

مطالعه عددی کاربرد میراگر فلزی لوزی شکل در تقویت لرزه ای قاب های فولادی میان مرتبه

سید مهدی زهرایی^{۱*}، هرمز امیرزاده شمس^۲

۱- استادیار قطب علمی مهندسی و مدیریت زیرساخت ها، دانشکده عمران، دانشگاه تهران، تهران، ایران
۲- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه دانشکده فنی مهندسی دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکز، تهران، ایران

mzahrai@ut.ac.ir

(دریافت مقاله: خرداد ۱۳۸۷، پذیرش مقاله: آذر ۱۳۸۷)

چکیده

اخیرا کنترل پاسخ سازه ها از طریق افزایش قابلیت جذب و استهلاک انرژی ورودی در هنگام زلزله از محبوبیت خاصی برخوردار شده است. در میان میراگرهای مختلفی که تا کنون به این منظور به کار گرفته شده اند، میراگرهای جاری شونده فولادی گروه ADAS به علت حلقه هیستریزیس کامل و پایداری که دارند و با توجه برتری نسبی آن ها از لحاظ طراحی و کاربردها توجه بسیاری از محققین را به خود معطوف کرده اند. در طرح لوزی شکل این گروه میراگر، علاوه بر اینکه از تاثیر کیفیت جوش های اتصال بر رفتار چرخه ای آن ها کاسته شده در صورت به کارگیری فولاد با مقاومت پایین در ساختمان، بدون تمرکز تنش قادر به تحمل سیکل های بارگذاری زیادی خواهند بود.

در این مقاله ضمن مروری بر انواع میراگرهای موجود، به بررسی عددی افزودن میراگر فلزی لوزی شکل بر پاسخ لرزه ای قاب های فولادی که نیاز به بهسازی داشتند توسط نرم افزار SAP2000 پرداخته شده است. نتایج به دست آمده از تحلیل تاریخچه زمانی غیر خطی بر روی قاب خمشی پنج طبقه بیانگر ۴۰٪ کاهش تغییر مکان بام و (۱۴۳٪-۵۳٪) افزایش در میزان بیشینه شتاب زلزله قابل تحمل و (۵۸٪-۳۸٪) جذب و استهلاک انرژی ورودی زلزله بود. جایگزینی مهارندهای معمولی موجود با سیستم مهاربند- میراگر لوزی در قاب ساده هفت طبقه، موجب کاهش برش پایه تا ۷۲٪، افزایش (۱۷۵٪-۵۴٪) در میزان بیشینه شتاب قابل تحمل، افزایش میرایی معادل موثر تا ۲۰٪ و (۷۴٪-۶۵٪) جذب و استهلاک انرژی ورودی زلزله شد. به طور کلی با استفاده از مقاوم سازی مزبور، عملکرد سازه در هر دو دسته قاب از سطح عملکرد "فروپاشی" به "استفاده بی وقفه" بهبود یافت.

واژگان کلیدی: ساختمان های فولادی، میراگر فلزی لوزی، سطح عملکرد سازه، برش پایه، استهلاک انرژی.

مقدمه

در آیین نامه هایی که مطابق طراحی بر اساس مقاومت نگاشته شده اند، هدف تعیین حداقل ضوابط برای طرح و اجرای ساختمان ها در برابر اثرهای ناشی از زلزله بوده و اصولا به گونه ای تدوین شده اند که ساختمان ها در برابر زلزله های خفیف و متوسط بدون وارد شدن آسیب عمده سازه ای و در برابر زلزله های شدید بدون فرو ریختن، قادر به مقاومت باشند. در سیستم های متداول مقاوم در برابر زلزله، به اعضای سازه ای اجازه داده می شود که با تغییر شکل های غیر الاستیک، انرژی جذب شده را مستهلک کنند. در قاب های خمشی برای دستیابی به جذب و استهلاک انرژی قابل توجهی که هنگام وقوع زلزله های متوسط به بالا وارد سازه می شود، تغییر مکان های نسبی زیادی لازم است که نتیجه آن علاوه بر خسارت ناشی از آسیب در اعضای غیر سازه ای، تشدید تنش های ثانویه و آسیب اعضاء سازه ای و سرانجام فروپاشی سازه می تواند باشد. مهاربندی قاب ها نیز موجب افزایش قابل توجه سختی جانبی همراه با افزایش انرژی ورودی زلزله به سازه و در نتیجه بالا رفتن نیاز لرزه ای اعضای سازه ای می شود. ضمن این که، بادبندهای همگرا تحت زلزله های شدید رفتار لرزه ای مناسبی ندارند و در به کارگیری مهاربندی واگرا نیز علاوه بر نیاز به تقویت بخش تیر رابط، پس از هر زلزله نیاز به ترمیم آسیب های تیرها و کف های ساختمان محتمل است. علاوه بر آن می بایست به این مطلب هم توجه داشت که جبران خسارت های وارده پس از هر زلزله شدید معمولا بسیار هزینه بر بوده و از طرفی ممکن است مدت زمان زیادی لازم باشد تا اینکه سازه قابلیت بهره برداری مجدد را پیدا کند. این مطلب حتی اگر از لحاظ اقتصادی توجیه پذیر باشد برای جلوگیری از تخریب سازه هایی که کارکردشان پس از وقوع زلزله حیاتی است، منطقی به نظر نمی رسد.

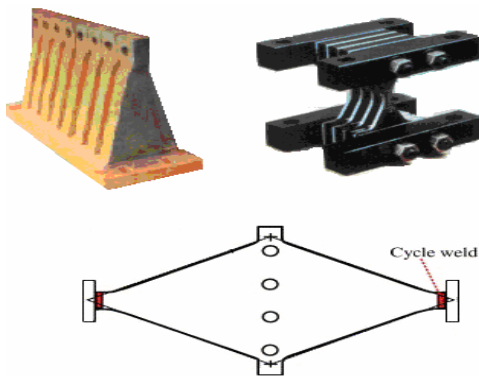
در بحث تقویت لرزه ای ساختمان های موجود به کارگیری روش هایی چون عملا غیر ممکن و یا مستلزم هزینه های هنگفت است. از طرفی استفاده از مهاربندی های همگرا و واگرا نیز همان طور که قبلا ذکر شد، می تواند با مشکلات سازه ای و معماری همراه باشد. افزودن بادبند موجب ازدیاد نیروهای محوری ستون ها به

