



تأثیر نیروی غیرخطی جداگرهای پایه بر پارامترهای سازه ای

مهدی رشیدی میبدی^۱، سینا رهرو تابان^۲، آرش بهار^۳

۱- کارشناس ارشد، دانشگاه گیلان، mehdirashidi5489@yahoo.com

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه گیلان

۳- عضو هیأت علمی، دانشگاه گیلان

چکیده

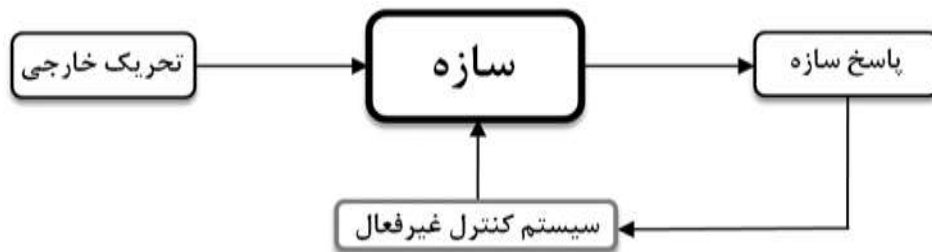
طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله، از دغدغه‌های اصلی نویسندگان آیین‌نامه‌های سازه‌ای و طراحان سازه‌ها می‌باشد. برای مدت زمان طولانی، روش مرسوم در طراحی لرزه‌ای ساختمان‌ها، افزایش سختی، مقاومت، و شکل‌پذیری سازه‌ها بوده است. این نگرش عمدتاً باعث می‌شود که ابعاد اعضای سازه‌ای و مصرف مصالح مورد نیاز افزایش یابد که خود منجر به افزایش هزینه ساختمان‌ها می‌گردد. در دهه‌های اخیر، محققین برای کاهش یا بهبود پاسخ ساختمان‌ها در برابر بارهای لرزه‌ای، با ترکیب مهندسی کنترل و مهندسی سازه، راه‌های جدیدی گشوده‌اند. از جمله این روش‌ها، بکارگیری ایده قدیمی جداسازی پایه ساختمان‌ها است. جداگرهای پایه، نمونه‌ای از سیستم‌های کنترل غیرفعال می‌باشند که با افزایش دوره تناوب اصلی ساختمان، موجب کاهش ارتعاشات وارده به سازه فوقانی می‌گردند. آنها از حیث نوع رفتاری که دارند به دو گروه جداگرهای خطی و غیرخطی تقسیم می‌شوند. تمرکز این پژوهش به جداگرهای غیرخطی معطوف گردیده است و نیروی غیرخطی آنها را بررسی می‌کند. تأثیر حضور این نیروی غیرخطی در جداگر بر پارامترهای مهم سازه‌ای همانند تغییر مکان پایه، دررفت میان‌طبقه و شتاب‌های سازه‌ای در مقایسه با جداگرهای خطی نشان داده خواهد شد. برای این منظور، از یک ساختمان سه بعدی معیار به عنوان آزمایشگاه مجازی استفاده شده است و از زلزله‌های متفاوتی به عنوان تحریک خارجی بکار رفته است. در انتها، هر یک از جداگرها با ضوابط موجود در نشریه ۵۲۳، ارزیابی شده و مورد بحث و نتیجه‌گیری قرار گرفته است.

کلمات کلیدی: جداگر پایه، جداگر الاستومریک خطی، جداگر لاستیکی با هسته سربی، جداگر اصطکاکی

۱- مقدمه

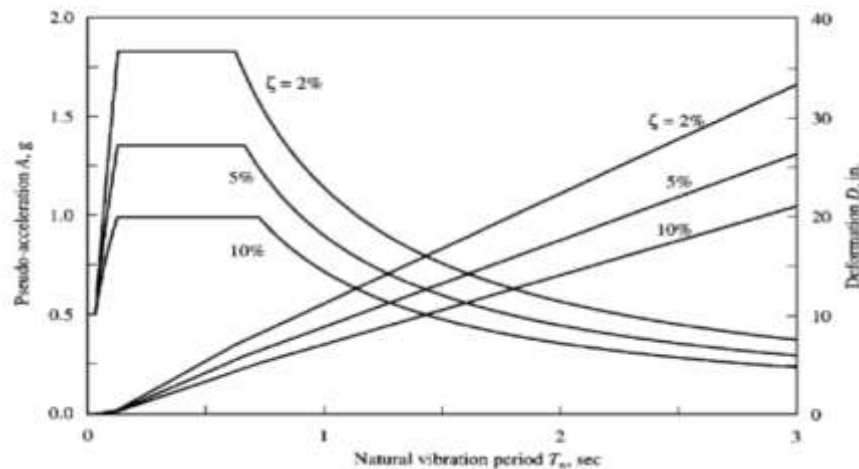
در اغلب آیین‌نامه‌های لرزه‌ای، سه هدف اساسی زیر در طراحی و ساخت سازه‌های تحت زلزله مورد توجه قرار دارند: به حداقل رساندن آسیب‌های ناشی از زلزله در سازه در طول عمر بهره‌برداری آن. از بین بردن خطرات جانی برای ساکنان و کاربران ساختمان. افزایش قابلیت استفاده از سازه پس از وقوع زلزله.

