

یک مطالعه مقایسه ای بر عملکرد ضد زلزله دو نوع جداگر لرزه ای در یک پل پیوسته دو دهانه

سید علی رضا کازرونیان^۱

دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی زلزله دانشگاه آزاد اسلامی واحد بوشهر

شیراز-کدپستی ۷۱۸۷۷۳۴۶۵۹

Alireza.kazeroonian@gmail.com

خلاصه

پلها بخش مهمی از شبکه حمل و نقل هر کشور و پیوند حیاتی و ارتباطی آنها به شمار رفته و به عنوان سیستم های سازه ای نسبتا ساده ، جایگاه ویژه ای نزد طراحان سازه دارد اما علی رغم سادگی سازه ای ، نتوانستند تحت زلزله های مختلف در سطح توقع طراحان عمل کنند . آسیب های گسترده وارده به پل ها در زلزله های مخرب ، لزوم توجه بیشتر به عملکرد لرزه ای آنها را اجتناب ناپذیر نموده است . یک مسئله اساسی در طراحی لرزه ای این سازه ها ، فرکانس طبیعی ارتعاش آنهاست . فرکانس طبیعی این سازه ها در ناحیه ای است که بیشترین مقدار انرژی زلزله وارد سازه شده و مسئله تشدید پیش می آید. از طرف دیگر مسائلی مانند ارزیابی توان باربری فعلی که در اکثر موارد به لزوم انجام بهسازی پل ها منجر می گردد مهندسین طراح را به سوی استفاده از سازوکارهای مکانیزم فعال یا غیر فعال سوق می دهد . در این میان ، مسئله کنترل ارتعاش سازه ها ایده ای موثر خواهد بود . جداسازی پایه یک روش طراحی کنترل غیرفعال در رفتار لرزه ای سازه ها می باشد که منجر به ارتقاء ظرفیت عملکردی سازه می شود . در این مطالعه یک پل نمونه که مشابه پل های احداث شده در کشور می باشد جهت به سازی با روش جداسازی لرزه ای انتخاب شده و اثر دو نوع عمده جداگر لرزه ای ، مورد بررسی قرار گرفته است . این پل برای سه حالت با پایه گیردار ، با جداگر لاستیکی - سربی و جداگر آونگ اصطکاکی مدل سازی شده است . مدل های فوق تحت نگاشت السنترو قرار گرفته و با نرم افزار تحلیلی SAP ۲۰۰۰ آنالیز تاریخچه زمانی غیر خطی انتگرال مستقیم شده اند . نتایج بیانگر آن است که بکارگیری سیستم های جداساز لرزه ای در مدل های مختلف در کاهش پاسخ لرزه ای ، ضریب شتاب ، انرژی انتقالی به عرشه و افزایش توان باربری پل ، موثر است .

کلمات کلیدی : تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی غیرخطی انتگرال مستقیم ، پل ، جداساز لاستیکی - سربی ، جداساز آونگ اصطکاکی ، جداسازی لرزه ای

مقدمه

روش مرسوم طراحی مقاوم در برابر زلزله برای پل ها افزایش مقاومت یا افزایش ظرفیت جذب انرژی (معرف شکل پذیری) اجزای آن است . این شکل پذیری در بردارنده خسارت بوده ، در نتیجه روش طراحی مرسوم از فروپاشی پل جلوگیری می کند ولی مانع خسارت وارده به پل نمی شود [۱] . کشور ایران به علت قرار گرفتن در کمربند لرزه ای آلپ-همیالیا ، از مناطق زلزله خیز جهان به شمار می رود. در سالهای گذشته چندین زلزله بزرگ و متوسط در کشور روی داده است که موجب ویرانی انواع سازه ها و ابنیه فنی و خسارات جانی و مالی فراوانی شده است . آخرین زلزله که سبب مرگ هزاران تن انسان بیگناه و جمع کثیری از هموطنانمان شد ، زلزله بم در سال ۱۳۸۲ می باشد . بنابراین لازم است نسبت به بهسازی و مقاوم سازی سازه ها هر چه سریع تر اقدام گردد . روشهای متعددی برای مقاوم سازی سازه ها پیشنهاد گردیده است که یک روش مدرن ، جداسازی با استفاده از جداسازهای لرزه ای می باشد . یکی از اهداف جداسازهای لرزه ای ، افزایش پیوند اصلی سازه و دور نگه داشتن این پیوند از پیوند اصلی و ایجاد اتلاف انرژی می باشد . سیستم های جداساز لرزه ای به دو دسته جداگرهای اصطکاکی و جداگرهای لاستیکی تقسیم می شوند. پایین بودن سختی برشی جداگرهای لاستیکی ، باعث افزایش پیوند و فاصله گرفتن از پیوند غالب زلزله و در نهایت کاهش نیروهای وارده به پل می گردند ولی جداگرهای اصطکاکی توسط لغزش سطوح اصطکاک بر روی یکدیگر باعث افزایش پیوند و میرایی سازه و در نهایت کاهش نیروهای وارده به آن می گردند [۲] . برای مقایسه ابتدا مدل کامل سه بعدی پل جداسازی شده و نشده که شامل المان های روسازه و زیرسازه خطی و المان های جداگر غیرخطی می باشند به وسیله نگاشت مقیاس شده السنترو ، توسط نرم افزار SAP۲۰۰۰ تحلیل تاریخچه زمانی غیر خطی انتگرال مستقیم شده اند . تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی روشی تحلیلی است برای تعیین بازتاب ها در هر مقطع زمانی در مدت وقوع زلزله در یک سازه وقتی که سازه در تراز پایه تحت تاثیر شتابهای ناشی از حرکت

