

چکیده

پل‌ها به‌عنوان یک عضو اصلی سیستم‌های ارتباطی زمین، جزو سازه‌های با اهمیت بالا محسوب می‌شوند. با نگاهی به زلزله‌های گذشته و اثرات مخرب آن بر سازه پل‌ها، اهمیت مقاوم‌سازی پل‌ها بیش از پیش احساس می‌شود. در این گزارش یک پل بتنی موجود به‌عنوان نمونه توسط نرم‌افزار SAP2000 مدل می‌شود و مدل پل تحت چهار رکورد زلزله طبرس، کوبه، نورث‌ریچ و ال‌سترو با چهار PGA مختلف مورد تحلیل دینامیکی غیرخطی تاریخچه زمانی قرار می‌گیرد و سپس با اضافه کردن میراگر آکاردئونی فلزی به سازه پل نتایج حاصل از تحلیل در دو حالت قبل و بعد از نصب میراگر با هم مقایسه می‌شود که نتیجه آن کاهش پاسخ‌های لرزه‌ای سازه پل پس از نصب میراگر و همچنین جذب و اتلاف انرژی قابل قبول توسط میراگرها و افزایش اتلاف انرژی در اعضا و سازه کلی پل می‌باشد، این مطلب نشان‌دهنده مؤثر بودن میراگرهای فلزی آکاردئونی به‌عنوان گزینه‌ای مناسب در مقاوم‌سازی لرزه‌ای پل‌ها می‌باشد.

واژگان کلیدی: مقاوم‌سازی لرزه‌ای، اتلاف انرژی، پاسخ‌های لرزه‌ای، میراگر فلزی آکاردئونی، تحلیل دینامیکی غیرخطی تاریخچه زمانی.

مطالعه تحلیلی میراگرهای فلزی آکاردئونی در مقاوم‌سازی لرزه‌ای پل‌ها

فریبرز ناطقی الهی

استاد پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله

مهرتاش معتمدی

استادیار دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب

پژمان سخاوتی (نویسنده مسئول)

دانشجوی دکتری مهندسی زلزله و مدرس دانشگاه آزاد اسلامی

واحد تهران جنوب

p_sekhavati@yahoo.com

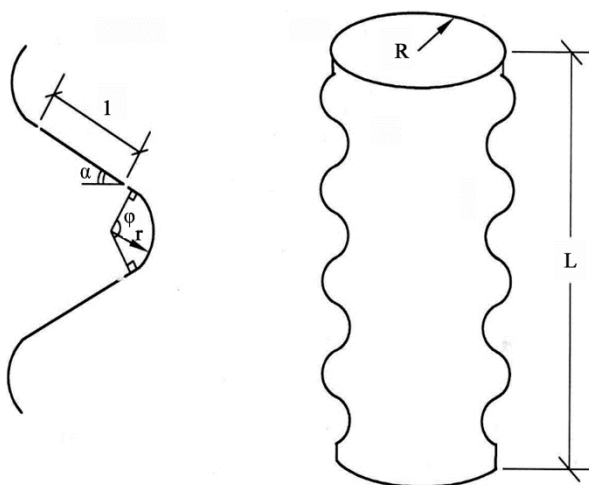
۱- مقدمه

وجود آورد. در صورتی که با بررسی‌های دقیق و اندیشمندانه نسبت به واقعیت‌های لرزه‌ای ناحیه طرح می‌توان از هزینه‌های گزاف در طراحی و اجرای پل‌ها جلوگیری کرد. این در حالی است که با به‌کارگیری صحیح و فنی اطلاعات لرزه‌ای می‌توان از ضایعات و خسارات ناشی از زمین‌لرزه‌ای در حد بسیار قابل توجه کاست و یک سیستم ارتباطی را پس از وقوع زمین لرزه در حالت سرویس نگاه داشت به‌طوری که امکان عبور و مرور برای وسایل امدادی از قبیل آمبولانس‌ها، ماشین‌های آتش‌نشانی، پلیس و غیره فراهم شود تا خسارات جانی و مالی به حداقل برسد. در واقع با کمی دقت و نکته‌سنجی که شاید هزینه‌های چندانی در بر نداشته باشد می‌توان از هزینه‌های عمدتاً جبران‌ناپذیر آتی به میزان قابل توجهی کاست. با مروری بر زلزله‌های گذشته مانند نورث‌ریچ، کوبه و ... که هر کدام خسارات بسیار زیادی را بر سازه‌های مختلف از جمله پل‌ها وارد کرد این

کشور ایران از نقاط لرزه‌خیز جهان است، که هر چند سال یک بار گوشه و کنار آن دچار زمین‌لرزه‌هایی با بزرگی‌های مختلف می‌شود. بنابراین مطالعات پژوهشی در زمینه لرزه‌شناسی پیش از اجرای هر پل و همچنین در مورد پل‌های ساخته شده در گذشته، از اهمیت بسزایی برخوردار است به‌گونه‌ای که بدون در نظر گرفتن پارامترهای لرزه‌ای نمی‌توان طرح مقاومی در برابر زلزله برای یک پل ارائه داد. در واقع دقت در این مطالعات پژوهشی باید بسیار بالا باشد، زیرا ساختار طبیعی زمین در نواحی مختلف، چه از نظر پتانسیل جنبشی گسل‌ها، میزان جابه‌جایی زمین، سرعت و حداکثر شتاب حرکت‌های زمین و چه از نظر محتوای فرکانس و زمان نوسانات، متفاوت است. همان‌طور که پیش‌تر گفته شد، تخریب یک سازه بسیار مهم مانند پل که عضو اصلی یک سیستم ارتباطی است، می‌تواند خسارت‌های جبران‌ناپذیر جانی، اقتصادی، اجتماعی، بهداشتی، سیاسی و ... به

از خود تغییر شکل زیاد نشان داده و انرژی جذب می کنند، در حالت ایده آل این قطعات به هنگام تغییر شکل به صورت آکاردئونی دچار لهیدگی می شوند؛ به عبارت دیگر لوله های جدار نازک اگر به صورت آکاردئونی دچار لهیدگی شوند، از حداکثر پتانسیل تشکیل مفصل پلاستیک در آنها استفاده شده و بیشترین جذب انرژی را خواهند داشت.

به این میراگرها که از لحاظ شکل ظاهری شبیه آکاردئون می باشند، میراگر فلزی آکاردئونی یا به اختصار AMD گفته می شود. شکل (۱) نمایی از میراگر AMD به صورت هندسی مشاهده می شود. در این شکل L طول لوله، R شعاع لوله، t ضخامت ورق، L طول ورقه مستقیم پلیسه، r شعاع خم ورق، α زاویه ورق مستقیم، N تعداد خم ها در طول استوانه و q زاویه خم می باشد. بدیهی است با تغییر هر یک از پارامترهای هندسی مذکور رفتار قطعه و میزان جذب انرژی آن تغییر می کند؛ بنابراین با انتخاب بهینه این پارامترها می توان به حداکثر جذب انرژی دست یافت.



$$\begin{aligned}
 L &= \text{طول لوله} & R &= \text{شعاع لوله} & T &= \text{ضخامت ورق} \\
 l &= \text{طول ورق مستقیم پلیسه} & r &= \text{شعاع خم ورق} & \alpha &= \text{زاویه خم ورق} \\
 \alpha &= \text{زاویه ورق مستقیم} & & & & \\
 N &= \text{تعداد خم ها در طول استوانه} & & & & \\
 &= \frac{L}{l \sin \alpha + 2r \sin \frac{\phi}{2}} & & & &
 \end{aligned}$$

شکل (۱): مدل هندسی لوله جدار نازک آکاردئونی [۲].