برای مدت ها، روش مرسوم در طراحی لرزه ای ساختمانها، افزایش سختی، مقاومت و شکل پذیری سازه‌ها بوده است. با این روش ابعاد اعضای سازه ای و مصرف مصالح مورد انتظار افزایش می یابد و منجر به افزایش هزینه ساختمان‌ها می شود. تجارب تلخ مربوط به زلزله های گذشته نشان می دهد که کارایی این روش ها محدود است. برای غلبه بر این مشکلات، برخی از مباحث کنترل که کنترل سازه ای نامیده می شود مورد توجه قرار گرفته و پیشرفت‌هایی در سال های اخیر بدست آمده است. روش های کنترل پاسخ سازه به تحریکات خارجی را می توان در چهار گروه ، کنترل فعال، کنترل غیر فعال، کنترل نیمه و کنترل ترکیبی فعال طبقه کرد. کنترل غیر فعال به دلیل عدم وابستگی به منبع انرژی خارجی و حداقل نیاز به تعمیر و نگهداری ، همچنین سادگی در اجرا بیش از سایر روش ها مورد مطالعه واقع شده و در ساختمان ها به کار برده می شود. روش جداسازی پایه*^۱، یک روش کنترل غیرفعال است که به منبع انرژی برای راه اندازی نیاز ندارد. عملکرد ساختمان‌های جدا شده پایه در کشورهای مختلف در خلال زمین لرزه ها در سال های اخیر مورد بررسی واقع شده است. کاربرد این تکنولوژی باعث می شود که رفتار ساختمان در محدوده الاستیک باقی بماند و بنابراین ایمنی لازم در طی وقوع زمین لرزه های بزرگ فراهم می شود. جداسازی پایه در مورد زلزله های نزدیک گسل به دلیل تغییر شکل های بزرگ جداگر دچار مشکل می شود و ایم مسئله تحت مطالعه است جداسازی، یک روش جذاب برای محافظت تجهیزات حساس گران قیمت و مؤلفه های غیر سازه ای مورد نیاز درون آن نیز می باشد. سیستم جداسازی (شکل ۱) انرژی زلزله را جذب نمی کند (بجز LRB) اما آن را سریعاً از طریق دینامیک های سیستم دفع می کند. این اثر به میرایی بستگی ندارد اما یک سطح مشخصی از میرایی می تواند در متوقف کردن تشدید ممکن در فرکانس جداسازی سودمند باشد.



شکل ۱: بلوک دیاگرام سیستم جداسازی به عنوان سیستم کنترل غیرفعال

چوپرا در کتاب دینامیک سازه ها عملکرد جداگرهای پایه را اینگونه توضیح می دهد (شکل ۲):
با این لایه جداسازی، سازه، دوره تناوب طبیعی را که بزرگتر از حالت با پای ثابتش است، تجربه می کند؛ این افزایش دوره تناوب، کاهش شتاب و در نتیجه کاهش نیروی القایی ناشی از زلزله را در سازه منجر می شود اما از طرفی تغییر شکل پایه را افزایش می دهد [۱].



شکل ۲: تأثیر حضور جداگر بر روی شتاب های سازه ای [۱]

۲- شرح مختصری بر انواع جداگر

جداگرها انواع گوناگونی دارند که در نگاه کلی می توانند به صورت جداگرهای خطی و غیرخطی دسته بندی شوند [۲]. جداگرهای الاستومریک با میرایی کم به عنوان جداگر خطی و جداگرهای لاستیکی با هسته سربی و جداگرهای پاندولی اصطکاکی به عنوان جداگرهای پر کاربرد غیرخطی مورد استفاده قرار می گیرند.

۲-۱- جداگرهای لاستیکی طبیعی و مصنوعی با میرایی کم:

نوع متداول امروزی این جداگرها، که به جداگرهای لاستیکی طبیعی و مصنوعی با میرایی کم یا LDR معروف هستند. این جداگرها رفتار خطی دارند (شکل ۳). از مزایای جداگرهای لایه‌ای الاستومری با میرایی پایین می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

ساخت آسان جداگرها (فرآیند ترکیب مصالح و پیوند آن با فولاد به خوبی شناخته شده است)، به راحتی می‌توان آنها را مدل کرد و پاسخ مکانیکی آنها تحت اثر دما، زمان و سن قرار ندارند. تنها عیب این جداگرها آن است که معمولاً به یک سیستم میراگر مکمل (اضافی) نیاز دارند. این سیستم‌های مکمل نیاز به اتصالات دقیق و پیچیده داشته و نوع فلزی آنها، دستخوش پدیده‌ی خستگی در سیکل‌های پایین می‌گردد [۲].