خصوص در طبقات پایینی سازه می شود. با افزایش تنش محوری در ستون ها، رفتار لرزه ای از حالت شکل پذیر خارج شده و اصطلاحاً "کنترل شونده توسط نیرو" خواهد بود. به این ترتیب مناسب ترین روش جهت مقاوم سازی و یا بهسازی لرزه ای ساختمان های موجود، تقویت مشخصات جذب انرژی آن ها و نیز متمرکز نمودن آسیب ها در بخش خاصی از سازه به نظر می رسد. به طور کلی میرایی خاصیتی از ماده یا سیستم تحت تنش سیکنی است که موجب استهلاک انرژی می شود و کنترل ارتعاش با افزودن میرایی در سازه یکی از موثرترین راهکارهای مقاوم سازی و بهسازی لرزه ای بشمار می آید. دستگاه های خاصی برای این منظور طراحی و ساخته شده که به میراگر معروف هستند و قادر هستند مقدار میرایی سازه را گاهی تا ۵۰ درصد میرایی بحرانی افزایش دهند. هنگام زلزله های شدید، این دستگاه ها مثل "فیوز" سطح نیروهای ورودی زلزله را محدود کرده و به این ترتیب اعضای سازه ای اصلی در حالت ارتجاعی باقی مانده (و یا حداقل تغییر شکل های غیر الاستیک در آن ها رخ می دهد). از طرفی امکان تعویض آن ها با حداقل هزینه و صرف زمان کم میسر است. در این مقاله ضمن مروری بر انواع میراگرهای موجود، به بررسی عددی افزودن میراگر فلزی لوزی شکل بر پاسخ لرزه ای قاب های فولادی که نیاز به بهسازی داشتند پرداخته شده است. برای این منظور سطح عملکرد سازه به همراه تغییر مکان طبقات و برش پایه قاب، قبل و پس از افزوده شدن میراگر مقایسه شده اند.

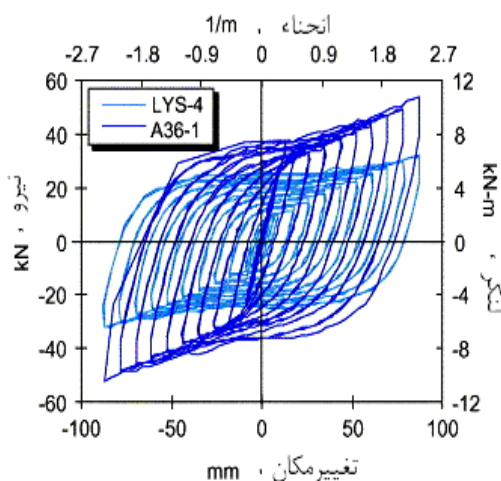
انواع میراگر

به طور کلی میراگرها را می توان به سه دسته تقسیم نمود: میراگرهای وابسته به تغییر مکان، میراگرهای وابسته به سرعت و گروه سوم که میراگرهای "غیره" نامیده می شوند [۱]. عملکرد میراگرهای دسته اول به تغییر مکان نسبی بین دو انتهای دستگاه بستگی داشته و به فرکانس ارتعاش سازه وابسته نیستند. افزودن آن ها به قاب های سازه معمولا موجب افزایش میرایی و سختی جانبی می شود. اگر چه این سختی افزایش یافته گاهی موجب افزایش برش پایه سازه خواهد شد، اما از آن جا که از تغییر مکان جانبی سازه کاسته شده، نیرو در اعضای خارج از

بر خلاف میراگرهای TADAS که جوشکاری و کیفیت آن می‌تواند بر خواص مکانیکی صفحات فولادی میراگر تاثیر گذاشته و یا به شکست ترد آن قبل از جذب کامل انرژی بیانجامد، چگونگی جوشکاری تاثیری بر رفتار لرزه‌ای آن‌ها ندارد. علاوه بر این میراگر معرفی شده از جنس فولاد با تنش تسلیم پایین بوده که به علت شکل پذیری بیشتر و خواص مکانیکی مناسب‌تر این نوع فولاد نسبت به فولادهای معمولی، مشکل شکست موضعی تحت بارهای سیکلی زلزله نیز مرتفع می‌گردد [۴]. این که میراگر از جنس فولاد با حد جاری شدن پایین، LYS، باشد موجب می‌شود تا امکان جذب و استهلاک نیروها در تنش‌های پایین‌تر و تا کرنش‌های بیشتر، نسبت به فولاد معمولی فراهم گردد (شکل ۲).



شکل ۱ - میراگر با صفحات X شکل، مثلث (TADAS) و لوزی شکل [۵]



شکل ۲ - منحنی هیستریزیس میراگر لوزی شکل در دو حالت با فولاد معمولی A36 و فولاد با حد جاری شدن پایین (LYS) [۴]

سیستم باربر جانبی کاهش می‌یابد. میراگرهای اصطکاکی و فلزی در این دسته قرار می‌گیرند. دسته دوم میراگرها بر اساس تفاوت در سرعت نسبی دو انتهای خود عمل می‌کنند و عموماً آن‌ها را میراگرهای ویسکوز می‌نامند. تغییر مکان نسبی تاثیری خاص بر عملکردشان ندارد و در شرایط معمولی سختی سازه را افزایش نمی‌دهند. البته میراگر ویسکوالاستیک که در این دسته جای دارد به خاطر اجزاء الاستیک موجود در ساختارش سختی را نیز همچون میرایی افزایش می‌دهد. دسته سوم را سایر مستهلک کننده های انرژی که گاهاً رفتارشان ترکیبی از رفتار دو گروه قبل می باشد تشکیل می‌دهند. رابطه نیرو - تغییر مکان - سرعت در این میراگرها مشابه هیچ کدام از دو دسته قبل نبوده و نیاز به مدل‌های کاملتری دارد.

در میان انواع میراگرهای موجود، استفاده از میراگرهای هیستریزیس فولادی نسبت به سایر میراگرها مزیت هایی دارد که از جمله عبارتند از :

۱- ساخت و نصب این نوع میراگر نسبت به انواع دیگر (مثل میراگرهای ویسکوز) ساده تر و ارزان تر می باشد. از طرفی بر خلاف میراگرهای ویسکوالاستیک عوامل محیطی بر رفتار آن‌ها تاثیری نداشته و در نتیجه مدل‌سازی آن‌ها نیز ساده تر است.

۲- بر خلاف میراگرهای ویسکوز، در هنگام بهره برداری نیاز به نگهداری نداشته و در نتیجه هزینه نهایی همان هزینه ساخت و نصب آن‌ها است. پس از وقوع زلزله های شدید نیز امکان تعویض آن‌ها با هزینه اندک وجود دارد.