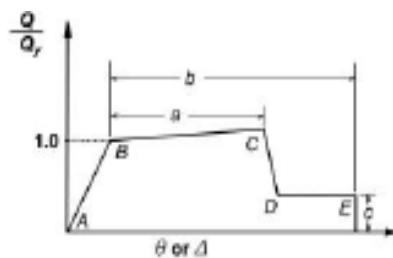
^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد زلزله دانشگاه آزاد اسلامی واحد بوشهر ، ۰۷۱۱-۶۳۶۰۶۸۰

زمین هنگام زلزله قرار می گیرد . در این روش بازتاب های دینامیکی سازه که تابعی از زمان است بوسیله انتگرال گیری عددی معادله حرکت سازه محاسبه می گردد . از این روش می توان برای تحلیل خطی و یا تحلیل غیرخطی سازه ها استفاده نمود [۳] . در نهایت نتایج تحلیل ها شامل برش پایه در جهات عرضی و طولی پل ، جابجایی جانبی وسط عرشه و انرژی ورودی زلزله و نحوه اتلاف آن بررسی می شود .

مدلسازی پل مورد مطالعه

مدلسازی سیستم پل جداسازی نشده

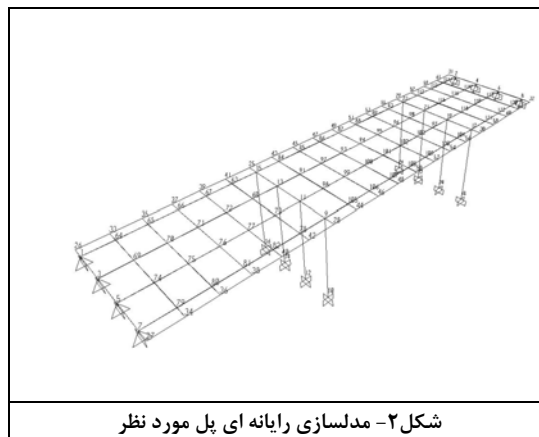
به منظور مقایسه نتایج پاسخ های نیرو و تغییر مکان در پل های جداسازی شده نسبت به حالت جداسازی نشده ، پل به صورت سه بعدی مدل شده و با نرم افزار SAP2000 تحلیل تاریخچه زمانی انتگرال مستقیم گردیده است . در حالت جداسازی نشده ، در اجزای پل مفصل پلاستیک تعریف شده که می تواند رفتار غیرخطی موضعی اجزاء پل را مدل نماید . به دو انتهای تیرها مفصل خمشی (M) و به دو انتهای ستون ها مفصل خمشی-محوری (PMM) (در مدل اختصاص داده شده است و از منحنی نیرو-تغییر مکان داده شده برای سازه پل در آیین نامه FEMA356 برای مدلسازی مطابق شکل ۱ استفاده شده است . پارامترهای a، b و c در این منحنی با توجه به ابعاد و شرایط فشردگی مقطع و مقدار نیروی محوری در ستون ها ، از آیین نامه FEMA356 تعیین می شوند [۴] . شیب قسمت سخت شدگی کرنشی (شیب قسمت B-C) برای تمام مفاصل ۳٪ در نظر گرفته شده است .