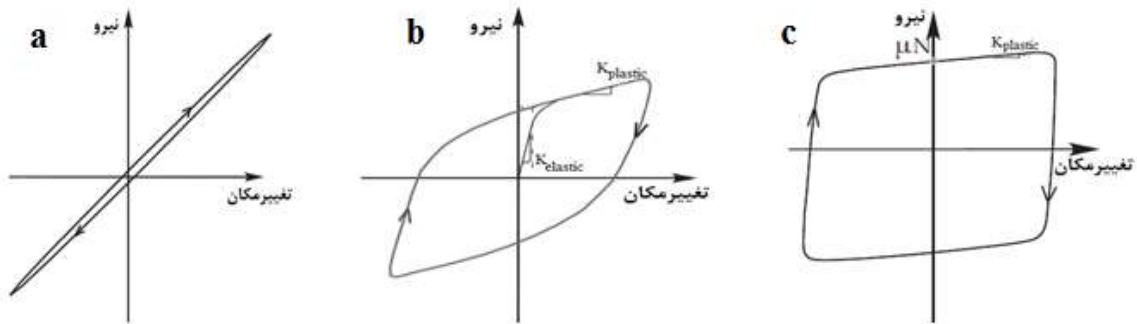
۲-۲- جداگرهای لاستیکی با هسته سربی:

جداگرهای با هسته سربی (LRB)، که در گروه جداگرهای الاستومری هستند. این جداگرها، مشابه جداگرهای لاستیکی با میرایی پایین بوده اما دارای یک یا چند هسته سربی هستند. صفحات فولادی به کار رفته در این سیستم سبب تغییر شکل هسته سربی در برش می‌شوند. از آنجائی که، سختی و میرایی موثر جداگرهای با هسته سربی وابسته به مقدار جابجایی آن است، بنابراین باید تغییر مکان متناظر با مقدار میرایی لازم مشخص شود [۴]. نمودار نیرو- تغییر مکان تقریباً دو-خطی نشیمن‌های لاستیکی با هسته سربی در شکل ۳ نشان داده شده است.

۲-۳- جداگرهای پاندولی اصطکاکی:

سیستم پاندولی اصطکاکی (FPS)، که در گروه سیستم‌های جداسازی بر پایه‌ی لغزش هستند. این سیستم به وسیله هندسه خاص خود، عمل لغزش و نیروی بازگرداننده را فراهم می‌کند. سیستم‌های پاندولی اصطکاکی دارای یک مکانیزم لغزاننده‌ی مفصلی هستند که بر روی یک سطح کرووی از جنس فولاد ضد زنگ می‌لغزد. سطحی از این قسمت لغزاننده مفصلی که در تماس با سطح کرووی است، با موادی با اصطکاک کم پوشیده

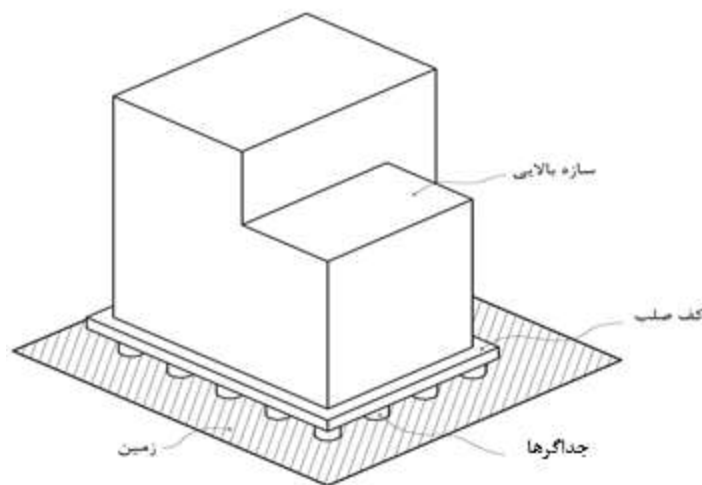
شده است. سطح دیگر این لغزاننده نیز کروی بوده و با لایه‌ای از فولاد ضد زنگ پوشیده شده است. با حرکت مکانیزم لغزاننده از روی سطح کروی، جرم موجود از روی آن بلند شده که این امر سبب ایجاد نیروی بازگرداننده در سیستم می‌شود. اصطکاک بین سطح لغزاننده مفصلی و سطح کروی نیز سبب ایجاد میرایی در جداگرها می‌شود. سختی موثر جداگر و دوره تناوب سازه جداسازی شده به وسیله شعاع انحناى سطح محدب کنترل می‌شود. نمودار نیرو- تغییر مکان سیستم پاندولی اصطکاکی در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳: نمودار نیرو- تغییر مکان جداگرهای (a) LDR، (b) LRB و (c) FPS