۳- در صورت لزوم می توان براحتی رفتار دینامیکی آن‌ها را مطابق نیاز تغییر داد. این مهم با اضافه کردن و یا کاهش تعداد صفحات میراگر انجام می شود.

میراگرهای جاری شونده فولادی گروه ADAS از حلقه هیستریزیس کامل و پایداری برخوردار هستند. سایه و همکارانش در سال ۲۰۰۳ طرح میراگرهای لوزی شکل از این گروه را ارائه دادند [۴]. این میراگرها همانند دو میراگر TADAS هستند که از قسمت قاعده به هم متصل شده اند و به علت تقارن در شکل و نحوه اتصال صفحات آن به هم، شرایط گیرداری در مرکز این صفحه ها بدون نیاز به جوش فراهم آمده است (شکل ۱). در نتیجه

مشخصات سازه های مورد مطالعه و شتاب

نگاشت‌های اعمال شده

برای بررسی تاثیر افزودن میراگر هیستریزیس لوزی شکل بر رفتار لرزه ای سازه های فولادی تصمیم گرفته شد به دو سازه فرضی که نیاز به مقاوم سازی دارند قطعات میراگر افزوده شود و سپس پاسخ‌های آن ها با هم مقایسه شوند. سازه های مورد مطالعه عبارتند از یک قاب خمشی معمولی ۵ طبقه و یک قاب مفصلی ۷ طبقه به همراه مهاربندی شورون که بر اساس ویرایش اول استاندارد ۲۸۰۰ تحلیل و طراحی شده اند. قاب ها کاربری مسکونی (درجه اهمیت متوسط) داشته و در منطقه ای با خطر نسبی زلزله بسیار زیاد و بر روی خاک نوع II قرار دارند. بار مرده طبقات و بام بترتیب ۵۴۰ و ۶۰۰ کیلوگرم بر متر مربع و بار زنده طبقات و بام به ترتیب ۲۰۰ و ۱۵۰ کیلوگرم بر متر مربع بوده که بر اساس مبحث ششم مقررات ملی ساختمان تعیین شده اند. مشخصات اعضای سازه ها در جدول های ۱ و ۲ آمده است.

پارامترهای مدل سازی و معیارهای پذیرش مفاصل پلاستیک اعضا بر اساس دستورالعمل بهسازی لرزه ای ساختمان های موجود و FEMA356 در نظر گرفته شده اند (جدول ۳) [۵]. این پارامترها تعیین کننده مقدار مجاز نسبت نیرو - تغییرمکان (و یا لنگر- چرخش) به مقدار تسلیم متناظر، برای سطوح مختلف عملکرد سازه ای بوده و در شکل ۳ نمایش داده شده اند. در این شکل IO معرف سطح عملکرد استفاده بیوقفه، LS معرف سطح عملکرد ایمنی جانی، CP معرف آستانه فروپاشی، D مرحله خطر و نهایتا E شکست المان است. آنالیز سازه ها به صورت تاریخچه زمانی غیر خطی انجام گرفته است. برای این منظور از چهار شتاب نگاشت مختلف استفاده شده است که صرفا برای مقایسه حالات، مبنای هم پایه کردن آن ها یکسان کردن بیشینه شتاب به ۰/۳۵g بوده است. شتاب نگاشت‌های مورد استفاده در این تحلیل‌ها عبارتند از:

۱- زلزله طیس با بیشینه شتاب ۰/۹۳۳g

۲- زلزله Newhall با بیشینه شتاب ۰/۵۸۴g

۳- زلزله Sylmar با بیشینه شتاب ۰/۸۴۲g

۴- زلزله Array با بیشینه شتاب ۰/۳۷۵g

مدت زمان زلزله در تحلیل ها برای زلزله Array، ۳۹ ثانیه و در سایر موارد ۲۵ ثانیه منظور شده است. تحلیل‌ها بر اساس گام زمانی ۰/۰۲ ثانیه انجام شده است اما نتایج در هر ۰/۱ ثانیه ذخیره گشته اند.

جدول ۱ - اعضای سازه ای در قاب خمشی ۵ طبقه

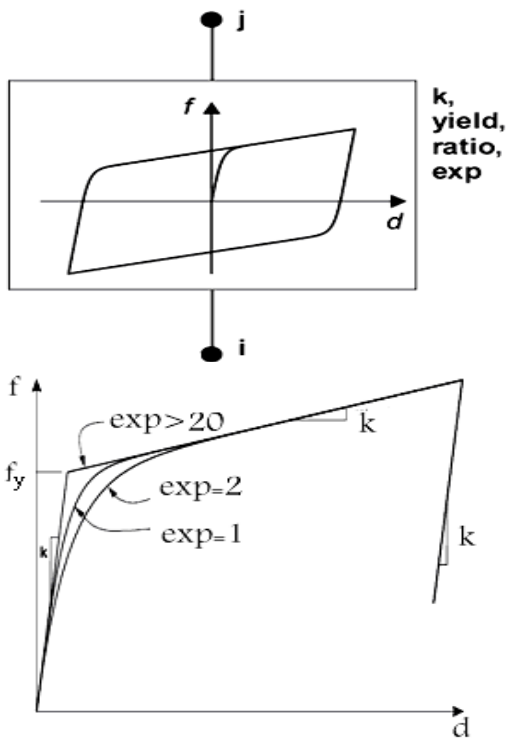
طبقه	اعضا				
	۱	۲	۳	۴	۵
تیرها	IPE 360	IPE 360	IPE 330	IPE 330	IPE 330
ستون‌های میانی	IPB 240	IPB 240	IPB 220	IPB 180	IPB 180
ستون‌های کناری	IPB 220	IPB 200	IPB 200	IPB 180	IPB 180

جدول ۲ - اعضای سازه ای در قاب مفصلی ۷ طبقه

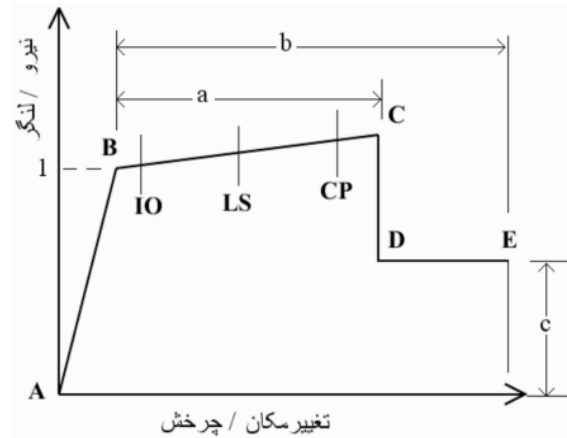
طبقه	مهاربندها	ستون‌های کناری	تیرها
۱	2L120X12/6	IPB180	IPE400
۲	2L120X12/6	IPB180	IPE400
۳	2L120X10/6	IPB160	IPE400
۴	2L120X10/6	IPB160	IPE400
۵	2L120X10/6	IPB140	IPE400
۶	2L100X10/10	IPB140	IPE400
۷	2L100X10/10	IPB140	IPE400

طبقه	ستون‌های میانی در دهانه بادبندی	سایر ستون‌ها
۱	IPB280	IPB260
۲	IPB260	IPB240
۳	IPB240	IPB220
۴	IPB200	IPB200
۵	IPB180	IPB180
۶	IPB160	IPB160
۷	IPB140	IPB140

رفتار سخت شوندگی ایزوتروپیک نیز اهمیت داشته و می‌بایست در مدل **wen** وارد شود.