شکل ۱- منحنی نیرو-تغییر شکل تعمیم یافته

مدلسازی سیستم پل جداسازی شده

مدلسازی و تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی پل جداسازی شده با استفاده از نرم افزار ۱۱,۰۸,۰۰۰ SAP2000 NONLINEAR VER [۵] انجام شده است . فرض این تحقیق بر این است که المان های روسازه و زیرسازه در محدوده خطی باقی می مانند ، بنابراین در تحلیل ها ، زیرسازه پل توسط المان frame و دال عرشه پل توسط المان shell که هر دو دارای رفتار خطی می باشند ، مدل شده اند . نمودار شماتیک دوبعدی پل مورد مطالعه در شکل ۲ و مشخصات آن در جدول ۱ ارائه شده است .



شکل ۲- مدلسازی رایانه ای پل مورد نظر

جدول ۱- مشخصات هندسه پل

طول کل پل	۴۵ متر
عرض پل	۱۱ متر
اندازه دهانه ها	۱۰،۲۰،۱۵ متر
ارتفاع پایه ها	۸ متر
قطر هر ستون پایه	۱ متر
ابعاد شاهتیرها	۴/ در یک متر
ضخامت دال عرشه	۱۵ سانتی متر
سیستم عرشه	تیر و دال بتن آرمه
بار مرده آسفالت	۱.۵۴ Kn/m^2

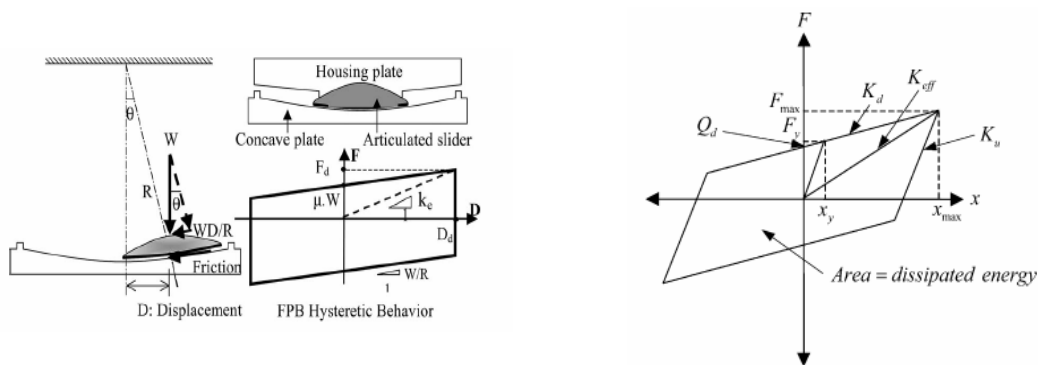
شرح تجهیزات مستهلک کننده انرژی

جداساز لاستیکی - سربی LRB

جداسازهای با هسته سربی همواره به صورت اجزای دو خطی مدل می‌شوند که خواص آنها بر مبنای سه پارامتر k_1 ، k_2 و Q مطابق شکل ۳ می‌باشد. اندازه گیری سختی ارتجاعی k_1 دشوار است به همین دلیل معمولاً به صورت یک ضریب تجربی از k_2 (سختی پس از تسلیم) در نظر گرفته می‌شود. مقدار k_2 را می‌توان با دقت مناسب از روی مدول برشی الاستیک و طرح جداساز به دست آورد. مقاومت مشخصه Q ، محل برخورد حلقه پس‌ماند با محور نیرو بوده و بر مبنای مساحت هسته سربی با دقت قابل تعیین است.

جداگر پاندول اصطکاکی FPD

جداکننده‌های لرزه‌ای مبتنی بر لغزش می‌باشند. سیستم پاندول اصطکاکی نوع جدیدی از سیستم‌های اصطکاکی می‌باشد که اساس کار آن مشابه پاندول نوسانی است و پیوند آن همانند یک پاندول آویزان محاسبه می‌شود. کارایی این سیستم نیز بر پایه افزایش پیوند در اثر لغزش و افزایش میرایی در اثر اصطکاک است. میزان جابجایی پیوند بستگی به شعاع انحنا سطح مقعر دارد. با این سیستم جداسازی پیوند ۲ تا ۴ ثانیه برای اکثر سازه‌ها قابل دسترسی است. میرایی اصطکاکی هیسترتیک اتصالاتی از این نوع، به جذب انرژی ورودی کمک می‌نماید. این رفتار شبیه اتصال برش بادبند خارج از مرکز در یک قاب است. خاصیت مهم اتصالات پاندولی این است که سختی جانبی اتصال متناسب با وزن تحمل شده توسط اتصال است. بنابراین مرکز عکس العمل تکیه گاهها با مرکز جرم سازه مطابقت خواهد داشت. این سیستم‌ها بین روسازه و زیرسازه پل‌ها نصب می‌شوند. در شکل ۴ جزئیات ظاهری و منحنی هیستریزس یک نمونه جداساز پاندول اصطکاکی نشان داده شده است.