۳- تعریف مسئله

برای مطالعه عددی از یک ساختمان ۸ طبقه با قاب مهاربندی شده فولادی به نام ساختمان معیار استفاده می‌شود [۳]. طبقات اول تا ششم دارای پلان L شکل بوده، حال آنکه طبقات بالایی پلان مستطیلی دارند. سازه‌ی بالایی روی یک کف صلب بتنی قرار گرفته، که توسط یک لایه جداساز از زمین جدا شده است. لایه‌ی جداسازی شده شامل ۹۲ جداگر با سیستم‌های متنوع جداسازی می‌باشد. شکل ۴، این سازه معیار را نشان می‌دهد.



شکل ۴: نمایی شماتیک از سازه معیار استفاده شده در این پژوهش [۳]

برای توصیف رفتار غیرخطی جداگرهای LRB و FPS عمدتاً از مدل بوک-ون استفاده می‌شود. مدل بوک-ون، یک معادله دیفرانسیل غیرخطی است که ابتدا توسط Bouc [۴] مطرح گردید و سپس بوسیله Wen [۵] توسعه داده شد و عمومی گردید. این مدل، برای بیان ریاضی سیستم‌هایی که دارای رفتار غیرخطی هیستریزس‌اند، استفاده می‌شود. در این مسئله معیار، نیروی تولید شده توسط جداگر LRB و جداگر FPS متناظراً به صورت معادلات ۱ و ۲ می‌باشد.

$$f_x = k_p U_x + c_v \dot{U}_x + (k_e - k_p) U^y z_x \quad (1)$$

$$f_x = k_p U_x + \mu N z_x \quad (2)$$

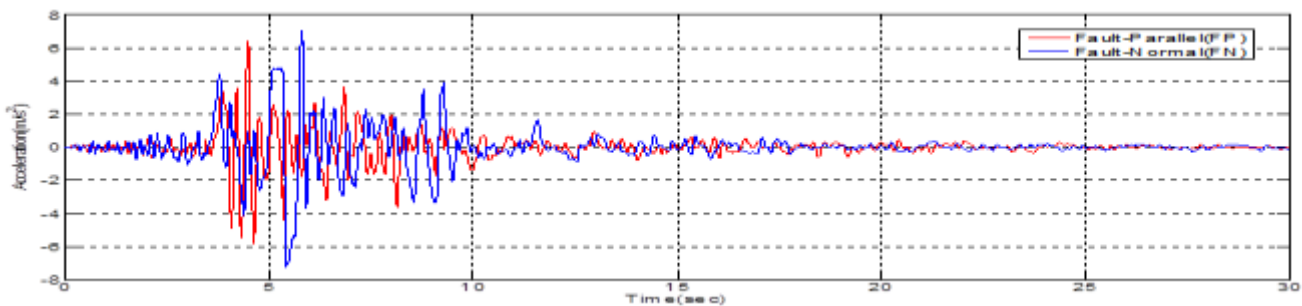
k_p سختی پس از تسلیم، k_e سختی پیش از تسلیم، c_v ضریب میرایی ویسکوز، U^y جابجایی تسلیم، μ ضریب اصطکاک، N نیروی عمودی متوسط و U_x تغییر مکان جداگر هستند. z_x متغیر هیستریزس بوک-ون، مطابق معادله ۳ می‌باشد.

$$\dot{z} = A\dot{x} - \beta|\dot{x}|z^{n-1}z - \gamma\dot{x}|z|^n \quad (3)$$

A ، β ، γ و n کمیت‌های بدون بعدی هستند که شکل چرخه هیستریزس را مشخص می‌کنند.