۳- رفتار لوله های جدار نازک آکاردئونی به عنوان میراگر جاری شونده

لوله های جدار نازک آکاردئونی به عنوان میراگر جاری

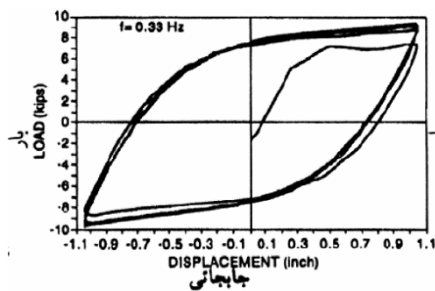
نیاز بیشتر حس می شود که در اثر زمین لرزه های آتی چه اتفاقی برای پل های کشور ایران رخ می دهد، آیا بهتر نیست که علاج واقعه را قبل از وقوع کرد؟

میراگرها مناسب ترین گزینه از میان سیستم های مدرن اتلاف انرژی جهت مقاوم سازی لرزه ای پل ها، به نظر می رسد، یکی از مهم ترین خصوصیات میراگرها این است که بدون لطمه زدن به عملکرد و سرویس دهی سازه قابل اجرا بوده و نسبت به سیستم های مشابه از هزینه کمتری برخوردار است. همچنین در برابر زلزله رفتار پایداری داشته و عوامل محیطی نظیر درجه حرارت، رطوبت و... در رفتار مکانیکی آنها دخیل نیست. استفاده عملی از میراگرها در مقاوم سازی لرزه ای پل ها در گذشته نتایج خوبی به همراه داشته است.

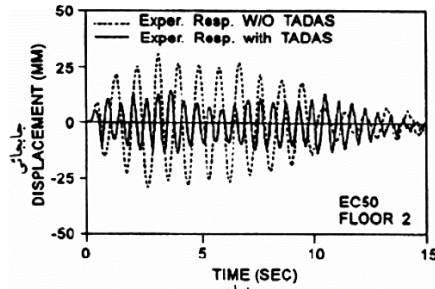
با توجه به رشد روز افزون مطالعات در زمینه آسیب پذیری و مقاوم سازی لرزه ای این نیاز احساس شد که یک نمونه میراگر آزمایش شده در سازه ساختمان ها به عنوان یک گزینه جهت مقاوم سازی پل ها به کار رود. این نمونه میراگر توسط نویسندگان اول و دوم به صورت آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار گرفته است [۳-۱]. در این مقاله مطالعات تحلیلی روی یک پل بتنی موجود صورت گرفته است که با توجه به نوع سازه و آرایش اجزای مختلف آن، در اکثر نقاط کشور مشابه آن ساخته شده است و پس از بررسی نتایج حاصل از تحلیل به روش های شبه دینامیکی و دینامیکی غیرخطی، سازه پل پس از اضافه شدن چند میراگر مدل شده و نتایج حاصل از آن مورد ارزیابی قرار می گیرد [۴].

۲- معرفی میراگر فلزی آکاردئونی [۲]

در اینجا به اختصار به نحوه شکل گیری لوله جدار نازک آکاردئونی به عنوان میراگر و همچنین به تأثیر پارامترهای هندسی بر استهلاک انرژی در این میراگرها پرداخته می شود. مطالعه در این رابطه استفاده از قطعات فلزی لوله ای شکل در سیستم های مکانیکی جاذب انرژی از سال ها پیش رواج پیدا کرده است. لوله های جدار نازک تحت فشار محوری به دلیل ظرفیت جذب انرژی و طول لهیدگی زیاد یکی از بهترین شیوه های جذب انرژی را فراهم می نمایند. اما این سیستم ها تنها در ضربه فشاری

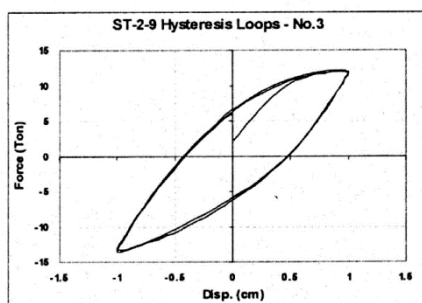
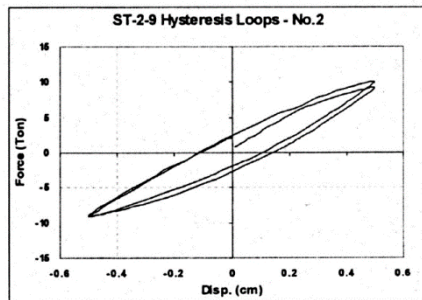
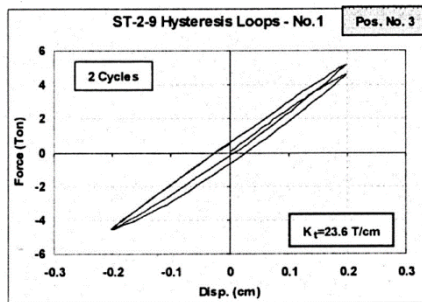


الف) رفتار هیستریزس میراگر



ب) کاهش پاسخ جابه‌جایی قاب

شکل (۳): رفتار و عملکرد میراگرهای فلزی جاری‌شونده [۲].



شکل (۴): رفتار هیستریزس میراگر فلزی آکاردئونی [۲].

شونده رفتار پایدار یکسانی را در کشش و فشار از خود نشان می‌دهند. همچنین با انتخاب پارامترهای مناسب برای شکل آنها مفصل پلاستیک در سطح وسیع تری از جداره لوله تشکیل شده و می‌توان از حداکثر ظرفیت جذب انرژی آنها استفاده کرد. علاوه بر قابل استفاده بودن در محدوده تغییر شکل‌های مورد نیاز در سازه‌ها، توانایی تحمل تغییر شکل‌های بزرگ یا به عبارت دیگر طول‌لهیدگی زیاد را دارا بوده و می‌توانند به‌عنوان میراگر با دامنه تغییر شکل بزرگ نیز مورد استفاده قرار گیرند [۲].



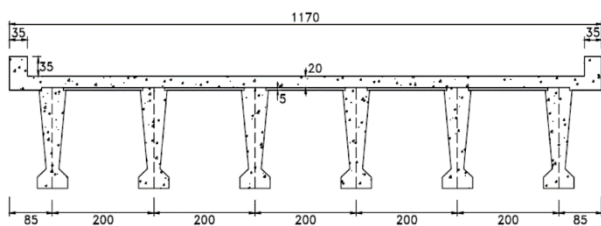
شکل (۲): نمونه‌ای از میراگر آکاردئونی در حال آزمایش [۲].

نتایج تحلیل‌های مقدماتی روی این میراگرها حاکی از رفتار مناسب لوله‌های فلزی جدار نازک آکاردئونی در تغییر شکل‌های رفت و برگشتی می‌باشد. چنانچه ضخامت و سایر پارامترهای هندسی به درستی طراحی شوند پیش‌بینی می‌شود لوله جدار نازک تا برخورد شیارها به یکدیگر قابلیت جذب انرژی داشته باشد. شکل (۳) تأثیر میراگر فلزی به‌طور کلی را بر کاهش پاسخ جابه‌جایی قاب نشان می‌دهد. در شکل (۴) رفتار هیستریزس میراگر فلزی آکاردئونی نشان داده شده است [۵].

۴- نحوه استفاده از میراگر AMD در مقاوم‌سازی

لرزه‌ای پل‌ها

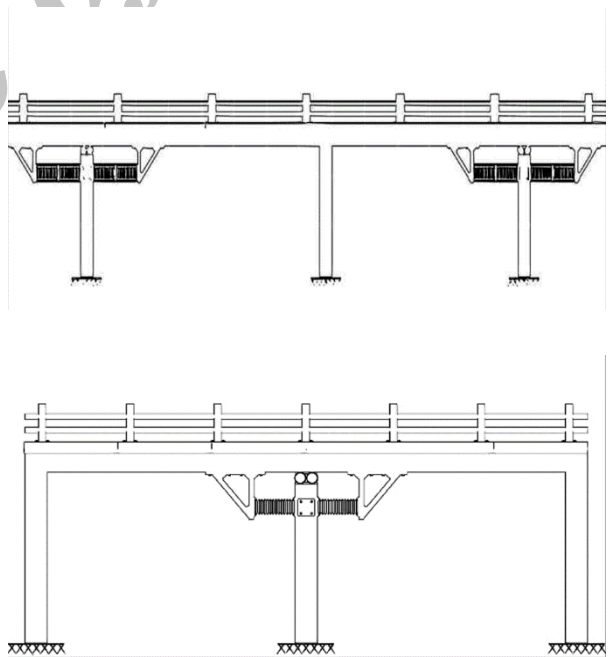
و متداول کشور است. این پل دو دهانه مساوی به طول ۲۵ متر دارد که به صورت ممتد بر روی یک پایه میانی و دو کوله انتهایی قرار گرفته است. سازه پل از جنس بتن آرمه می‌باشد، عرض پل ۱۱/۷ متر و ارتفاع آن تا روی عرشه ۷/۵ متر است. عرشه پل از نوع تیر و دال بتن آرمه بوده که همان‌طور که گفته شد بر روی سه پایه (دو کوله کناری و یک پایه میانی) به صورت یکسره قرار گرفته است، طول کل عرشه ۵۰ متر بوده و مشخصات هندسی آن در شکل (۵) آمده است.