شکل ۳- منحنی هیستریزس نیروی برشی بر حسب جابجایی سیستم جداساز لاستیکی - سربی

شکل ۴- جزئیات، عملکرد و هیستریزس نیرو- جابجایی جداساز آونگ اصطکاکی

طراحی جداسازهای لرزه ای

در این مقاله از مرجع [۶] برای طراحی سیستم جداساز LRB و از ضوابط آیین‌نامه UBC-۹۷ برای طراحی سیستم جداساز FPD استفاده شده است [۷]. پارامترهای اساسی در طراحی جداسازها در جداول ۲ و ۳ آورده شده است. پارامترهای منعکس در جداول زیر از جداول و روابط عنوان شده در مراجع مربوطه بدست آمده است.

جدول ۲- پارامترهای سیستم جداساز لرزه ای الاستومری با هسته سربی [۶]

نوع جداساز	T (ثانیه)	میرایی موثر	Q (kN)	D_D (cm)	k_1 (kN/m)	k_2 / k_1	f_y (kN)	k_{eff} (kN/cm)
LRB	۲	۰/۰۶	۹۷	۲۰/۵	۳۱۵/۳۱	۰/۱۳۸	۱۱۴	۴۸/۵

جدول ۳- پارامترهای سیستم جداساز پاندول اصطکاکی [۷]

نوع جداساز	T (ثانیه)	R (m)	K_1 (KN/m)	K_2 (KN/m)	Q (kN)	W_D (KN.m)	μ	K_{eff} (KN/m)	β_{eff}
FPD	۲	۱	۹۶۷۲۸	۹۶۷/۲۸	۴۸/۳۶	۳۹/۷۸	۰/۰۴	۱۲۰۹/۱۱	۰/۱

عملکردهای اصلی سیستم های جداسازی لرزه ای

بطور کلی سیستم های جداسازی لرزه ای می بایست دارای سه جزء اصلی با عملکردهای مربوطه به شرح زیر باشند :

الف) جزء نرم کننده که پریود ارتعاشات سازه با سیستم جداساز را به میزان کافی افزایش داده و موجب کاهش شتاب جذب شده توسط سازه می گردد .

ب) جزء میراکننده انرژی که جهت کاهش جابجایی پایه و کنترل حداکثر مقدار این جابجایی در محدوده قابل قبول ضروری می باشد .

ج) سیستم تامین کننده صلبیت در برابر بارهای جانبی کم قدرت : بدیهی است که با افزایش قابلیت انعطاف پذیری سازه و نرمتر شدن سازه بعلت جداسازی از ارتعاشات زلزله ، سازه ای که در مقابل کلیه بارهای جانبی بدون هیچگونه محدودیتی به ارتعاش در آید به هیچ وجه مطلوب و قابل قبول نمی باشد لذا کلیه سیستم های جداسازی لرزه ای می بایست به مکانیزم خاص جهت تامین صلبیت مورد نیاز سازه تحت اثر بارهای جانبی مانند باد و زلزله های ضعیف مجهز باشند .

در هر پروژه ای با توجه به دمای محل ، اهمیت سازه و تاسیسات مهم و حیاتی و خصوصیات زمین شناسی محلی (مجاورت به گسل ، خاک محل) ، تاریخچه زلزله های ثبت شده در منطقه و شکل و سیستم سازه و همچنین مصالح بکار رفته و هر عامل شناخته شده دیگر در مورد خصوصیات احتمالی زلزله (شدت و زمان تناوب و ...) ، برخی از مشخصات جداگر مهمتر از مشخصات دیگر آن می باشد . به همین دلیل می بایست در مرحله اولیه طراحی ، چندین نوع سیستم جداگر مورد مطالعه قرار گیرد تا بر آن اساس گزینه بهینه مشخص و انتخاب شود .