۴- تأثیر نیروی غیرخطی جداگرها بر مشخصات سازه ای

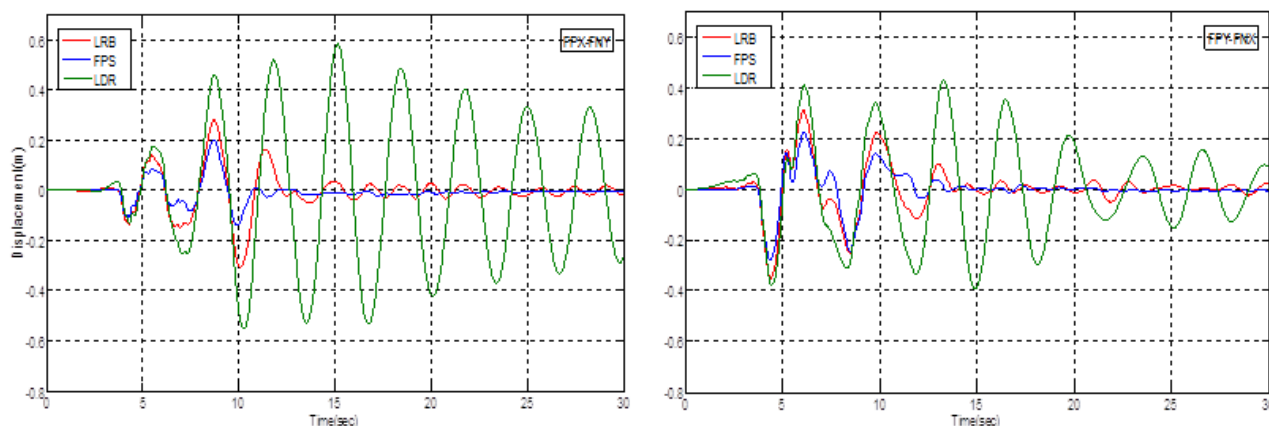
به منظور بررسی تأثیر نیروی غیرخطی جداگرها روی پارامترهای سازه ای، سازه معیار با سه ترکیب مختلف از سیستم‌های جداسازی مورد مقایسه قرار داده شده است. برای مطالعه جداگرهای غیرخطی در کف سازه جداشده، از ترکیب ۳۱ جداگرخطی و ۶۱ جداگر غیرخطی [۳]، (LRB و FPS به صورت جداگانه) استفاده می‌شود. به عنوان تحریک ورودی به جداگرها از رکوردهای متعلق به ایستگاه‌های شتاب نگاشت در شهرهای Newhall، Elcentro، Rinaldi، Sylmar در آمریکا، Jiji و Kobe در ژاپن و Erzinkan در ترکیه استفاده می‌شود که همگی از رکوردهای نزدیک گسل هستند. رکوردهای مذکور در دو امتداد افقی زلزله ارائه شده‌اند، بنابراین عملاً ۱۴ رکورد متمایز برای مقایسه ایجاد می‌شود. برای مقایسه میان سه نوع جداگر مدنظر، منحنی‌های تاریخچه زمانی و جداول حاوی مقادیر حداکثر پارامترهای سازه ای ارائه می‌شود. در شکل ۵ منحنی‌های تاریخچه زمانی برای رکورد Newhall نشان داده شده‌اند.



شکل ۵: رکورد زلزله Newhall در دو امتداد موازی گسل و عمود بر گسل

۴-۱- تغییر مکان جداگر

منحنی تاریخچه زمانی تغییر مکان جداگر برای سه جداگر LRB، FPS و LDR به صورت شکل ۶ است. با توجه به شکل، تغییر مکان بوجود آمده در موقعیت جداگر برای دو جداگر غیرخطی به مراتب کمتر از جداگر خطی LDR است، که به دلیل حضور نیروی غیرخطی تولید شده توسط این جداگرها می باشد. در مقایسه دو جداگر LRB و FPS این مقدار برای جداگر FPS کمتر است. بنابراین از لحاظ مقایسه تغییر مکان کف سازه، جداگر FPS شرایط بهتری را تحت تحریک های نزدیک گسل نشان می دهد.



شکل ۶: منحنی تغییر مکان جداگرهای LRB، FPS و LDR تحت تحریک Newhall

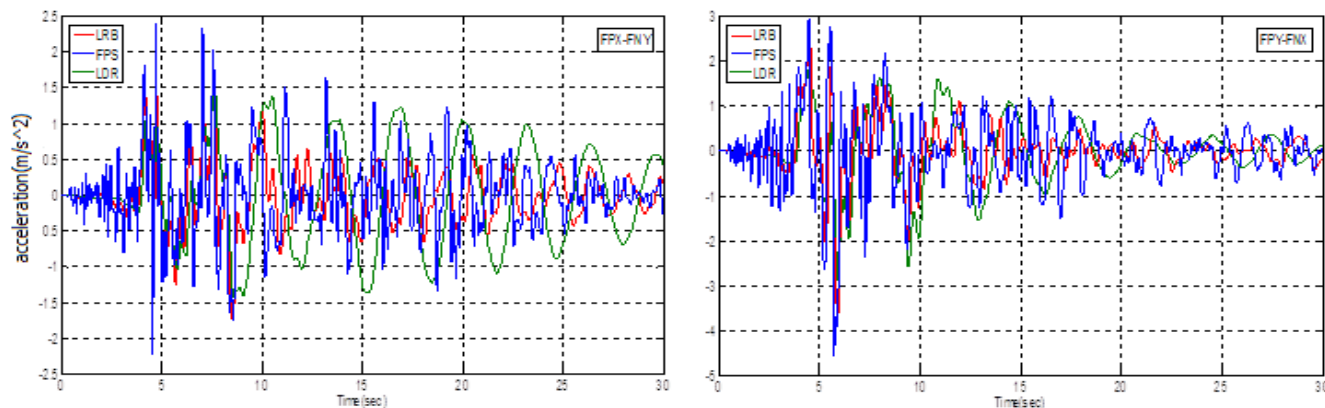
در شکل های نشان داده شده، FPX-FNY یعنی زلزله در راستای موازی گسل در جهت X ساختمان و زلزله در راستای عمود بر گسل در جهت Y ساختمان وارد می شود و بالعکس.