شکل ۴ - نمایش مدل پلاستیک **wen** و پارامترهای تعیین کننده چرخه هیستریزیس آن



شکل ۳ - پارامترهای مدل سازی و معیارهای پذیرش مفصل پلاستیک اعضا

جدول ۳ - پارامترهای مدل سازی و معیارهای پذیرش

پارامتر	a	b	c	IO	LS	CP
عضو						
تیرها	۹	۱۱	۰/۶	۱	۶	۸
ستون‌ها	۱	۱/۵	۰/۲	۰/۲۵	۰/۵	۰/۸
مهاربند کششی	۱۱	۱۲	۰/۸	۰/۲۵	۰/۷	۹
مهاربند فشاری	۰/۵	۹	۰/۲	۰/۲۵	۳/۵	۵

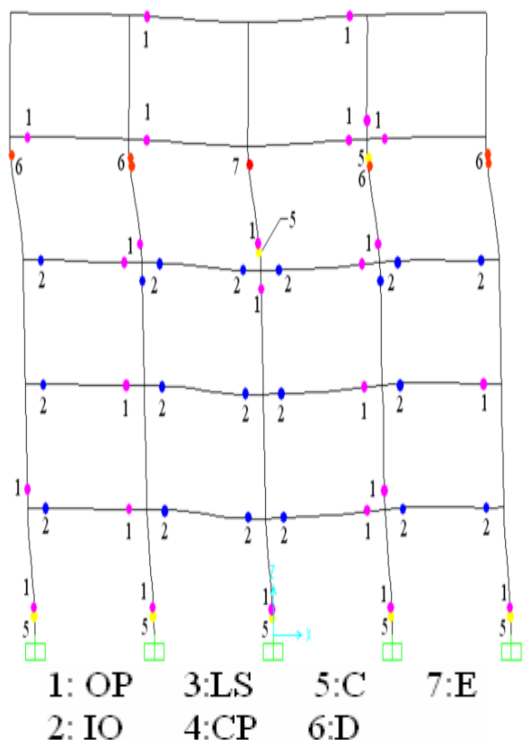
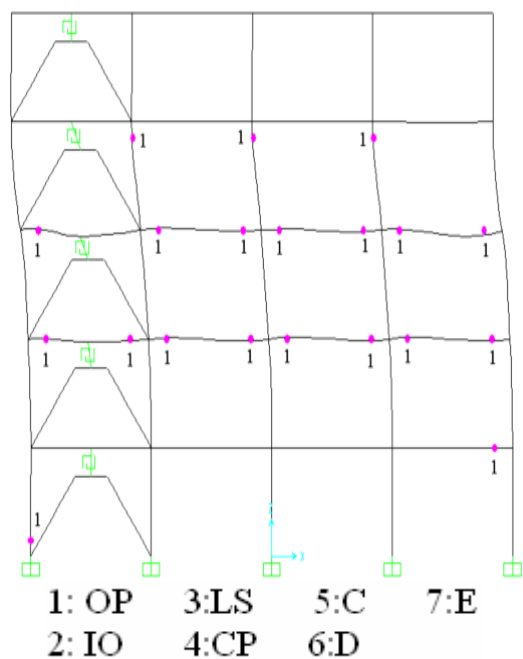
بررسی عددی تاثیر افزودن میراگر بر پاسخ لرزه ای سازه ها

قاب ۵ طبقه خمشی

نتیجه تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی با بیشینه شتاب $PGA=0.35g$ بر روی این قاب تحت دو زلزله **Array** و **Newhall** در شکل ۵ نشان داده شده است. زلزله طبس در سازه هیچ گونه مفصل پلاستیک را ایجاد نکرد اما تحت سایر زلزله ها در ستون‌های قاب مفصل‌های زرد رنگ (**C**، سطح عملکرد فروپاشی) و حتی نارنجی (**D**) و قرمز (**E**) تشکیل شده که معرف مرحله فروپاشی می‌باشد. تحت این سه زلزله به علت ناپایداری قاب‌ها، تحلیل در گام زمانی مشخص شده (هر گام معادل ۰/۱ ثانیه است) متوقف شد. برای بررسی میزان مقاومت این قاب اقدام به کاهش بیشینه شتاب این سه زلزله گردید که در نتیجه آن بیشینه شتاب قابل تحمل توسط قاب برای زلزله

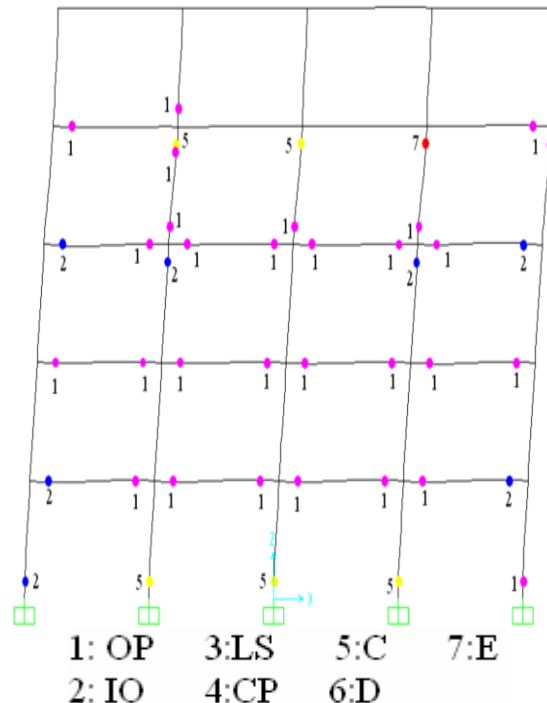
نحوه مدل سازی میراگر در برنامه **SAP2000**