اصول جداسازی لرزه ای

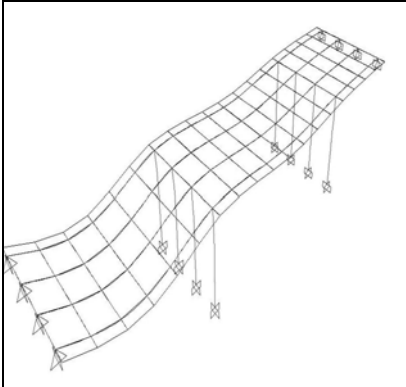
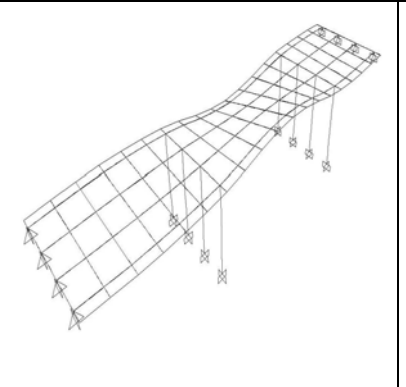
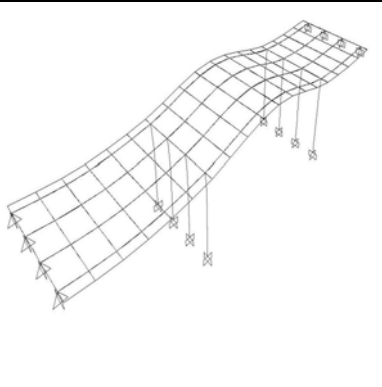
فلسفه موجود در جداسازها ، افزایش پریود ارتعاش سازه است تا بتوان برش پایه بوجود آمده بوسیله زلزله را کاهش داد ، در حالیکه با اضافه کردن میرایی بتوان جابجایی نسبی در طول خود جداسازها را نیز کاهش داد . میرایی ویسکوز در واقع ، راهی برای اتلاف انرژی می باشد که سازه می تواند این انرژی را توسط هیستریسیس ، اصطکاک و در کل به صورت نوعی از پاسخ غیرالاستیک ، اتلاف نماید . علاوه بر این ، باید جداسازها دارای سختی کافی تحت اثر بارهای سرویس ، باد و یا زلزله های خفیف باشند برای این که ارتعاشات مکرر آزار دهنده را به ساکنین سازه وارد نکنند . بوسیله این وسایل ، پریود طبیعی سازه به طور چشم گیری افزایش می یابد و از محدوده فرکانسهای بالای مضر زلزله ها دور می شود . سیستم جداسازی و اتلاف انرژی مخصوصا برای پل ها ، به علت خصوصیات ویژه سازه ای آنها ، اهمیت زیادی دارد . در رابطه با طراحی یک پل مقاوم ذکر این نکته ضروری است که این پل ها می بایست طوری طراحی شوند که تحت حرکت لرزه ای به صورت الاستیک باقی بمانند . برای خاکهای سخت ، حرکت زمین بیشتر مرکب از اجزای با فرکانس بالا می باشد ، در حالیکه برای خاکهای نرم ، آن بوسیله اجزای با فرکانس های کوتاه مشخص می شود . پس بنظر می رسد ایده جداسازی لرزه ای بیشتر در خاکهای سخت امکان پذیر باشد .

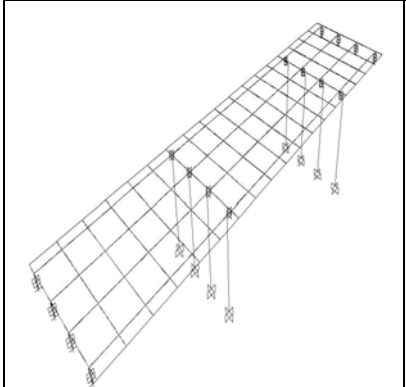
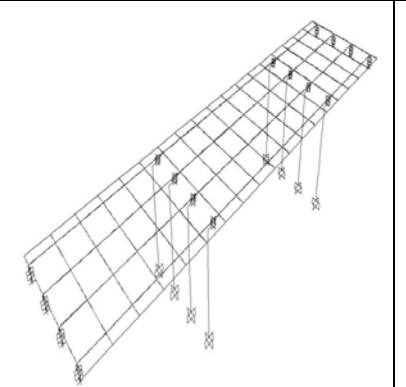
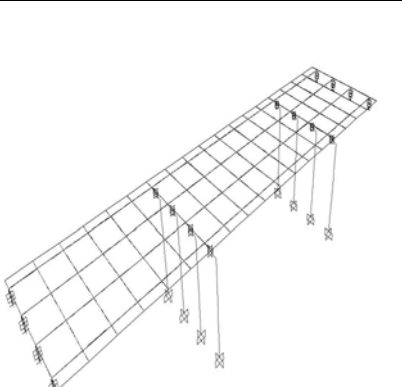
رکورد زمین لرزه مورد استفاده در تحلیل دینامیکی غیرخطی