شکل (۶): مشخصات هندسی عرشه پل مورد مطالعه (ابعاد بر حسب سانتی‌متر).

روسازه پل شامل یک دال بتنی پیوسته در جا با عرض ۱۱/۷ متر و ضخامت ۰/۲ متر است، ارتفاع تیرها ۱/۷۵ متر و با احتساب ۰/۲ متر ضخامت دال، ضخامت کل روسازه پل ۱/۹۵ متر است. پایه میانی پل یک قاب عرضی شامل تیر سر ستون قرار گرفته بر روی سه عدد ستون بتن مسلح به ارتفاع ۴/۵ متر می‌باشد. همه آنها دارای مقطع دایره‌ای شکل به قطر ۱/۲ متر و با آرماتورگذاری یکسان هستند، آرماتورهای قائم ستون مطابق شکل (۷) $\Phi 32 \times 30$ می‌باشد، این آرماتورها در بالای فونداسیون به آرماتورهای ریشه متصل شده و به اندازه طول مهاري به داخل سر ستون ادامه یافته‌اند. مشخصات هندسی سر ستون در شکل (۸) نشان داده شده است. دیوار کوله با طول ۱۱/۷ متر، شامل دو قسمت به صورت زیر می‌باشد: قسمت اول که باریک‌تر است و پشت نشیمنگاه قرار دارد Back Wall نامیده می‌شود که ارتفاع آن ۲ متر و ضخامت آن ۴۰ سانتی‌متر است. قسمت دوم، از نشیمنگاه تا بالای فونداسیون ادامه دارد، Breast Wall نامیده

همان‌طور که پیش‌تر گفته شد میراگر AMD می‌تواند به عنوان یک گزینه در مقاوم‌سازی لرزه‌ای پل‌ها به کار رود، مسئله مهم این است که این میراگر که به صورت مزدوج در کشش و فشار به طور یکسان کار می‌کند، چگونه به سازه پل متصل شود تا پاسخ‌های لرزه‌ای آن را کاهش دهد. برای این منظور دو حالت به عنوان نمونه پیشنهاد می‌شود. در حالت اول اگر عرشه پل روی پایه‌های میانی به صورت غلتک کار کند، میراگر به پایه‌های پل متصل می‌شود، به گونه‌ای که قسمت میانی میراگر به پایه و دو قسمت انتهایی به وسیله ورق‌هایی به عرشه پل متصل شود. در حالت دوم که عرشه پل به صورت غلتک روی کوله‌ها کار می‌کند، قسمت میانی میراگر به کوله‌ها و قسمت‌های انتهایی به عرشه‌ها متصل می‌شوند.



شکل (۵): نحوه اتصال میراگر AMD به پایه‌های میانی و کوله‌های انتهایی پل.

۵- معرفی پل مورد مطالعه

پل مورد مطالعه در این گزارش جزو سیستم پل‌های متعارف

۶- مدل‌سازی کامپیوتری

در این گزارش تلاش شده است که مدل مورد استفاده جهت تحلیل و ارزیابی لرزه‌ای پل دارای دقت بالایی بوده و تا حد امکان تمام اجزای پل به صورت دقیق شبیه‌سازی شوند. با توجه به نوع سازه و بارهای وارده بر عرشه، کوله‌ها و پایه‌ها به صورت سه بعدی در نرم‌افزار SAP2000 مدل‌سازی شده‌اند، که با توجه به اینکه هدف بررسی لرزه‌ای پل می‌باشد، این نرم‌افزار توان انجام انواع تحلیل‌های استاتیکی و دینامیکی به صورت خطی و غیرخطی را داراست، المان‌های متنوعی دارد و خطای آن نسبتاً کم می‌باشد. لازم به توضیح است که قسمت‌های مختلف سازه‌ای پل به شرح زیر مدل شده‌اند:

۱- تیرها توسط المان‌های Frame در جهت طولی پل و دال نیز توسط همین المان‌ها در جهت عرضی پل مدل شده است، گره‌های ما بین عرشه و تیر به وسیله المان‌های صلب به یکدیگر متصل شده‌اند.

۲- برای مدل‌سازی ستون‌های پایه میانی پل از المان Frame استفاده شده است.

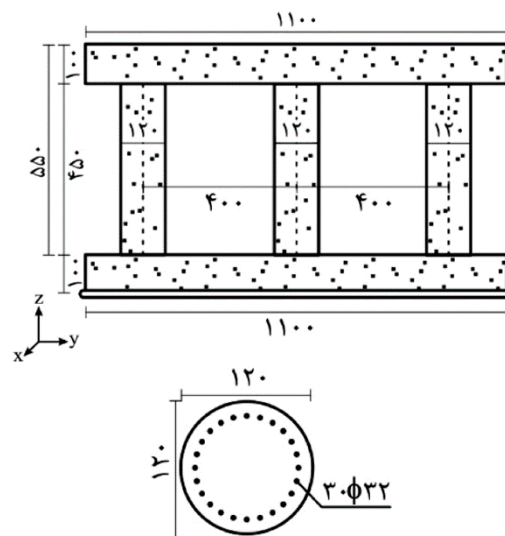
۳- تیر سرستون که به صورت کاملاً توپر می‌باشد با المان Frame مدل شده است.

۴- کوله پل نیز توسط المان‌های افقی و عمودی Frame مدل شده است.

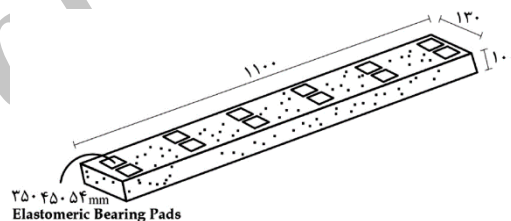
۵- به منظور کنترل تغییر شکل‌های حرارتی عرشه پل در هر یک از کوله‌ها درز انبساط پیش‌بینی شده است. از آنجایی که در هنگام زلزله امکان تغییر مکان عرشه بیش از این مقدار وجود دارد، لذا می‌بایست این برخورد را شبیه‌سازی نمود. برای این کار از المان پیوند غیرخطی (Nlink) از نوع Gap استفاده می‌شود. برای این منظور در انتهای عرشه پل المان‌هایی با فضای خالی ۵ سانتی‌متر در امتداد محور طولی عرشه و دارای سختی محوری زیاد تعریف شده‌اند تا در صورت امکان سختی آنها به‌طور مؤثر در تحلیل وارد شود.

۶- برای جلوگیری از حرکت روسازه در جهت عرضی از یک

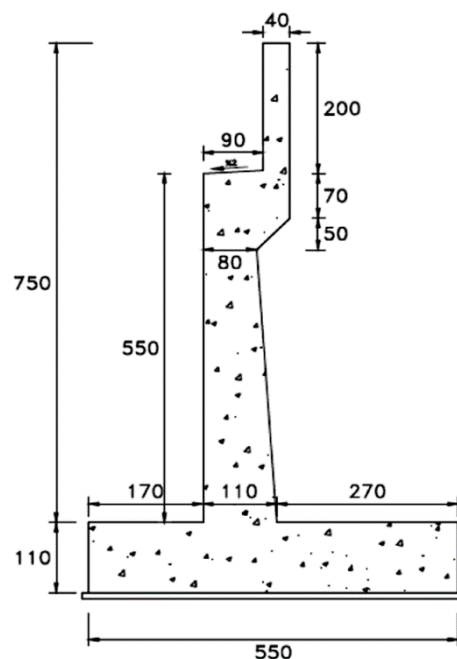
می‌شود و ارتفاع آن ۵/۵ متر است و ضخامت آن متغیر است. مشخصات هندسی کوله در شکل (۹) آمده است.



شکل (۷): مشخصات هندسی پایه میانی پل (ابعاد بر حسب سانتی‌متر).

