



ارزیابی عملکرد جداساز غلطکی درون قفس بر رفتار خرابی پیش‌رونده پل‌های کابلی مطالعه موردی پل کابلی بیل امرسون

محمد اسماعیل نیا عمران^{۱*}، عباس حسینی کرانی^۲

^۱ استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران

^۲ دانشجوی دکترا، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه کردستان سنندج، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸/۰۳/۱۰

بازنگری: ۱۳۹۸/۰۵/۰۷

پذیرش: ۱۳۹۸/۰۹/۲۴

ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۰۵/۳۱

کلمات کلیدی:

پل کابلی

جداساز غلطکی درون قفس

مکانیسم خودنگهدار

لرزه‌ی حوزه‌ی نزدیک گسل

خرابی پیش‌رونده

حذف کابل

خلاصه: بروز خرابی در یک عضو سازه چنانچه منجر به خرابی دیگر عضوهای سازه شود، می‌تواند ایمنی سازه را تهدید نماید. این پدیده که اخیراً مورد توجه طراحان و مهندسان قرار گرفته، خرابی پیش‌رونده شناخته می‌شود. خرابی پیش‌رونده به خصوص در زمان وقوع زمین لرزه‌های شدید، می‌تواند پایداری سازه‌ها را به طور کلی مورد تهدید قرار داده و منجر به انهدام آن‌ها شود. در این پژوهش سعی شده تا عملکرد پل‌های کابلی جداسازی شده با استفاده از جداسازهای نوین غلطکی درون قفس تحت بارهای لرزه‌ای حوزه‌ی نزدیک گسل و بعد از حذف یک کابل از آن مورد مطالعه قرار گیرد. به همین منظور پل کابلی جداسازی شده‌ی بیل امرسون تحت سه رکورد لرزه‌ای حوزه‌ی نزدیک و بعد از حذف یک کابل مورد بررسی قرار گرفته و تاثیر مکانیسم خودنگهدار جداساز غلطکی درون قفس بر ممانعت از وقوع خرابی پیش‌رونده در پل مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد استفاده از جداساز غلطکی درون قفس با مکانیسم خودنگهدار موجب افزایش سختی جداساز و نیروی مقاوم آن تا ۱۰ برابر شده که کاهش نیروی کابل‌های مجاور کابل حذف شده را تا ۳۰ درصد موجب می‌گردد. در نتیجه جابجایی تحت رخدادهای لرزه‌ای حوزه‌ی نزدیک گسل و تحت پدیده‌ی حذف کابل تا حدود ۴۵ درصد کاهش می‌یابد. در مواردی که گسیختگی در بحرانی‌ترین حالت، یعنی خرابی در کابل متصل‌کننده‌ی انتهای عرشه به بالای پایه، مکانیسم خودنگهدار باعث جلوگیری از توسعه‌ی خرابی به کابل‌های مجاور شده است. این در حالی است که عدم استفاده از جداساز غلطکی درون قفس و مکانیسم خودنگهدار موجب گسترش خرابی و به طبع آن بروز خرابی پیش‌رونده و انهدام کامل می‌گردد.

۱- مقدمه

برخورد اتومبیل و... صدمه موضعی در ناحیه نسبتاً کوچکی از سازه رخ می‌دهد و در شرایطی این آسیب موضعی به بخش‌های دیگری از سازه گسترش یافته و سازه به دلیل نقص در پیوستگی، کمبود شکل‌پذیری و نا معینی آسیب وارده را پخش و در نهایت منجر به فروپاشی کلی سازه یا بخشی از آن می‌گردد. در پی اولین بروز خرابی، سازه برای انتقال باری که پیش از این توسط عضو حذف شده تحمل می‌شد، به جستجوی مسیرهای بار جایگزین در قسمت‌های سالم می‌پردازد. از آنجایی که احتمالاً قسمت‌های جانبی مقاومت کافی برای تحمل بار اضافه را ندارند، خرابی در این اجزاء که بار اضافه را تحمل می‌کنند، محتمل است. این رویداد به نوبه‌ی خود باعث انتشار مجدد و بیشتر

یکی از موضوعاتی که اخیراً در مهندسی سازه و تحلیل و طراحی زیرساخت‌های عمرانی به آن توجه بسیار شده است نیز مبحث خرابی پیش‌رونده می‌باشد. علاوه بر این پس از رخداد خرابی مرکز تجارت جهانی، نگرانی تازه‌ای در طراحی سازه‌های فولادی ایجاد شد و آن هم مقاومت در برابر بارهای غیر عادی بود که به خرابی پیش‌رونده سازه منجر می‌شوند. خرابی پیش‌رونده یک واکنش زنجیره‌ای یا انتشار خرابی است که در آن تحت عملی خاص نظیر برخورد هواپیما، انفجار گاز یا مواد منفجره، خطاهای طراحی و ساخت، آتش‌سوزی،