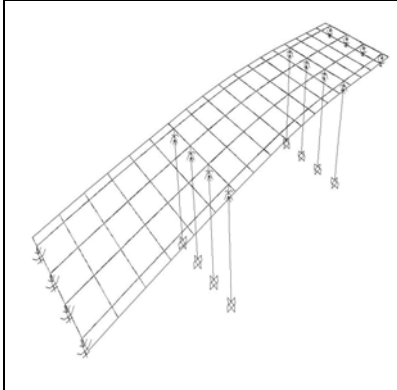
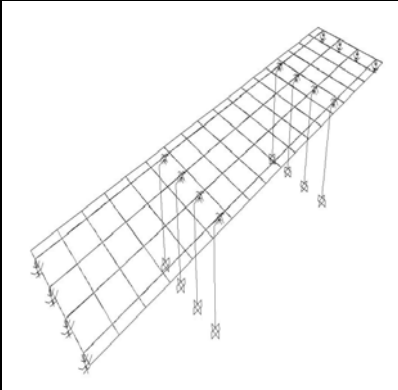
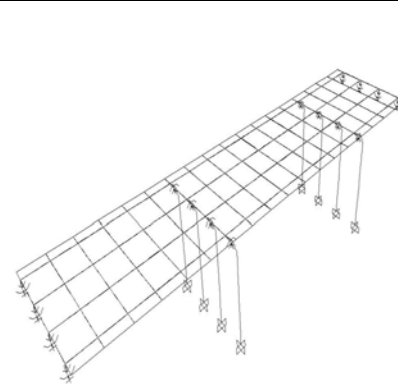
به منظور بررسی نحوه رفتار مدل ارائه شده، مدل مذکور تحت تاثیر شتاب نگاشت معروف السنترو سال ۱۹۴۰ قرار گرفته است. این زلزله در سه جهت به پل اعمال شده است که عبارتند از: دو جهت افقی و یک جهت قائم که به ترتیب با ELCENTRO۱۸۰ و ELCENTRO۲۷۰ و ELCENTRO up نامگذاری شده اند [۸].

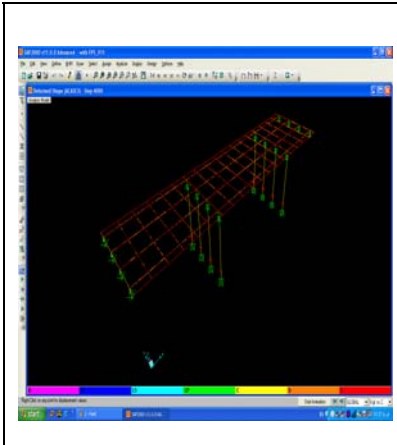
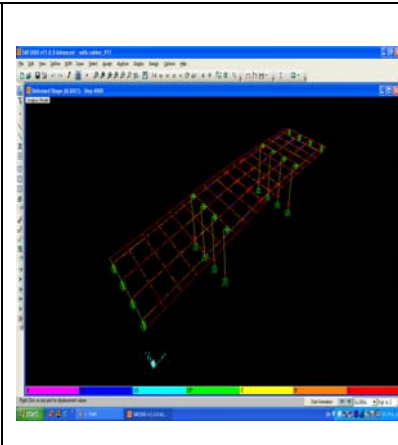
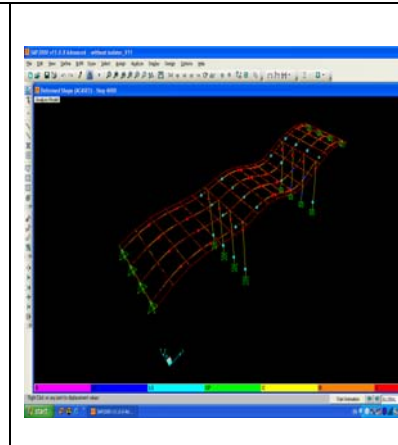
مقایسه نتایج تحلیل و نتیجه گیری