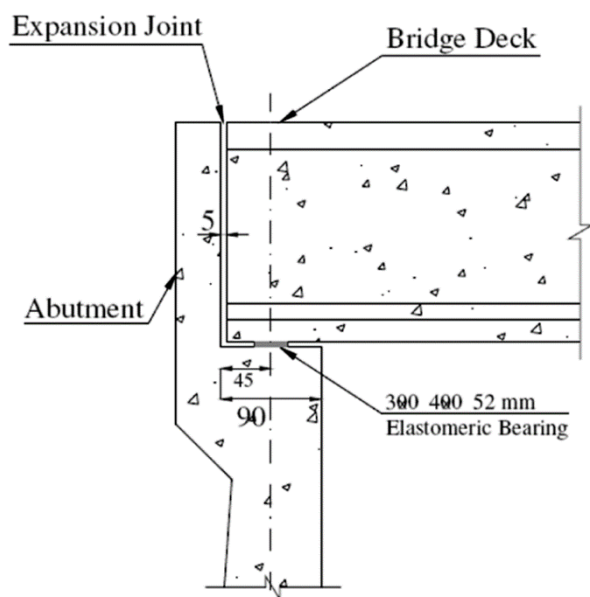


شکل (۸): مشخصات هندسی سرستون (ابعاد بر حسب سانتی‌متر).



شکل (۹): مشخصات هندسی دیواره کوله (ابعاد بر حسب سانتی‌متر).

ضخامت کل ۵۴ میلی‌متر در دو ردیف عرضی و در هر یک از کوله‌ها نیز از شش قطعه تکیه‌گاه الاستومری به ابعاد ۳۰۰×۴۰۰ و ضخامت کل ۵۲ میلی‌متر در یک ردیف عرضی استفاده شده است. مشخصات هر یک از تکیه‌گاه‌ها در جدول (۱) آورده شده است. همچنین مشخصات مکانیکی تکیه‌گاه‌های الاستومری استفاده شده در پل مورد مطالعه در جدول (۲) آمده است.



شکل (۱۰): جزئیات اتصال عرشه به کوله (ابعاد بر حسب سانتی‌متر).

سری بلوک‌های برشی بتنی در دو طرف تیرها و بر روی پایه‌ها استفاده شده است. از آنجایی که در هنگام زلزله احتمال تغییر مکان نسبی بین روسازه و پایه‌ها وجود دارد، لذا می‌بایست مشابه جهت طولی برخورد سازه و بلوک‌های برشی را شبیه‌سازی نمود. برای این منظور از المان‌های پیوند غیرخطی از نوع Gap با پارامتر باز شدگی (Open=0) استفاده شده است.

۷- تکیه‌گاه‌های پل مورد مطالعه از نوع تکیه‌گاه‌های الاستومری می‌باشد که برای مدل‌سازی آن از المان پیوند غیر خطی از نوع جداگر هیسترتیک استفاده شده است. در شکل (۱۰) جزئیات اتصال عرشه به کوله نشان داده شده است.

این المان دارای رفتار پلاستیک برای دو درجه آزادی تغییر شکل برشی و سختی مؤثر خطی برای چهار درجه آزادی دیگری می‌باشد. تکیه‌گاه‌های الاستومری مورد نظر برای پل مورد مطالعه محصول شرکت GUMBA می‌باشد که این شرکت در ساخت آن از نوعی لاستیک مصنوعی به نام نئوپرن استفاده می‌کند. برای انتقال بار میان عرشه پل و پایه میانی از دوازده قطعه تکیه‌گاه الاستومری به ابعاد ۳۵۰×۴۵۰ و

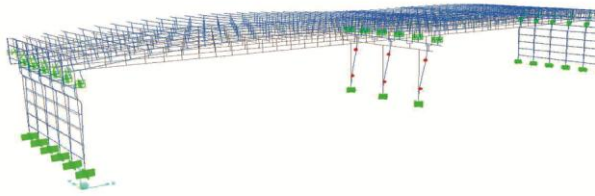
جدول (۱): مشخصات هندسی تکیه‌گاه‌های الاستومری پل مورد مطالعه.

ضخامت کل الاستومر (mm)	ضخامت کل تکیه‌گاه (mm)	تغییر شکل برشی مجاز (mm)	تعداد لایه‌های الاستومر	بار قائم مجاز (KN)	ابعاد تکیه‌گاه (mm)
۳۷	۵۲	۲۵/۹	۴	۱۸۰۰	۳۰۰×۴۰۰
۳۸	۵۴	۲۶/۶	۳	۲۳۶۰	۳۵۰×۴۵۰

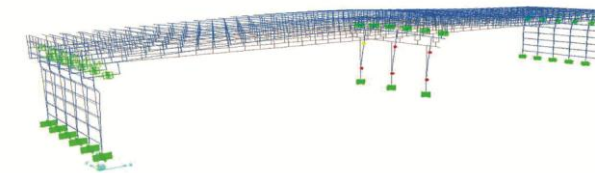
جدول (۲): مشخصات مکانیکی تکیه‌گاه‌های الاستومری پل مورد مطالعه.

ظرفیت برشی (V _u) (KN)	سختی برشی (K _s) (KN/m)	سختی فشاری (K _N) (KN/m)	مدل برشی (G) (N/mm ²)	ابعاد تکیه‌گاه (mm)
۱۲۰/۰	۳۲۴۳	۲۸۳۵۱۸۱	۱/۰	۳۰۰×۴۰۰×۵۲
۱۵۷/۵	۴۱۴۵	۲۵۴۳۱۰۲	۱/۰	۳۵۰×۴۵۰×۵۴

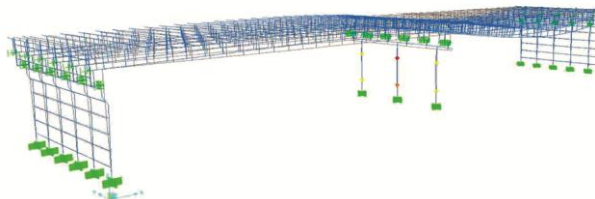
پلاستیک در اثر زلزله‌های طبس، کوبه، نورث‌ریج و ال‌سنترو به ترتیب در شکل‌های (۱۲) تا (۱۵) نشان داده شده است.



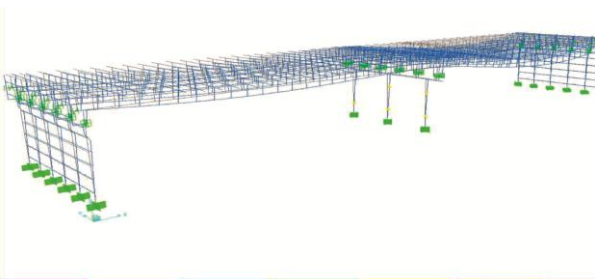
شکل (۱۲): نحوه تشکیل مفاصل پلاستیک در اثر زلزله طبس با $PGA=0.8g$.



شکل (۱۳): نحوه تشکیل مفاصل پلاستیک در اثر زلزله کوبه با $PGA=0.8g$.



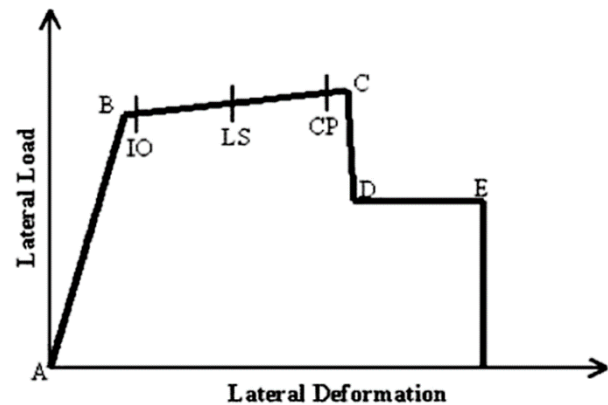
شکل (۱۴): نحوه تشکیل مفاصل پلاستیک در اثر زلزله نورث‌ریج با $PGA=0.8g$.



شکل (۱۵): نحوه تشکیل مفاصل پلاستیک در اثر زلزله ال‌سنترو با $PGA=0.8g$.

۷- تحلیل مدل کامپیوتری

با توجه به اعتمادپذیرتر بودن نتایج حاصل از تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی به ارزیابی دقیق پل مورد مطالعه به این روش پرداخته می‌شود. جهت انجام تحلیل دینامیکی غیر خطی روی سه پایه میانی پل مورد مطالعه مفاصل پلاستیکی از نوع Fiber (PMM) استفاده شده است. این مفصل توسط یک المان محوری بنام فیبر تعریف شده است که در طول عضو قاب و در سطح مقطع آن پراکنده شده است. هر فیبر دارای محل، محدوده عملکردی خاص خود و یک منحنی تنش- کرنش می‌باشد که با توجه به نیروی وارده، مقادیر نیرو، لنگر، تغییر مکان و دوران‌ها محاسبه شده و با توجه به این مشخصات مفصل شکل می‌گیرد [۷]. با بررسی‌های تکمیلی و مقایسه نتایج و عملکرد مطلوب حاصله، از منحنی نیرو- تغییر مکان مفاصل پلاستیک پیش فرض نرم‌افزار استفاده شد. این منحنی در شکل (۱۱) آمده است. در این تحلیل از چهار شتاب‌نگاشت ال‌سنترو، کوبه، طبس و نورث‌ریج استفاده می‌شود.