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: m.esmaeilnia@uok.ac.ir



بار شده و تا زمانیکه حالت تعادل حاصل گردد، ادامه خواهد یافت. حال آنکه به علت میزان بار و خاصیت دینامیکی فرایند، حالت توازن ممکن است زمانی حاصل گردد که بخش قابل توجهی از سازه تخریب شده باشد. به همین علت ویژگی اصلی تخریب پیش رونده آن است که، آسیب نهایی بیش از آسیب اولیه‌ای است که خرابی را به وجود آورده است [۱].

از مزایای طراحی سازه‌ها در برابر خرابی پیش رونده می‌توان به این نکته اشاره نمود که: سازه‌ی طراحی شده به این روش، علاوه بر اینکه مقاومت لازم برای مقابله با نیروهای زلزله را دارد، بلکه می‌تواند ایمنی جانی ساکنان خود را پس از تخریب یکی از اعضای باربر خود حفظ کند. به همین سبب آیین نامه‌های مختلفی سعی کرده اند بدین موضوع بپردازند تا علاوه بر افزایش ایمنی سازه به افزایش ایمنی ساکنین منجر شود [۲]. اکثر آیین نامه‌های رایج که پدیده خرابی پیش رونده را مورد بررسی قرار می‌دهند عبارتند از: معیارهای تسهیلات متحد، دپارتمان دفاعی آمریکا، اداره سرویس‌های عمومی آمریکا، جامعه مهندسين آمریکا، استاندارد انگلیسی، استاندارد اروپایی، آیین‌نامه ساختمان ملی کانادا، دستورالعمل‌های ساختمانی شهر نیویورک، دستورالعمل کمیته ایمنی آمریکا. این آیین نامه‌ها و دیگر آیین نامه‌ها فقط دارای توصیه‌های کلی برای تعدیل تاثیر خرابی پیش رونده در سازه‌هایی هستند که فراتر از بارهای طراحی شان بارگذاری را تجربه می‌کنند. لذا همچنان نیاز به ارزیابی سازه‌های مختلف در برابر بارهای ناشی از خرابی پیش‌رونده نیز احساس می‌شود و این مهم در مورد سازه‌های مهم و زیرساخت‌های ملی دوچندان احساس می‌شود [۳]. پل‌های کابلی از جمله زیرساخت‌های مهم هر کشوری می‌باشند که بروز خرابی پیش‌رونده در آن‌ها می‌تواند موجب خسارات جبران ناپذیری شود. لذا در این پژوهش سعی شده‌است به بررسی خسارات ایجاد شده در پل‌های کابلی تحت بارهای دینامیکی ناشی از خرابی پیش‌رونده پرداخته شود.

در سال‌های اخیر به منظور جلوگیری از خسارات ناشی از بارهای دینامیکی در انواع سازه‌ها، روش‌های متعددی به منظور بازسازی، بهسازی و مقاوم سازی توسط مهندسان سازه نیز به کار گرفته شده‌است. جداسازی لرزه‌ای یکی از روش‌های موثر و اقتصادی در زمینه‌ی کنترل غیرفعال سازه‌ها می‌باشد که موجب کاهش انرژی بارهای دینامیکی در سازه به گونه‌ای می‌شود که خسارت وارد شده به