در مرحله اول مدل های تهیه شده با پایه ثابت و با دو نوع پایه جداسازی شده تحت اثرات ناشی از زلزله سه جهته السنترو مورد تحلیل قرار گرفتند. تحلیل های انجام شده، تحلیل دینامیکی غیرخطی است. مقادیر فرکانس های پل برای سه حالت پایه ثابت، با جداساز لاستیکی-سربی و جداساز آونگ اصطکاکی به ترتیب برابر است با ۴، ۰/۴۴۴ و ۰/۵۷ هرتز. این مقادیر نشان می دهد سیستم سازه پل با نصب جداساز لاستیکی-سربی بسیار نرم تر از حالت پایه ثابت و زمانی است که سیستم جداساز آونگ اصطکاکی نصب می باشد. نمودارهای مربوط به تغییر مکان های طولی و عرضی پل و برش پایه در جهت طولی و عرضی در دو حالت جداسازی شده و نشده در این قسمت نشان داده شده اند.

		
شکل ۵- مود اول خمشی پل با تکیه گاه ثابت $T=۰/۲۵ \text{ sec}$	شکل ۶- مود دوم پیچشی پل با تکیه گاه ثابت $T=۰/۲۰ \text{ sec}$	شکل ۷- مود سوم خمشی پل با تکیه گاه ثابت $T=۰/۱۸ \text{ sec}$

		
شکل ۸- مود اول پل با جداساز لاستیکی-سربی $T=۲/۲۵ \text{ sec}$	شکل ۹- مود دوم پل با جداساز لاستیکی-سربی $T=۲/۲۳ \text{ sec}$	شکل ۱۰- مود سوم پل با جداساز لاستیکی-سربی $T=۱/۶۶ \text{ sec}$

		
شکل ۱۳- مود سوم پل با جداساز آونگ اصطکاکی $T=1/1 \text{ sec}$	شکل ۱۲- مود دوم پل با جداساز آونگ اصطکاکی $T=1/7 \text{ sec}$	شکل ۱۱- مود اول پل با جداساز آونگ اصطکاکی $T=1/73 \text{ sec}$

		
شکل ۱۶- تشکیل مفصل پلاستیک در پل با جداساز آونگ اصطکاکی تحت اثر بار زلزله	شکل ۱۵- تشکیل مفصل پلاستیک در پل با جداساز لاستیکی-سربی تحت اثر بار زلزله	شکل ۱۴- تشکیل مفصل پلاستیک در پل با تکیه گاه ثابت تحت اثر بار زلزله

جدول ۴- پارامترهای دوره تناوب اصلی و فرکانس پل

فرکانس (هرتز)	دوره تناوب اصلی (sec)	حالت تحلیل
۴	۰/۲۵	بدون جداسازی لرزه ای و اعمال زلزله سنترو
۰/۴۴۴	۲/۲۵	با جداساز لاستیکی - سربی و اعمال زلزله سنترو
۰/۵۷	۱/۷۳	با جداساز پاندول اصطکاکی و اعمال زلزله سنترو

جدول ۵- نتایج تحلیل دینامیکی غیر خطی پل تحت اثر بار زلزله

حداکثر جابجایی سرستون (cm)		جابجایی کف عرشه در جهت قائم (cm)	برش پایه (kN)		حالت تحلیل
y	x		y	x	
۰/۰۸۷	۰/۰۱۴	۰/۳۴	۲۱۵۵	۳۱۴/۹	بدون جداسازی لرزه ای و اعمال زلزله السنترو
۱۷/۹۸	۲۰/۵	۱/۶۸	۸۴۵	۱۰۰۰	با جداساز لاستیکی - سربی و اعمال زلزله السنترو
۱۵/۷۵	۱۲/۱۰	۸/۳	۹۲۳/۶	۶۶۰/۸	با جداساز پاندول اصطکاکی و اعمال زلزله السنترو

نتیجه گیری

در این مقاله توانایی و مزایای جداگرهای لرزه ای بعنوان ابزار کنترل غیرفعال نیروهای زلزله که به طراحان اجازه می دهد نیروهای زلزله وارد بر پایه ها و کوله های پل را کاهش داده و یا متعادل کنند ، به خوبی به اثبات رسید . با دقت در نتایج حاصل از تحلیل می توان گفت که جداگرها سطح نیروهای جانبی ناشی از زلزله را پایین آورده و با انحراف و جذب عمده انرژی ورودی زلزله ، از اجزای زیرسازه پل محافظت می نمایند .