برای مدل سازی میراگر از المان پیوند موجود در برنامه **SAP2000** با رفتار هیستریزیس **wen** استفاده شده است (شکل ۴). در این شکل **k** و **yield**، به ترتیب سختی الاستیک و نیروی تسلیم در میراگر می‌باشند. **ratio**، نسبت سختی پس از تسلیم میراگر به سختی الاستیک آن و **exp** متغیری با ویژگی هیستریزیس است. این مدل رفتار فولادهای معمولی (**A36**) را تحت بارگذاری چرخه ای به خوبی مدل سازی می‌کند اما برای تحلیل رفتار سخت شوندگی کرنش فولادهای با مقاومت پایین (**LYS**) از آنجا که تنها رفتار سخت شوندگی کینماتیک را در بر می‌گیرد مناسب نیست [۴]. برای مدل کردن رفتار هیستریزیس فولادهای **LYS** در نظر گرفتن

(b) زلزله $(+ / 3.5 \text{ g})$ Array (گام ۱۳۴)(c) قاب مقاوم سازی شده با میراگر لوزی
زلزله $(+ / 3.5 \text{ g})$ Newhall

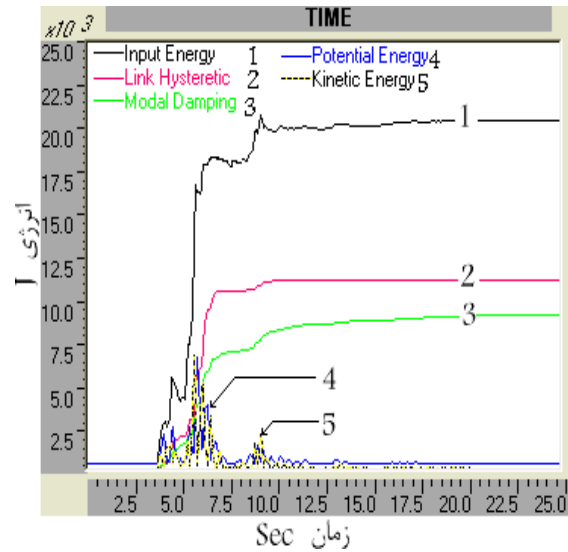
شکل ۵، چگونگی تشکیل مفاصل پلاستیک در قاب ۵ طبقه خمشی قبل و بعد از بهسازی با میراگر لوزی

زلزله $(+ / 3.5 \text{ g})$ Sylmar ، $\text{PGA} = 0.19 \text{ g}$ ، Newhall برای زلزله $(+ / 3.5 \text{ g})$ Array مشخص شد. از طرفی این مقدار برای زلزله طبرس تا $\text{PGA} = 0.65 \text{ g}$ افزایش یافت. برای بهسازی قاب از ۵ میراگر استفاده شد که در طبقات اول و دوم هر کدام از ۱۰ صفحه فولادی و در باقی طبقات از ۷ صفحه تشکیل شده است. چگونگی تشکیل مفاصل پلاستیک در قاب بهسازی شده تحت زلزله Newhall در قسمت (c) از شکل ۵ نشان داده شده است. با توجه به شکل، تغییر رنگ مفاصل های پلاستیک ستون ها از قرمز و نارنجی (D و E) به صورتی (OP) به منزله تغییر عملکرد سازه از سطح "فروپاشی" به "استفاده بی وقفه" می باشد. در شکل ۶ نمودار ترکیبات مختلف انرژی در مقایسه با هم آورده شده که سهم میراگرها (خط ۲) در جذب انرژی ورودی (خط ۱) به خوبی نمایان است. بیشینه این مقادیر در جدول ۴ آمده است. این جدول بیانگر جذب و استهلاک $57/53\%$ انرژی ورودی زلزله Newhall ، $40/78\%$ انرژی ورودی زلزله Array و 38% انرژی ورودی زلزله Sylmar توسط میراگرهای نصب شده در سازه است.

(a) زلزله $(+ / 3.5 \text{ g})$ Newhall (گام ۵۴)

جدول ۵ - تاثیر افزودن میراگر بر بیشینه تغییرمکان و تغییرمکان نسبی قاب ۵ طبقه تحت زلزله طبس

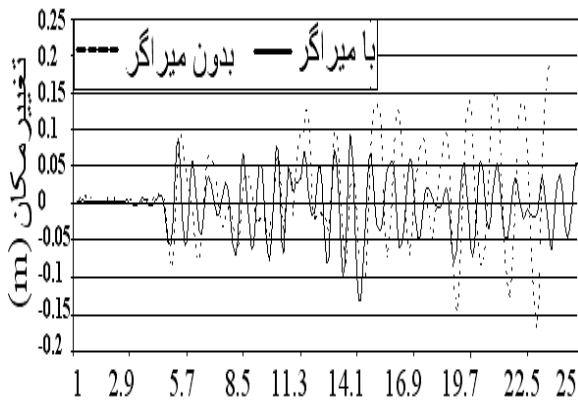
بارگذاری ۰/۶۵g		بدون میراگر	با میراگر	درصد کاهش
بیشینه تغییرمکان (m)	طبقه ۱	۰/۰۳۱	۰/۰۲۷	۱۲/۳۷
	طبقه ۲	۰/۰۶۹	۰/۰۵۹	۱۵/۴۳
	طبقه ۳	۰/۰۹۷	۰/۰۹۱	۶/۶
	طبقه ۴	۰/۲۰۵	۰/۱۱۹	۴۱/۹۵
	طبقه ۵	۰/۱۸۶	۰/۱۱۱	۴۰/۱
بیشینه تغییرمکان نسبی (m)	طبقه ۱	۰/۰۳۱	۰/۰۲۷	۱۲/۳۷
	طبقه ۲-۱	۰/۰۳۸	۰/۰۳۲	۱۶/۷
	طبقه ۳-۲	۰/۰۳۶	۰/۰۳۲	۱۲/۴۵
	طبقه ۴-۳	۰/۲۰۵	۰/۰۳۱	۸۴/۸
	طبقه ۵-۴	۰/۰۳۳	۰/۰۱۴	۵۶/۳



شکل ۶ - نمودار ترکیبات مختلف انرژی در قاب ۵ طبقه خمشی تحت زلزله Newhall

جدول ۴ - بیشینه ترکیبهای مختلف انرژی در سازه ۵ طبقه خمشی با میراگر لوزی شکل (PGA=۰/۳۵g)