سازه در حد قابل قبولی نیز کنترل شود. در حدود سه دهه از کاربرد جداسازی لرزه‌ای در پل‌ها می‌گذرد و کارایی این نوع پل‌ها همچنان تأیید شده‌است. مفهوم اصلی جداسازی لرزه‌ای یکی افزایش دوره تناوب سازه و دیگری افزایش میرایی سازه یا هردو با هم می‌باشد. این فناوری در مدت سی سال گذشته به سرعت گسترش یافته است، به طوری که امروزه موارد کاربرد زیادی از آن‌ها در سرتاسر دنیا بویژه در زلاندنو، آمریکا، کانادا، ایتالیا، ایسلند، ژاپن و تایوان مشاهده می‌شود. بیشترین تعداد پل در زلاندنو (بیش از ۵۰ عدد) جداسازی لرزه‌ای شده‌اند. به هر حال، تعداد پل‌های مجهز به جداگرهای لرزه‌ای که زلزله‌های حقیقی را تجربه کرده باشند بسیار کم است، در نتیجه، داده‌های ثبت شده‌ی بسیار اندکی در مورد پاسخ چنین پل‌هایی موجود است و کارایی آن‌ها نسبت به زلزله‌های قوی باید در عمل اثبات شود. به هرصورت، جمع آوری و تجزیه و تحلیل داده‌های موجود ارزشمند می‌باشد [۴]. توانایی و مزایای تکیه‌گاه‌های جداگر به عنوان ابزار کنترل نیروهای جانبی که به طراحان اجازه می‌دهد نیروهای دینامیکی وارد بر پایه‌ها و کوله‌های پل را کاهش داده و یا منحرف کنند، به خوبی به اثبات رسیده است. از این تکیه‌گاه‌ها می‌توان به نحو مؤثری در مقاوم سازی پل‌های موجود و یا طراحی سازه پل‌های جدید واقع در نواحی لرزه خیز و یا در برابر بارهای دینامیکی ناشی از خرابی پیش‌رونده بهره برد. تکیه‌گاه‌های جداگر مورد استفاده در جداسازی لرزه‌ای پل‌ها معمولاً در زیر عرشه پل و روی پایه‌ها و کوله‌ها قرار می‌گیرند [۵].

در این بین یکی از سیستم‌های جداساز نوینی که بر اساس سیستم نرم شونده-سخت شونده مورد استفاده قرار گرفته است، سیستم جداساز لرزه‌ای غلطکی درون قفس^۱ می‌باشد که در این پژوهش سعی بر آن است عملکرد آن در پل‌های کابلی مورد بررسی قرار گیرد. مطالعات متعدد اشکالات کاربردی متعددی را در اغلب جداسازها نشان می‌دهند که با معرفی جداسازهای نوین سعی در برطرف کردن آن‌ها شده‌است. به همین منظور در سال‌های اخیر جداسازهای غلطکی درون قفس معرفی و مورد استفاده قرار گرفته اند [۶]. جداساز غلطکی درون قفس با توجه به سیستم هسته‌ی غلطکی به منظور تأمین بیشترین جداسازی پایه و سازه و همچنین تأمین پایدار تقاضای جابجایی جداساز و بارهای وارده به سازه طراحی شده‌است.

1 Rolled-in-Cage

خرابی پل کابلی در طول عمر مفید آن مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد عمر خستگی پل می‌تواند با توجه به ارزیابی‌های دقیق از جزئیات پل‌های کابلی نیز افزایش یافته و بهینه گردد [۹].

کای و همکاران در سال ۲۰۱۲ به ارزیابی و مقایسه‌ی روش‌های مختلف تحلیل خرابی پیش‌رونده در پل‌های کابلی پرداخته‌اند. در این پژوهش چهار روش بررسی تحلیل خرابی پیش‌رونده در قالب حذف یک یا دو کابل مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد استفاده از ضریب بزرگ نمایی دینامیکی برابر با در مورد استفاده از تحلیل‌های استاتیکی مناسب است. همچنین حداکثر جابجایی ناشی از حذف کابل در روش‌های مختلف استاتیکی و دینامیکی یکسان ارزیابی می‌گردد [۱۰].

محمد اسماعیل و همکاران در سال ۲۰۱۳ بررسی استفاده، مدلسازی و ارزیابی کاربرد جداسازهای رول درون قفس بر روی پل‌های کابلی پرداخته‌اند. در این پژوهش مدل المان محدود سه بعدی پل کابلی با استفاده از جداسازهای رول درون قفس بکارگرفته شده و تحلیل‌های دینامیکی غیر خطی تحت رکوردهای لرزه‌ای مختلف صورت پذیرفته است. نتایج نشان می‌دهد جداساز رول درون قفس ابزاری قابل اتکا و مناسب به منظور ایجاد جداسازی ایزوتروپیک افقی بر روی پل‌های کابلی می‌باشد [۱۱].

محمد اسماعیل و همکاران در مطالعه‌ای دیگر در سال ۲۰۱۳ به بررسی تاثیر استفاده از جداسازهای رول درون قفس بر رفتار پل‌های جداسازی شده پرداخته‌اند. در این مطالعه رفتار لرزه‌ای پل کابلی تحت سه رکورد لرزه‌ای حوزه‌ی نزدیک گسل مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از جداسازهای رول درون قفس رول درون قفس روش مناسبی به منظور مقاوم سازی پل‌های کابلی نوین در برابر بارهای لرزه‌ای حوزه‌ی نزدیک گسل با انرژی سینماتیکی قابل توجه نیز می‌باشد [۱۲].