بکارگیری سیستم جداساز لرزه ای بنوع روشی نوین در جهت کاهش نیاز سازه پل در مقایسه با افزایش ظرفیت برای بهسازی لرزه ای پل ها از جایگاه ویژه ای برخوردار است . بر اساس مطالعه صورت گرفته در تحقیق حاضر می توان به نتایج ذیل اشاره نمود :

پل ها از جمله سازه های با اهمیت زیاد محسوب می شوند که باید به عملکرد لرزه ای آن ها توجه ویژه ای مبذول داشت . براساس مطالعه صورت گرفته در مطالعه حاضر ، رفتار لرزه ای این پل مورد ارزیابی قرار گرفته است . سیستم های جداساز عبارتند از : سیستم جداساز لاستیکی-سربی و سیستم جداساز آونگ اصطکاکی . رفتار پل مورد نظر در حالت پایه ثابت و مجهز به سیستم های جداساز پایه تحت اثر نیروی ناشی از بارهای لرزه ای سه جهته زلزله السنترو تحلیل شده اند . کاهش نیاز سازه با استفاده از سیستم های محافظ لرزه ای در مقابل افزایش ظرفیت در روشهای معمول بعنوان یک روش نوین برای بهسازی پلها بکار برده می شود .

با بکاربردن سیستم جداسازی لرزه ای ، اعضاء و المان های سازه در محدوده الاستیک باقی می مانند . این امر از پدید آمدن مفاصل پلاستیک و تغییرشکل های ماندگار جلوگیری می کند .

استفاده از جداساز لرزه ای ، تغییرمکان نسبی عرشه را نسبت به دو روش دیگر بسیار افزایش می دهد که می تواند منجر به افزایش احتمال سقوط عرشه از پایه گردد .

در این مطالعه ، دوره تناوب اساسی پل در هر دو حالت جداسازی شده ، حدود ۹ برابر دوره تناوب اساسی پل در حالت جداسازی نشده می باشد . در پل جداسازی شده با جداساز آونگ اصطکاکی و جداساز لاستیکی-سربی ، برش پایه در جهت طولی نسبت به حالت جداسازی نشده افزایش داشته است اما برش پایه در جهت جانبی کاهش اساسی داشته است .

براساس تحلیل های انجام شده ، در اثر اعمال زلزله به پل رفتار غیرخطی در پای ستون ها مشاهده شده است ولی با قرار دادن جداگرها نیروهای برش پایه تا اندازه ای کاهش یافته است و زیرسازه پل به صورت الاستیک باقی ماندند .

در اینجا فقط مقادیر بدست آمده از تحلیل های این پل ارائه شده است و جمع بندی برروی نتایج آن به ارزیابی های کامل تر موکول می گردد .

مراجع

۱. مجری زهرائی مهدی (۱۳۸۵) آشنایی با جداسازهای لرزه ای و تاثیر آنها بر عملکرد پل ها وزارت راه و ترابری ، معاونت آموزش ، تحقیقات و فناوری ، پژوهشکده حمل و نقل ، تهران .
۲. Dai, Moroni, Roesset & Sarrazin, (۲۰۰۶) Effect of Isolation Pads and Their Stiffness of the Dynamic Characteristics of Bridge, pp ۱۲۹۸ – ۱۳۰۶ .
۳. تهرانی زاده محسن ، حامدی فرزانه (۱۳۷۸) جداسازی لرزه ای در مقابل زلزله پژوهشکده بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله ، تهران.
۴. دستورالعمل بهسازی لرزه ای ساختمان های موجود (۱۳۸۵) نشریه شماره ۳۶۰ ، سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور ، معاونت امور اداری ، مالی و منابع انسانی ، مرکز مدارک علمی ، موزه و انتشارات ، تهران .
۵. SAP ۲۰۰۰ (۲۰۰۷) Analysis Reference Manual , Version ۱۱,۰,۸ , Computers and Structures Inc . , Berkeley ,USA .
۶. Naeim and Kelly (۱۹۹۱) Design of Seismic Isolated Structures , from Theory to Practice , John Wiley & Sons , New York , USA .
۷. International Conference of Building Officials, Earthquake Regulations for Seismic-Isolated Structures.(۱۹۹۷) Uniform Building Code, Appendix Chapter ۱۶, Whittier, CA .
۸. <http://peer.berekely.edu/smcat/search.html>