نوع انرژی (kg-m)	Newhall	Array	Sylmar
ورودی	۲۰۸۱۵/۸	۱۸۵۲۹	۵۳۹۸/۸
میراگر	۱۱۱۵۰/۶	۷۴۴۳/۵	۲۰۵۴/۲
پتانسیل	۶۶۲۰/۲	۳۸۷۹/۹	۲۲۵۰/۵
جنبشی	۶۶۶۷/۹	۷/۲۴۳۶	۳۷۲۰/۸
میرایی ذاتی	۹۰۵۰/۶	۹۶۷۵/۵	۳۰۳۶/۲



شکل ۷ - تاریخچه تغییرمکان بام قاب ۵ طبقه خمشی تحت زلزله طبس (۰/۶۵ g)

جدول ۶، در صد افزایش تحمل بار جانبی قاب ۵ طبقه خمشی بهسازی شده با میراگر

زلزله	میزان بیشینه شتاب زلزله قابل تحمل توسط قاب		
	بدون میراگر	با میراگر	در صد افزایش
Newhall I	۰/۱۹ g	۰/۴۲g	۱۲۱٪
Sylmar	۰/۳ g	۰/۴۶g	۵۳/۳٪

جدول ۵ چگونگی کاهش بیشینه تغییرمکان و تغییرمکان نسبی طبقات قاب تحت زلزله طبس (۰/۶۵g) و شکل ۷ هم این نتیجه را بصورت گرافیکی نمایش می دهند. علت تغییر مکان های بزرگ در دو طبقه آخر به تسلیم رسیدن ستون ها در قاب بدون میراگر می باشد. با توجه به مقادیر آمده در دو جدول اخیر، افزودن میراگر به قاب باعث ارتقاء قابل توجه عملکرد لرزه ای سازه شده است. میزان افزایش تحمل بار جانبی قاب بهسازی شده با میراگر در جدول ۶ آمده است که با توجه به آن قاب بهسازی شده قدرت تحمل بیشینه شتاب بیش از ۰/۳۵g را نیز دارا می باشد.

ستون‌ها منتقل می شود. این مساله دلیلی برای ایجاد مفاصل پلاستیک در ستون‌های قاب اخیر است. شکل ۹ مقایسه انرژی کرنشی جذب شده توسط قاب مهاربندی شده و قاب همراه با میراگر می باشد. بیشینه انرژی کرنشی در قاب مهاربندی برابر $(\text{kg-m}) 4019/8$ و در قاب همراه با میراگر برابر $(\text{kg-m}) 1681/3$ می باشد و در نتیجه $58/17\%$ کاهش یافته است. شکل ۱۰ تاریخچه تغییرات برش پایه قاب تحت زلزله $(\text{kg-m}) 0/35$ Sylmar را در دو حالت قاب بهسازی شده با میراگر و قاب موجود (با بادبند ضعیف) نشان می دهد. برش پایه قاب با میراگر تقریباً 72% نسبت به قاب بادبندی شده کمتر است.

در شکل ۱۱ نمودار ترکیبات مختلف انرژی در مقایسه با هم آورده شده که سهم میراگرها (خط ۲) در جذب انرژی ورودی (خط ۱) در این جا نیز به خوبی نمایان است. این نمودار مربوط به زلزله **Array** بوده که بیشترین سهم در جذب و استهلاک انرژی ورودی را داشته است. بیشترین انرژی ورودی به قاب نیز مربوط به هم این زلزله است که به دلیل محتوای فرکانسی آن می تواند باشد. جدول ۸ مقادیر عددی انرژی سازه را در خود جای داده و با توجه به آن می توان نتیجه گرفت که میراگرها در بیشترین حالت، حدود 69% از انرژی ورودی در زلزله **Sylmar**، $73\%/74$ در زلزله **Array** و 65% در زلزله طبس را جذب کرده اند.

شکل ۱۲ طیف ظرفیت قاب ۷ طبقه با میراگر حاصل از تحلیل **Pushover** را نشان می دهد. با توجه به این شکل، مقدار میرایی معادل سازه در نقطه عملکرد (میرایی موثر) به $5/20\%$ رسیده است.

جدول ۷ - میزان مقاومت افزایش یافته قاب در اثر جایگزین شدن میراگر به جای مهاربند

زلزله	میزان باربری قاب بر اساس بیشینه شتاب زلزله PGA		
	بدون میراگر	با میراگر	درصد افزایش
Newhall	$0/20 \text{ g}$	$0/55 \text{ g}$	175%
Sylmar	$0/30 \text{ g}$	$0/58 \text{ g}$	$65\%/7$
Array	$0/24 \text{ g}$	$0/37 \text{ g}$	$54\%/2$
طبس	$0/25 \text{ g}$	$0/60 \text{ g}$	140%

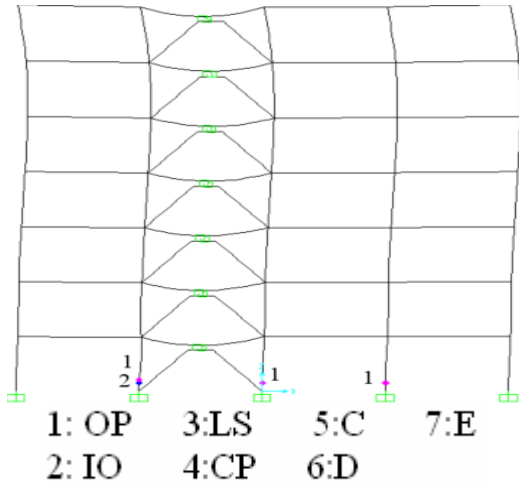
Array	$0/21 \text{ g}$	$0/51 \text{ g}$	$142/85\%$
--------------	------------------	------------------	------------

۲-۵ قاب ۷ طبقه مفصلی

چگونگی تشکیل مفاصل پلاستیک در قاب موجود تحت شتاب نگاشت $(\text{kg-m}) 0/35$ **Array** در شکل **(a)** ۸ نشان داده شده است. در اثر زلزله **Sylmar** تنها مهاربندی‌ها به کماتش رسیده اند اما در سایر موارد مفصل‌های پلاستیک فراتر از حد "ایمنی جانی" در قاب تشکیل شده و تحلیل بعلت ناپایداری آن‌ها متوقف شده است.