جدول ۱: مقایسه مقدار حداکثر تغییر مکان جداگرها تحت تحریک های متفاوت (مقادیر به متر)

		جداگر LDR	جداگر FPS	جداگر LRB
Newhall	FPX-FNY	۰,۵۸	۰,۲۰	۰,۳۱
	FNX-FPY	۰,۴۳	۰,۲۸	۰,۳۶
Sylmar	FPX-FNY	۰,۵۹	۰,۳۷	۰,۵۲
	FNX-FPY	۰,۷۶	۰,۴۸	۰,۶۰
El Centro	FPX-FNY	۰,۴۸	۰,۱۱	۰,۱۸
	FNX-FPY	۰,۲۶	۰,۰۷	۰,۱۷
Rinaldi	FPX-FNY	۰,۳۳	۰,۲۹	۰,۲۷
	FNX-FPY	۰,۷۱	۰,۴۳	۰,۵۱
Kobe	FPX-FNY	۰,۶۴	۰,۲۰	۰,۲۸
	FNX-FPY	۰,۶۰	۰,۲۸	۰,۳۴
Jiji	FPX-FNY	۰,۹۷	۰,۹۹	۱,۰۰
	FNX-FPY	۱,۵۵	۱,۱۸	۱,۳۷
Erzinkhan	FPX-FNY	۰,۲۹	۰,۵۶	۰,۲۰
	FNX-FPY	۰,۹۶	۰,۵۶	۰,۷۳

۲-۴- شتاب سازه ای

کاهش شتاب باعث کاهش نیروی القایی به المان های سازه ای شده و مقاومت سازه را در طول زلزله افزایش می دهد. با توجه به شکل ۷، تاریخچه زمانی شتاب سازه ای در حضور جداگر خطی LDR در هر دو راستای مورد مطالعه به مراتب بیشتر از جداگرهای غیرخطی است و تنها مزیت آن، کاهش شتاب حداکثر سازه مطابق جدول ۲ است. در مقایسه میان جداگرهای غیرخطی، جداگر LRB تاریخچه زمانی شتاب کمتری نسبت به جداگر FPS را نشان می دهد که این نتیجه برای مقدار حداکثر آن نیز صادق است (جدول ۲). شتاب سازه ای برای طبقه هشتم ساختمان مورد مطالعه قرار گرفته است.



شکل ۷: منحنی شتاب سازه ای طبقه ۸ با حضور جداگرهای LDR، LRB و FPS تحت تحریک Newhall

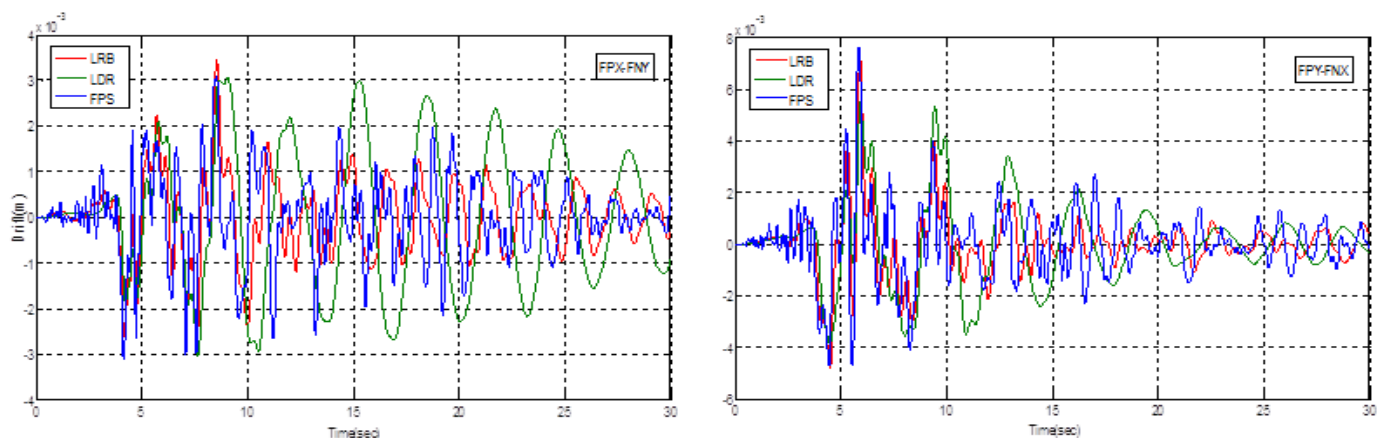
مطابق جدول ۲، مقدار حداکثر شتاب سازه ای هنگامی که از جداگر LDR در پایه ساختمان استفاده می شود در مقایسه با شتاب سازه ای وقتی که از جداگرهای LRB و FPS استفاده می شود، کمتر است.

