures.

Key words: Pal damper, viscose, seismic isolator, energy-based performance index, reinforced concrete structure