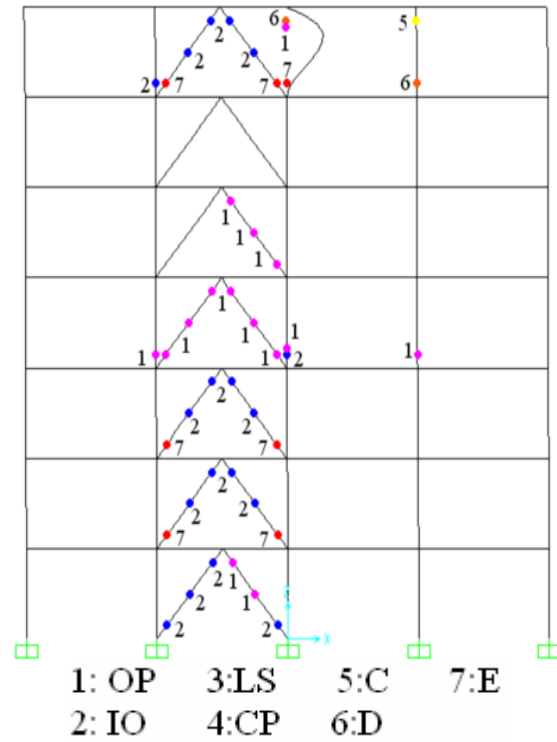
برای تقویت لرزه ای این سازه می توان از بادبند‌های با مقاطع قویتر استفاده کرد و یا این که میراگرها جایگزین مهاربندی موجود شوند. برای مقاوم سازی قاب در حالت اخیر از ۷ میراگر استفاده شد که هر کدام از ۵ صفحه فولادی تشکیل شده است. نتیجه تحلیل تاریخچه زمانی غیر خطی قاب بهسازی شده، هیچ گونه مفصل پلاستیکی را برای قاب‌ها نشان نداد و تنها تحت زلزله **Array** در پای ستون‌های داخلی طبقه اول مفصل‌های آبی (**IO**) و صورتی رنگ (**OP**) تشکیل شده است (شکل **(c)** ۸). با توجه به این موضوع می توان اظهار داشت که تغییر رنگ مفصل‌های پلاستیک ستون‌ها از قرمز و نارنجی (سطوح عملکرد **D** و **E**) به صورتی (**OP**) به منزله تغییر عملکرد سازه از سطح "فروپاشی" به "استفاده بی وقفه" بوده و رفتار لرزه ای قاب در این بارگذاری مطلوب می باشد. میزان مقاومت افزایش یافته قاب در اثر جایگزین شدن میراگر به جای مهاربند در جدول ۷ آمده است.

از طرفی جهت تقویت لرزه ای با مهاربند قویتر، این قاب تحت ضریب زلزله ویرایش سوم تحلیل و طراحی شد که با توجه به افزایش چشمگیر ضریب زلزله نسبت به ویرایش اول آن، برای کاهش نیروی محوری ستون‌های دو طبقه پایین، به ناچار دو دهانه مهاربندی شده است. از طرفی سعی شد اعضای مهاربندی به گونه ای انتخاب شوند که تحت زلزله های مورد نظر مفاصل پلاستیک از ابتدا در اعضای مهاربندی تشکیل نشود. چگونگی تشکیل مفاصل پلاستیک حاصل از تحلیل غیر خطی تاریخچه زمانی قاب اخیر در همان شکل **(b)** ۸ نمایش داده شده است. با توجه به سختی جانبی بیشتر قاب مهاربندی شده با بادبند نسبت به قاب همراه با میراگر، میزان انرژی ورودی زلزله به سازه بیشتر خواهد شد که به صورت نیروی محوری به

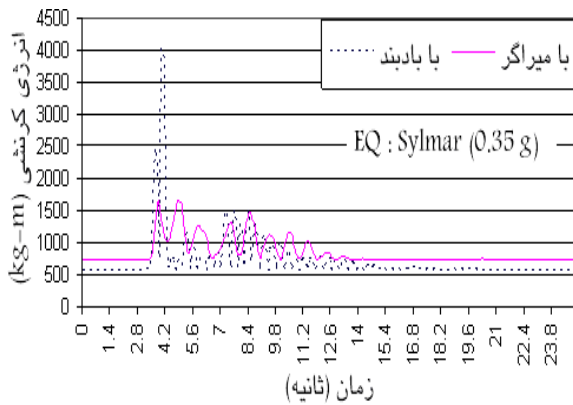


شکل (c) قاب ۷ طبقه بهسازی شده با میراگر لوزی شکل

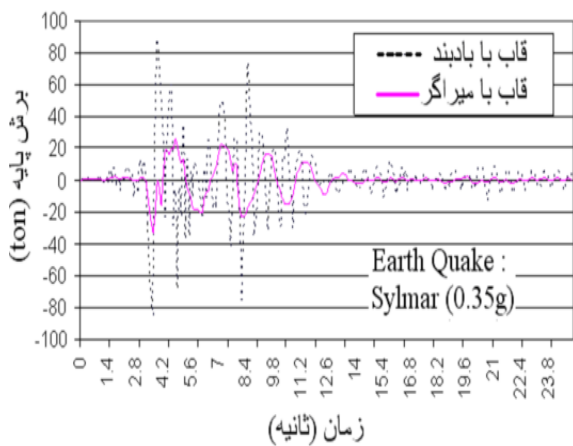
شکل ۸ - چگونگی تشکیل مفاصل پلاستیک در قاب ۷ طبقه تحت زلزله ($0.35g$) Array



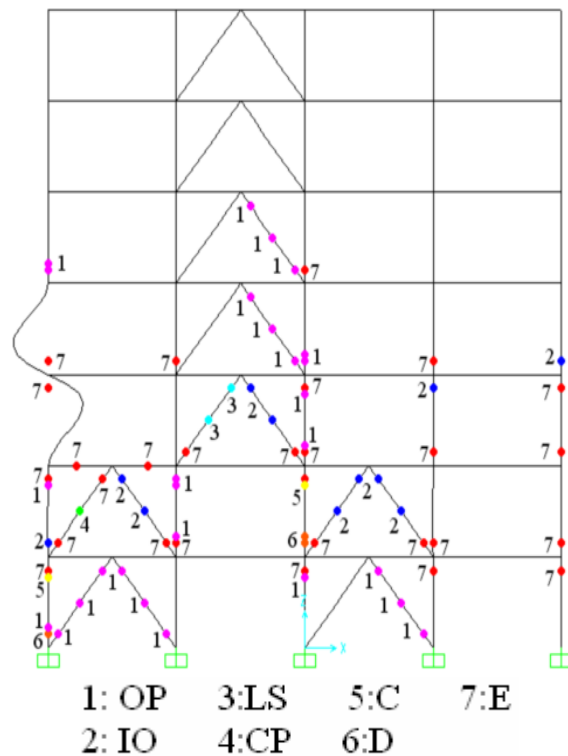
(a) قاب موجود



شکل ۹ - مقایسه انرژی کرنشی جذب شده در قاب ۷ طبقه مهاربندی شده و قاب همراه با میراگر لوزی