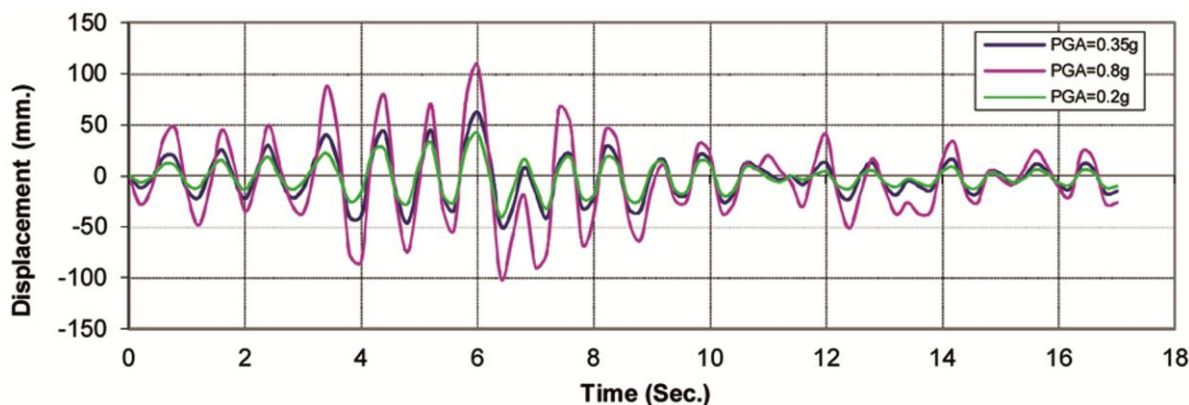
شکل (۱۱): منحنی نیرو- تغییر مکان مفاصل پلاستیک.

۸- نتایج تحلیل

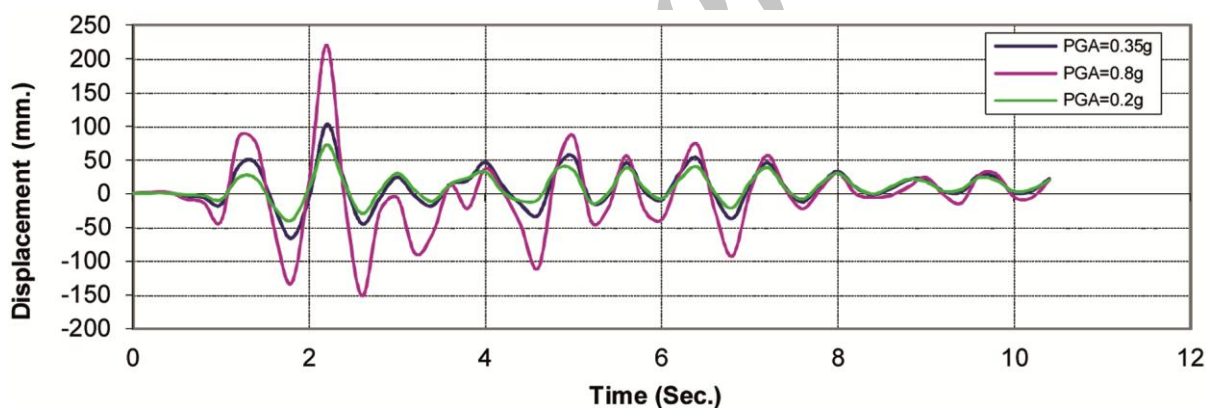
در این گزارش جهت تحلیل دقیق پل از شتاب‌نگاشت‌های فوق با چهار سطح خطر ۰/۲، ۰/۳۵، ۰/۵ و ۰/۸ استفاده شده است که پس از انجام تحلیل مفاصل پلاستیک در سطح خطر $PGA=0.8g$ در ستون‌ها تشکیل شده است. نحوه تشکیل مفاصل

برای زلزله های طیس، کوبه، نورث ریج و الاسترو به ترتیب در شکل های (۱۶) الی (۱۹) نشان داده شده است. لازم به توضیح است که برای انجام تحلیل دقیق، یک تحلیل استاتیکی غیرخطی به عنوان پیش فرض تحلیل دینامیکی غیرخطی منظور شده است.

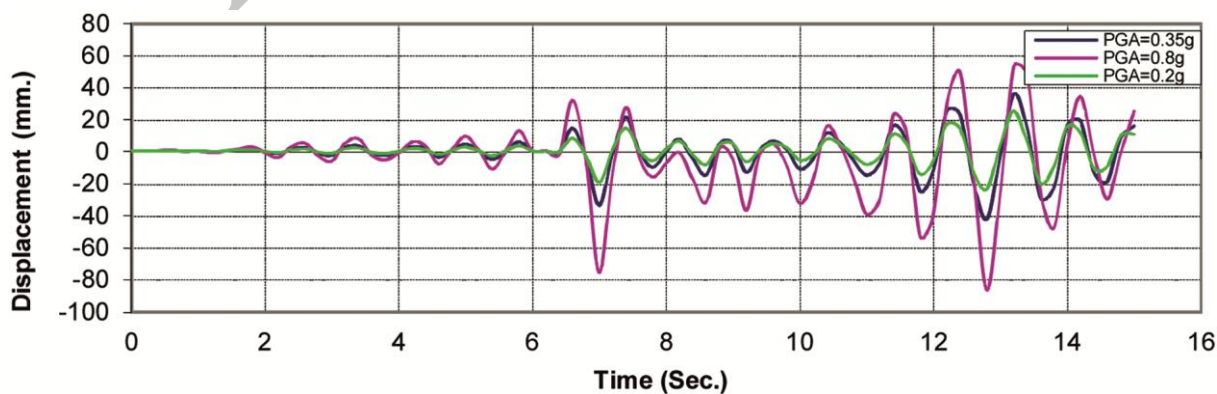
لازم به ذکر است که در بعضی از زلزله ها مانند الاسترو در سطوح خطر پایین مفصل پلاستیکی تشکیل نشده است. تاریخچه زمانی تغییر مکان طولی عرشه پل تحت شتاب نگاشت های اعمال شده با سه سطح خطر به عنوان نمونه



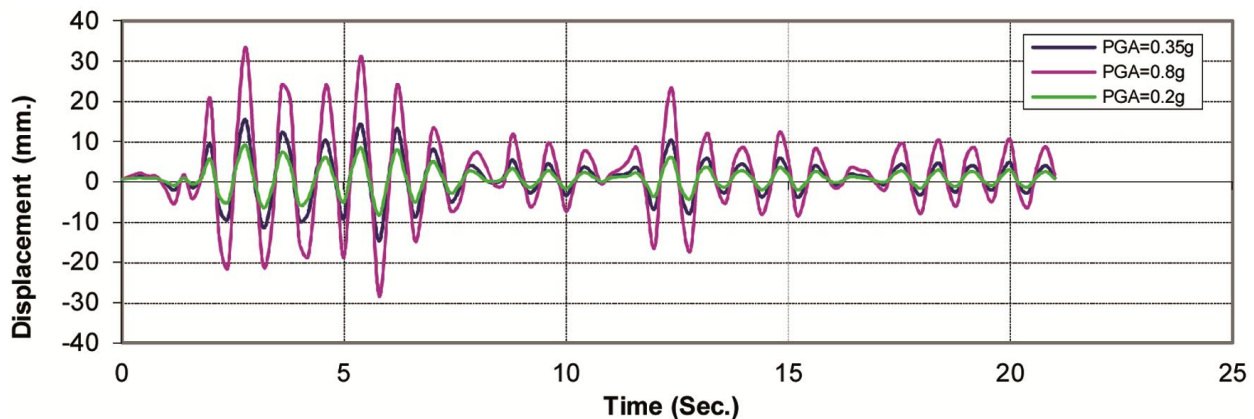
شکل (۱۶): تاریخچه زمانی تغییر مکان طولی عرشه تحت زلزله طیس.