جدول ۲: مقایسه مقدار حداکثر شتاب های سازه ای طبقه ۸ در حضور جداگرهای مدنظر تحت تحریک های متفاوت (مقادیر به m/s^2)

		جداگر LDR	جداگر FPS	جداگر LRB
Newhall	FPX-FNY	۱,۴۴	۲,۴۰	۱,۷۲
	FPY-FNX	۲,۸۹	۴,۵۵	۳,۸
Sylmar	FPX-FNY	۳,۰۳	۳,۲۹	۲,۹۷
	FPY-FNX	۳,۵۶	۳,۲۱	۳,۳۹
El Centro	FPX-FNY	۱,۳۲	۲,۱۹	۱,۴۷
	FPY-FNX	۰,۹۴	۳,۶۷	۱,۷۵
Rinaldi	FPX-FNY	۲,۵۲	۲,۴۳	۲,۲۵
	FPY-FNX	۳,۴۵	۳,۷۰	۳,۳۶
Kobe	FPX-FNY	۱,۸۷	۲,۷۵	۲,۳۹
	FPY-FNX	۲,۰۱	۳,۶۱	۲,۱۸
Jiji	FPX-FNY	۳,۱۰	۳,۱۷	۳,۰۴
	FPY-FNX	۵,۸۷	۴,۸۴	۵,۷۵
Erzinkhan	FPX-FNY	۲,۳۸	۲,۱۱	۲,۰۸
	FPY-FNX	۲,۹۷	۳,۱۳	۲,۹۷

۳-۴- دریفت میان طبقه

مطابق با شکل ۸، تاریخچه زمانی دریفت میان طبقه طبقات ۷-۸ برای ساختمان جدا شده پایه با جداگرهای غیرخطی نسبت به جداگرهای خطی کاهش قابل توجهی را نشان می دهد و این یعنی سازه جدا شده با جداگر غیرخطی با کاهش مناسب دریفت میان طبقه، المان ها و اعضای سازه ای را از خسارت های محتمل زلزله محفوظ می دارد.



شکل ۸: منحنی دریفت میان طبقه، طبقات ۷-۸ با حضور جداگرهای LDR، FPS و LRB تحت تحریک Newhall

جدول ۳: مقایسه مقدار حداکثر دریفت میان طبقه، طبقات ۷-۸ در حضور جداگرهای مدنظر تحت تحریک های متفاوت (مقادیر به میلیمتر)

		جداگر LDR	جداگر FPS	جداگر LRB
Newhall	FPX-FNY	۳,۰۶	۳,۱۲	۳,۴۴
	FNX-FPY	۵,۵۲	۷,۶۴	۷,۲۰
Sylmar	FPX-FNY	۶,۴۸	۵,۶۱	۶,۲۷
	FNX-FPY	۷,۷۲	۶,۲۲	۷,۱۹
El Centro	FPX-FNY	۲,۶۸	۴,۰۰	۲,۷۶
	FNX-FPY	۱,۹۵	۵,۲۶	۲,۸۲
Rinaldi	FPX-FNY	۵,۵۶	۴,۸۳	۴,۷۹
	FNX-FPY	۷,۰۴	۶,۴۷	۶,۹۱
Kobe	FPX-FNY	۴,۰۲	۴,۶۳	۳,۹۶
	FNX-FPY	۴,۱۴	۴,۹۴	۴,۱۰
Jiji	FPX-FNY	۷,۰۰	۶,۲۲	۶,۷۱
	FNX-FPY	۱۲,۹۷	۱۰,۵۴	۱۲,۴۴
Erzinkhan	FPX-FNY	۵,۴۴	۴,۵۵	۴,۵۸
	FNX-FPY	۶,۵۹	۶,۳۱	۶,۲۸