شکل ۱۰ - مقایسه برش پایه در قاب ۷ طبقه مهاربندی شده و قاب همراه با میراگر لوزی



(b) قاب مقاوم سازی شده با مهاربندی قویتر

نتیجه گیری

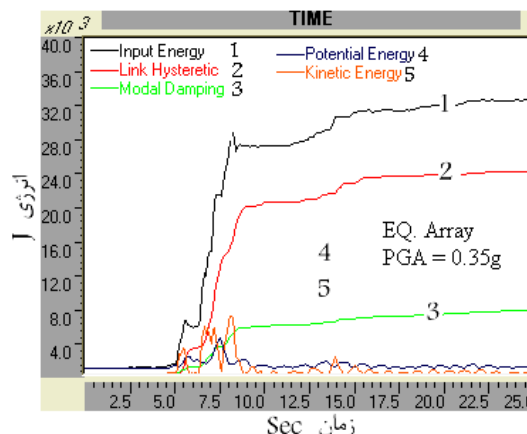
میراگرهای جاری شونده فولادی گروه ADAS از حلقه هیستریزس کامل و پایداری برخوردارند. در طرح لوزی شکل این گروه میراگر علاوه بر این که از تاثیر کیفیت جوش های اتصال بر رفتار چرخه ای آن ها کاسته شده در صورت به کارگیری فولاد با مقاومت پایین در ساختمان، بدون تمرکز تنش قادر به تحمل سیکل های بارگذاری زیادی خواهند بود.

افزودن مهاربندی دارای میراگر لوزی شکل به قاب خمشی از یک طرف موجب افزایش میرایی موثر تا حد ۱۰٪ و جذب (۵۸٪ - ۳۸٪) از انرژی ورودی زلزله شد و از طرفی دیگر به علت افزایش سختی جانبی موجب کاهش تغییرمکان بام تا حد ۴۰٪ گردید.

در قاب ساده جایگزینی مهاربندی معمولی موجود با ترکیب مهاربند - میراگر لوزی موجب افزایش میرایی موثر تا حد ۲۰٪ و جذب (۷۴٪ - ۶۵٪) از انرژی ورودی زلزله شد و همچنین به دلیل کاهش در سختی جانبی موجب کاهش برش پایه تا ۷۲٪ گردید.

سهم میراگرها از جذب انرژی ورودی زلزله در سازه مهاربندی شده بیشتر از قاب خمشی بود که دلیل آن این گونه توجهی می شود که به هر حال قاب های خمشی با اتصالات صلب خود بخشی از نیروی جانبی را جذب می کنند در حالی که در سازه های با اتصالات مفصلی نیروی جانبی تماما توسط میراگرها تحمل می شود.

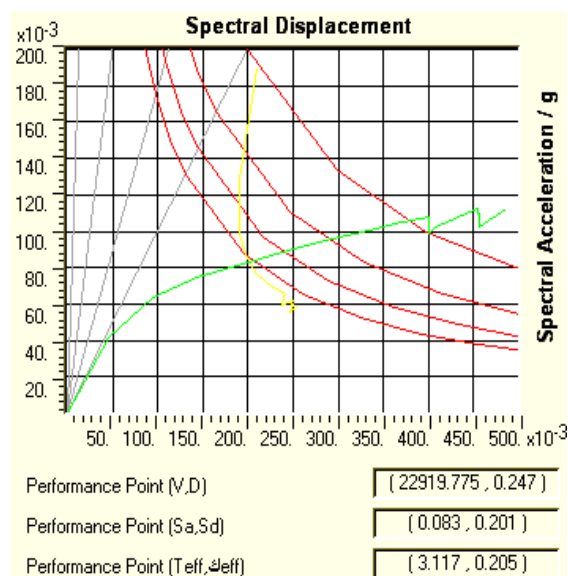
گرچه به کارگیری میراگرها به علت هزینه ساخت و نصبشان موجب بالا رفتن هزینه ساختمان می شوند اما از طرف دیگر بهتر شدن رفتار لرزه ای سازه همراه با میراگر، نسبت به سازه های معمولی می تواند موجب کاهش وزن اسکلت سازه و در کل توجه کننده جنبه اقتصادی طرح باشد. این موضوع نیاز به بررسی جامع تری دارد که البته هدف این مقاله نیست.



شکل ۱۱ - ترکیبات مختلف انرژی در قاب ۷ طبقه بهسازی شده با میراگر لوزی شکل تحت زلزله Array (۰/۳۵ g)

جدول ۸ - بیشینه ترکیب های مختلف انرژی در سازه ۷ طبقه با میراگر لوزی شکل

نوع انرژی (kg-m)	Newhall	Sylmar	طبس
ورودی	۵/۲۰۱۸۳	۶/۱۲۳۸۰	۳/۱۲۸۲۹
میراگر	۱/۱۴۴۹۷	۲/۸۵۶۸	۸۳۳۹
پتانسیل	۱۵۷۹	۳/۱۶۸۱	۸/۱۶۲۱
جنبشی	۴۳۶۸/۴	۳۵۵۹/۴	۸/۱۸۵۷
میرایی ذاتی	۲/۵۵۸۹	۱/۲۷۹۷	۳۴۹۷/۲



شکل ۱۲ - طیف ظرفیت قاب ۷ طبقه با میراگر حاصل از تحلیل Pushover

مراجع

- [1] Fema, Nhrp, Guide lines for seismic rehabilitation of buildings, Fema 356, Federal Emergency Management Agency; 1996.
- [2] Constantinou M. C., Dargush G. F., Lee G. C., Reinhorn A. M. and Whittaker A. S., 2001, Analysis and design of buildings with added energy dissipation systems, MCEER, Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, University at Buffalo.
- [3] Sadek F., Mohraz B., Taylor A. W., Chung R. M., 1996, Passive energy dissipation devices for seismic applications, National institute of standards and technology, NISTIR 5923; 59 p.
- [4] Shih M. H., Sung W. P., Go Cheer-germ, 2004, Investigation of newly developed added damping and stiffness device with low yield strength steel, j. Zhejiang Univ SCI, 5(30): 326-334.
- [۵] دستورالعمل بهسازی لرزه ای ساختمان های موجود، پژوهشکده بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله، خرداد، ۱۳۸۱