شکل (۱۷): تاریخچه زمانی تغییر مکان طولی عرشه تحت زلزله کوبه.



شکل (۱۸): تاریخچه زمانی تغییر مکان طولی عرشه تحت زلزله نورث ریج.



شکل (۱۹): تاریخچه زمانی تغییر مکان طولی عرشه تحت زلزله ال سترو.

با توجه به مطالب گفته شده در قبل، مشخصات میراگر مزدوج AMD که در نرم افزار در جهت طولی پل مدل شده است عبارت است از:

$$K_e = 64 \text{ ton/cm}$$

$$\text{Post Yield Stiffness Ratio} = 0.15$$

$$\text{Yielding Exponent} = 2$$

۱۰- تأثیر میراگر AMD بر پاسخ‌های پل مورد مطالعه

پس از اضافه کردن میراگر AMD به مدل کامپیوتری پل تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی بر روی مدل جدید صورت گرفت که در زیر پاسخ‌های حاصل از چهار شتاب نگاشت ورودی تحت $PGA=0.35$ به عنوان نمونه با حالت قبل از نصب میراگر مقایسه شده است. شکل‌های (۲۰) الی (۲۳) پاسخ‌های مربوط به تغییر مکان طولی عرشه را با هم مقایسه نموده است. مقایسه پاسخ‌های مربوط به تغییر مکان طولی عرشه تحت اثر زلزله‌های طبس، کوبه، نورث‌ریج و ال سترو به ترتیب در شکل‌های (۲۰) الی (۲۳) نشان داده شده است (لازم به توضیح است که واحد نیروی برشی تن، لنگر خمشی تن - متر و جابه‌جایی میلی‌متر می‌باشد).

۹- مقاومسازی پل مورد مطالعه با استفاده از میراگر AMD

پس از تحلیل غیرخطی تاریخچه زمانی پل در این بخش میراگر AMD به صورت مزدوج به سیستم سازه‌ای پل به عنوان یک عضو کاهش دهنده پاسخ‌ها اضافه می‌شود و با توجه به نوع سازه پل و عملکرد غلتکی عرشه روی دو کوله انتهایی این میراگرها به صورتی که پیش‌تر گفته شد به کوله متصل می‌شوند. برای مدل کردن این میراگر از المان‌های پیوند غیر خطی از نوع Plastic (Wen) در نرم‌افزار استفاده می‌شود. همان‌طور که در قسمت‌های گذشته اشاره شد میراگر AMD می‌تواند ابعاد هندسی مختلفی داشته باشد که این تغییر ابعاد باعث تغییر مشخصات مکانیکی آن می‌شود. مشخصات هندسی چهار میراگر استفاده شده در این گزارش عبارتند از:

$$D = 200 \text{ mm}$$

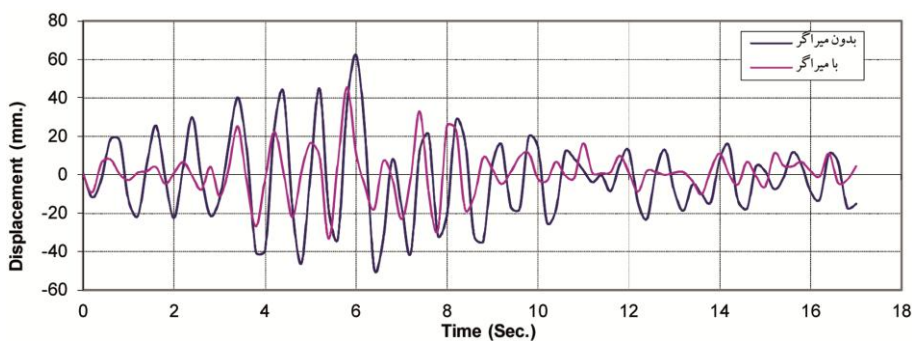
$$t = 2 \text{ mm}$$

$$n = 8$$

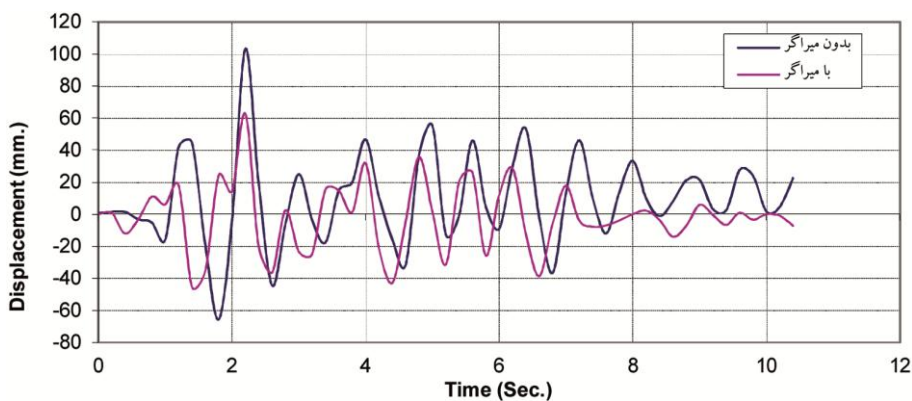
$$\left(\frac{s}{g}\right) = 0.22$$

که ضخامت جداره (t)، قطر متوسط لوله (D)، تعداد پلیسه‌ها (n) و نسبت شکل پلیسه‌ها $\left(\frac{s}{g}\right)$ می‌باشد، با توجه به ابعاد هندسی فوق سختی میراگر تکی به دست می‌آید:

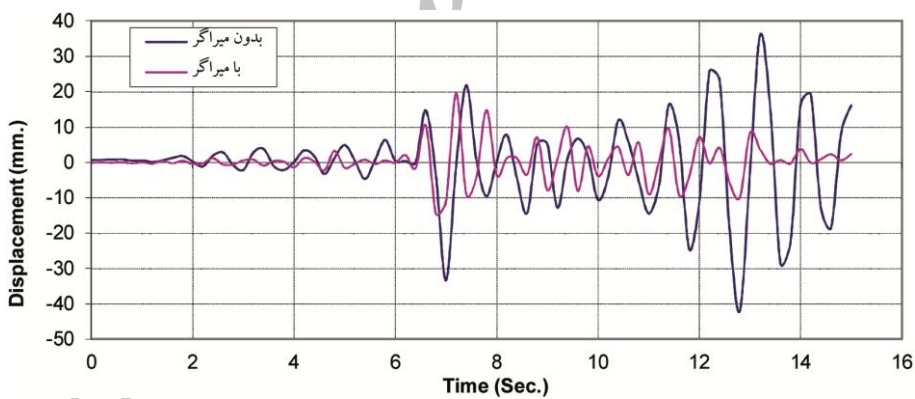
$$K = 32 \text{ ton/cm}$$



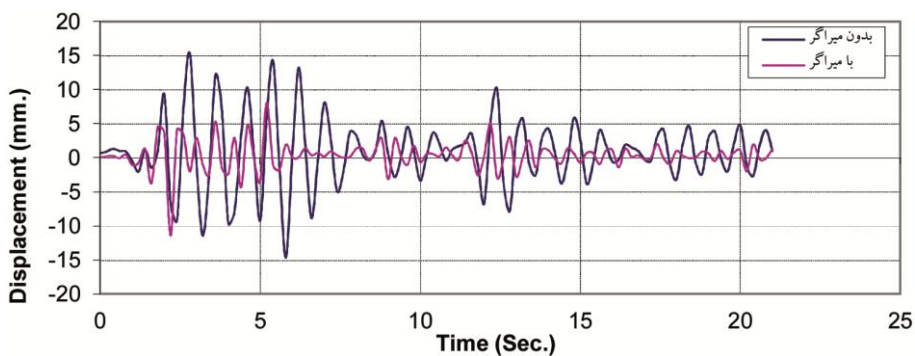
شکل (۲۰): تاریخچه زمانی تغییر مکان طولی عرشه پس از نصب میراگر تحت اثر زلزله طبس.



شکل (۲۱): تاریخچه زمانی تغییر مکان طولی عرشه پس از نصب میراگر تحت اثر زلزله کوبه.