۵- نشریه ۵۲۳

با توجه به نشریه ۵۲۳ [۷]، با نرم تر شدن جداگرها، تغییر مکان نسبی بین زمین و سازه افزایش می یابد. به این ترتیب تغییر مکان نسبی تراز جداگر و پاسخ شتاب سازه همواره با هم نسبت عکس دارند. در این شرایط با انتخاب ساز و کار استهلاک انرژی مناسب در سامانه جداسازی لرزه ای می توان هم به کاهش مورد نیاز در شتاب مجموعه دست پیدا کرد و هم میزان تغییر مکان نسبی ذکر شده را در محدوده مورد نظر طراحی نگاه داشت. با توجه به مطلب ذکر شده در بالا از این نشریه، جداگرهای LDR تغییر شکل های بزرگتری را نسبت به جداگرهای غیرخطی FPS و LRB تحمل می کنند. که این، به دلیل حضور نیروهای غیر خطی تولید شده توسط آنها در پایه ساختمان است. از سوی دیگر با سخت تر شدن سیستم جداسازی، ارتعاش انتقال یافته از سوی زلزله به سازه فوقانی افزایش می یابد که باعث افزایش شتاب طبقات بالایی می شود. باتوجه به نتیجه گرفته شده از شکل ۷، این مطلب از نشریه ۵۲۳ فقط برای مقادیر حداکثر شتاب صادق است. در حالیکه شتاب سازه در حضور جداگرهای LRB و FPS در طول تاریخچه زمانی به مراتب از مقدار متناظر شان با حضور جداگر LDR کمتر بدست آمده است.

۶- نتیجه گیری

استفاده از جداگرها باعث افزایش دوره تناوب اصلی سازه شده و در نتیجه ارتعاش وارد به سازه فوقانی را که شامل شتاب و دررفت های میان طبقه می باشد، کاهش می دهد. رفتار جداگرها به دو گروه خطی و غیرخطی تقسیم می شود. تمرکز این پژوهش به مقایسه رفتار جداگرهای لاستیکی با میرایی پایین (LDR) به عنوان یک جداگر خطی با جداگرهای پاندولی اصطکاکی (FPS) و لاستیکی با هسته سربی (LRB) به عنوان جداگرهای غیرخطی و مشخص کردن تاثیر نیروی غیرخطی آن ها روی پارامترهای سازه ای معطوف شده است. برای این منظور از ساختمان معیار ۸ طبقه استفاده شده است. تحریک های ورودی به این ساختمان برای مطالعه عددی از نوع نزدیک گسل می باشند. با توجه به منحنی های رسم شده و جداول، مقدار حداکثر جابجایی جداگر LDR به علت سختی کمتر نسبت به جداگرهای غیرخطی بیشتر است. همچنین مقدار حداکثر شتاب سازه ای و دررفت میان طبقه برای این جداگر نسبت به مقادیر متناظر آن برای جداگرهای غیرخطی کمتر می باشد. این نتیجه مطابق با مطلب ارائه شده در نشریه ۵۲۳ است. اما از سویی منحنی های تاریخچه زمانی نشان می دهند که شتاب و دررفت میان طبقه در بازه زمانی یک زلزله برای جداگرهای غیر خطی FPS و LRB نسبت به جداگر LDR کمتر است. و چون این جداگرها، تغییر شکل های به مراتب کمتری را نسبت به جداگر LDR تجربه می کنند استفاده از آن ها ارجحیت پیدا می کنند. در بین جداگرهای غیرخطی مورد مطالعه در این پژوهش جداگر LRB تعادل مناسب را میان شتاب سازه ای و تغییر مکان پایه برقرار کرده است که مطلوب است.

مراجع

- [1] A.K.Chopra (1995), *Dynamics of Structures, Theory and Applications to Earthquake Engineering*, Printicehall Englewood Cliffs, Newjersey.
- [2] F. Naeim, and J.M. Kelly (1999), *Design of Seismic Isolated Structures: From Theory to Practice*, John Wiley & Sons.
- [3] Narasimhan S, Nagarajaiah S, Gavin H, Johnson EA. Smart base isolated benchmark building part I: problem definition. *Journal of Structural Control and Health Monitoring* 2006; 13(2-3):573-588.
- [4] R.Bouc, A mathematica model for hysteresis, *Acustica* 21(1971),16 - 25

[5] Y.J.Park, Y.K.Wen and A.H-s Ang, Random vibration of hysteretic systems under bi- directional Ground motions, *Earthquake engineering and structural dynamics*, (1986), 543 – 557

[۶] راهنمای طراحی و اجرای سیستم های جداساز لرزه ای در ساختمان ها، نشریه شماره ۵۲۳، ۱۳۸۹