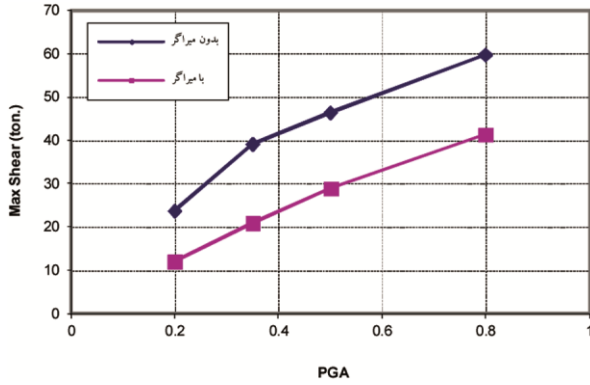
شکل (۲۲): تاریخچه زمانی تغییر مکان طولی عرشه پس از نصب میراگر تحت اثر زلزله نورئوبیج.



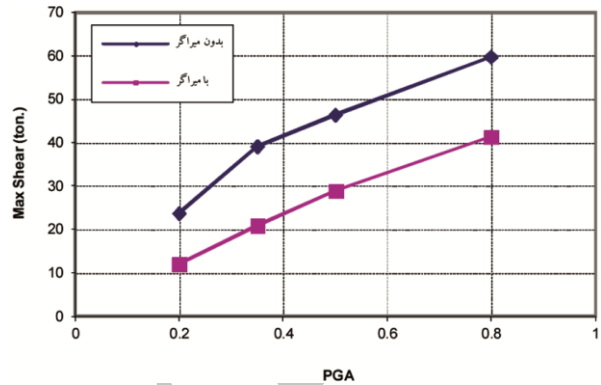
شکل (۲۳): تاریخچه زمانی تغییر مکان طولی عرشه پس از نصب میراگر تحت اثر زلزله ال سترو.

اما برای اینکه این مطلب دقیق‌تر بررسی شود نمودارهای شکل (۲۴) تا (۲۶) به‌عنوان نمونه در زیر ارائه شده است که مقایسه‌ای بین پاسخ‌های زلزله سه پایه پل تحت زلزله نورث‌ریج در چهار سطح خطر در دو حالت با و بدون میراگر می‌باشد.

پس از نصب میراگر تغییر مکان طولی عرشه پل تحت رکورد زلزله‌های مختلف با چهار سطح خطر ۰/۲، ۰/۳۵، ۰/۵ و ۰/۸ به ترتیب حدود ۵۰ درصد، ۴۰ درصد، ۳۲ درصد و ۳۰ درصد کاهش یافته است.

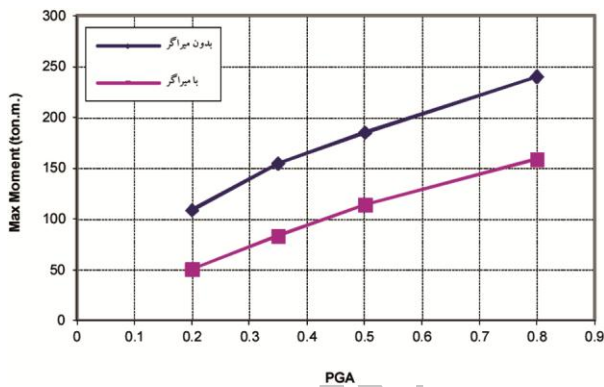


(ب): لنگر خمشی

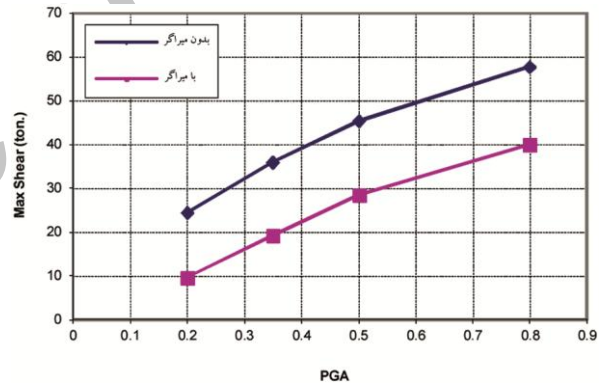


(الف) نیروی برشی

شکل (۲۴): مقایسه پاسخ حداکثر پایه شماره ۱ در دو حالت در زلزله نورث‌ریج.

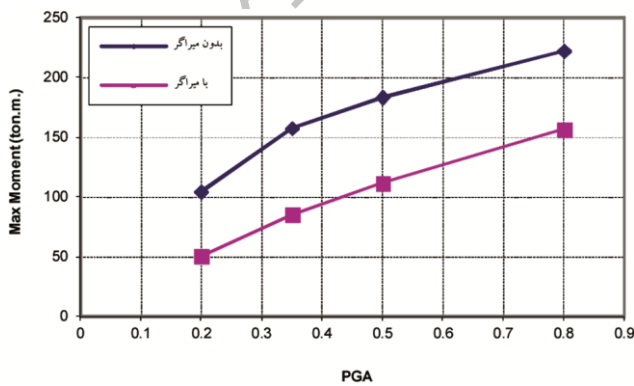


(ب): لنگر خمشی

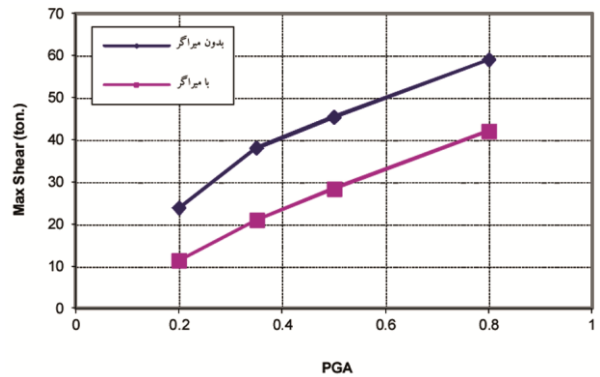


(الف): نیروی برشی

شکل (۲۵): مقایسه پاسخ حداکثر پایه شماره ۲ در دو حالت در زلزله نورث‌ریج.



(ب): لنگر خمشی



(الف): نیروی برشی

شکل (۲۶): مقایسه پاسخ حداکثر پایه شماره ۳ در دو حالت در زلزله نورث‌ریج.

نیرو- تغییر مکان پایه‌ها پس از نصب میراگر تحت دو شتاب‌نگاشت ورودی به‌عنوان نمونه نشان داده شده است (واحد نیرو تن و واحد تغییر مکان میلی‌متر می‌باشد).

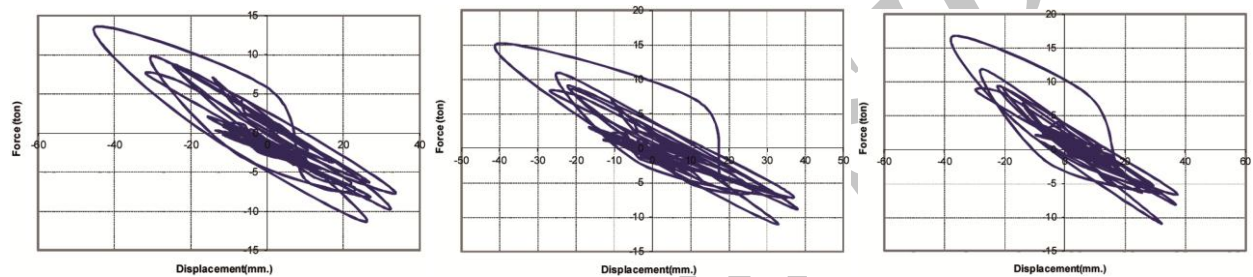
با توجه به منحنی‌های فوق و سطح زیر آنها مشاهده می‌شود که پس از نصب میراگر مقداری انرژی در پایه‌های پل تلف شده است که این یکی از اهداف مقاوم‌سازی لرزه‌ای می‌باشد که در اینجا حاصل شده است.

در شکل (۲۹) منحنی‌های هیستریزس میراگرهای استفاده

شده در سازه پل برای چهار رکورد زلزله را می‌توان دید.

پس از نصب میراگر میزان برش‌های ۳ پایه پل به صورت میانگین برای چهار رکورد زلزله تحت چهار سطح خطر ۰/۲، ۰/۳۵، ۰/۵ و ۰/۸ به ترتیب حدود ۴۰ درصد، ۲۸ درصد، ۲۲ درصد و ۱۷ درصد کاهش یافته است. همچنین پس از نصب میراگر میزان لنگرهای خمشی ۳ پایه پل به صورت میانگین برای چهار رکورد زلزله تحت چهار سطح خطر ۰/۲، ۰/۳۵، ۰/۵ و ۰/۸ به ترتیب حدود ۳۸ درصد، ۲۶ درصد، ۱۹ درصد و ۱۳ درصد کاهش یافته است.

همچنین در شکل‌های (۲۷) و (۲۸) منحنی‌های هیستریزس

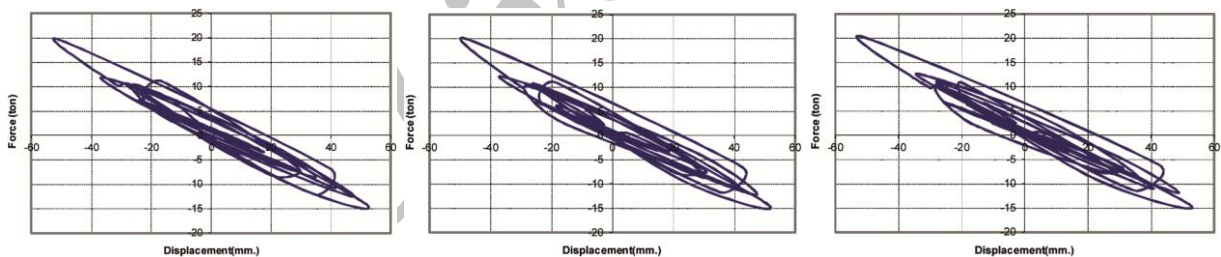


(ج): پایه شماره ۳

(ب): پایه شماره ۲

(الف): پایه شماره ۱

شکل (۲۷): منحنی‌های هیستریزس پایه‌های پل تحت زلزله طبس.

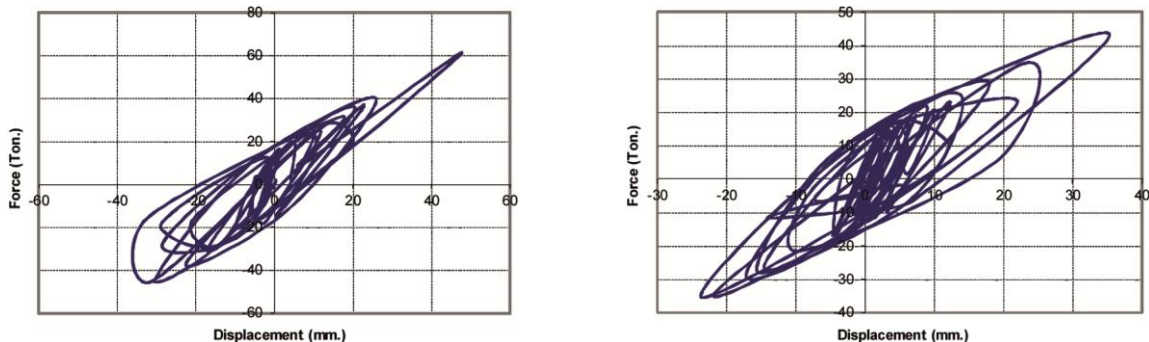


(ج): پایه شماره ۳

(ب): پایه شماره ۲

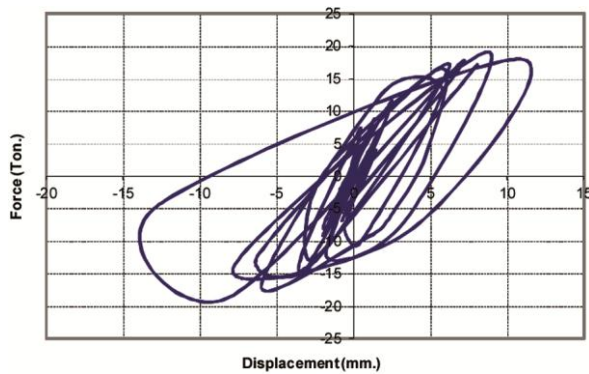
(الف): پایه شماره ۱

شکل (۲۸): منحنی‌های هیستریزس پایه‌های پل تحت زلزله کوبه.

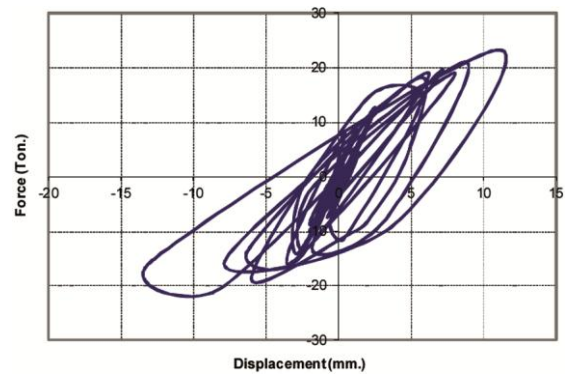


(ب): کوبه

(الف): طبس



(د): ال سترو



(ج): نورثریج

شکل (۲۹): منحنی‌های هیستریزس میراگرهای استفاده شده در سازه پل.

اتصالات آنها نیز باید به دقت انجام شود تا عملکرد مناسبی در جذب انرژی و کاهش پاسخ‌ها داشته باشد.

تقدیر و تشکر

همه مطالعات و آزمایش‌ها روی میراگر فلزی آکاردئونی مورد اشاره در این مطالعه در پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله انجام شده است. لذا بدین وسیله از زحمات مسئولین محترم پژوهشگاه به خصوص آزمایشگاه قدردانی می‌شود.

مراجع

1. Motamedi, M. and Nateghi, A.F. (2006) Effect of geometrical parameters on damping characteristics of accordion metallic dampers. *7th International Congress of Civil Engineering*, Tarbiat Modares, Tehran, Iran (in Persian).
2. Motamedi, M. and Nateghi, A.F. (2004) Using accordion thin-walled tube as a Hysteretic metallic damper. *13th World Conference on Earthquake Engineering*, Vancouver, Canada, Paper No. 2264.
3. Motamedi, M. (2005) *Experimental Study of Application of Metallic Damper in Seismic Retrofitting of Steel Building Frames*. Ph.D. Thesis, Islamic Azad University, Science & Research Branch, Tehran, Iran (in Persian).

با بررسی منحنی‌های هیستریزس نیرو- تغییر مکان اعضا قبل و بعد از نصب میراگرها مشاهده می‌شود که سطح زیر منحنی‌های هیستریزس پس از نصب میراگر افزایش یافته است و اصطلاحاً منحنی‌ها چاق تر شده‌اند که این مسئله نشانگر اتلاف انرژی بیشتر در اعضای سازه پس از نصب میراگر است.

۱۱- نتیجه‌گیری

پس از بررسی کامل روی تمام منحنی‌های به دست آمده از تحلیل غیرخطی پل مورد نظر برای چهار شتاب‌نگاشت ذکر شده و مقایسه نتایج تاریخچه زمانی تغییر مکان‌های پل مورد مطالعه در دو حالت با و بدون میراگر و منحنی‌های هیستریزس ارائه شده به نظر می‌رسد که میراگر AMD تأثیر مثبتی در کاهش پاسخ‌های لرزه‌ای پل‌ها دارد.

همچنین با توجه به منحنی‌های هیستریزس نیرو- تغییر مکان مربوط به میراگرها به نظر می‌رسد که این میراگرها جذب و اتلاف انرژی قابل قبولی در خود داشته‌اند.

همان‌طور که از نتایج فوق برمی‌آید، میراگر فلزی آکاردئونی می‌تواند به عنوان یک گزینه مناسب در مقاوم‌سازی لرزه‌ای پل‌ها به کار رود و تأثیر مثبتی در کاهش پاسخ‌ها و همچنین جذب انرژی داشته باشد.

با توجه به اهمیت اجرای دقیق پل‌ها، از این نکته نیز نباید گذشت که نصب میراگرهای فلزی آکاردئونی و جزئیات

4. Sekhavati, P. (2007) *Analysis Study of Using Yielding Metal Dampers in Seismic Retrofitting of Bridges*. M.Sc. Thesis, Islamic Azad University, South Branch, Tehran, Iran (in Persian).
5. Motamedi, M. and Nateghi, A.F. (2005) *Study of Seismic Energy Dissipation in Accordion Metallic Dampers*. Report, IIEES.
6. Bulic, M. and Causevic, M. (2006) Seismic Retrofitting of Concrete Bridges. *First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology*, Geneva, Switzerland.
7. CSI Analysis Reference Manual for SAP2000, Etabs, Safe, CSiBridge (2011-2012).

Archive of SID