هان و همکاران در سال ۲۰۱۱ به بررسی توزیع تنش در طول کابل خسارت دیده در پل‌های کابلی پرداخته‌اند. در این پژوهش بر اساس تحلیل المان محدود نیروی داخلی کابل خسارت دیده و توزیع تنش در طول کابل بر روی مقطع خسارت دیده مدل سازی شده است. همچنین پارامترهایی نظیر زاویه‌ی پیچش، تعداد کابل، قطر و تعداد رشته‌های کابل مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد در صورت ایجاد خسارت در کابلی مشخص در پل کابلی اکثر نیرو توسط

مطالعات صورت گرفته نشان می‌دهد که سیستم مذکور عملکرد مناسبی در صلبیت قائم، شکل پذیری افقی و اتلاف هیستریزس انرژی از خود نشان می‌دهد. در سال‌های متمادی محققان متعددی به بررسی خرابی پیش‌رونده و عملکرد پل‌های کابلی جداسازی شده و بهبود عملکرد آن‌ها پرداخته‌اند که در ادامه به برخی از آن‌ها اشاره شده است.

طالب نژاد و همکاران در سال ۲۰۱۱ به ارزیابی خرابی پل‌های کابلی بر اساس روش عددی بر پایه‌ی بررسی ارتعاش سازه نیز پرداخته‌اند. در این پژوهش روش‌های مختلف شناسایی خرابی به منظور ارزیابی خرابی پل‌های کابلی مورد بررسی قرار گرفته است. پل‌های کابلی بیویو و پل کابلی کوئینزی به عنوان مدل‌های مورد مطالعه انتخاب شده‌اند. روش‌های شاخص اطمینان مختصات مودال، روش پارامتر خرابی، روش انحنای شکل مود و شاخص انعطاف‌پذیری مودال به منظور شناسایی و ارزیابی خرابی بکارگرفته شده است. نتایج نشان می‌دهد روش شاخص اطمینان قادر به شناسایی مناسب خرابی نمی‌باشد. روش شاخص انعطاف پذیری، دو تا سه نقطه‌ی خرابی متشکل از نقاط قابل پیش بینی خرابی را به طور مناسبی تشخیص می‌دهد. روش‌های پارامتر خرابی و انحنای مود می‌تواند خرابی در دال و بخش‌های مختلفی از کابل‌های پل را به درستی مشخص نماید [۷].

لی و همکاران در سال ۲۰۱۱ با استفاده از میراگرهای سختی منفی به کنترل پاسخ لرزه‌ای پل‌های کابلی پرداخته‌اند. در این پژوهش میراگرهای سختی منفی بین پایه و عرشه‌ی پل کابلی بر اساس مدل شبه ویسکوالاستیک صورت پذیرفته و رفتار لرزه‌ای پل کابلی مورد نظر و تاثیر سختی میراگر بر اساس مدلسازی عددی مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد در شرایط بهینه‌ی سختی در میراگرهای مورد استفاده، پل کابلی بهترین عملکرد لرزه‌ای را نشان می‌دهد و این در حالی است که سختی بهینه پل در حالت‌های تحلیل خطی و غیرخطی مشابه است [۸].

پیبینتو و همکاران در سال ۲۰۱۲ به ارزیابی تاثیر پدیده‌ی خستگی و ترتیب قرارگیری کابل‌ها بر روی پل‌های کابلی فلزی پرداخته‌اند. با توجه به اهمیت خستگی و ترتیب قرارگیری کابل‌ها بر عملکرد پل‌های کابلی اثر پارامترهای مذکور با توجه به مدل سازی عددی و اثرگذاری بارهای متحرک ناشی از وسایل نقلیه بر روی عرشه‌ی پل بررسی شده است. در ادامه در قالب مطالعه‌ای پارامتریک

هسته‌ی سربی بر پاسخ تحلیل‌های استاتیکی تحت بارهای قائم تاثیر چندانی نداشته اما تحلیل دینامیکی بعد از حذف ستون نشان می‌دهد استفاده از جداساز لرزه‌ای در محدود کردن خرابی‌های ایجاد شده و جلوگیری از گسترش آن به نقاط دیگر سازه بسیار تاثیر گذار است و عملکرد سازه را بهبود می‌بخشد [۱۶].

محمد اسماعیل در سال ۲۰۱۵ به بررسی اثر استفاده از جداگرهای لرزه‌ای رول درون قفس در برابر زلزله‌های حوزه‌ی نزدیک گسل پرداخته است. در این پژوهش با بررسی عملکرد داخلی جداگر مذکور سعی گردیده است عملکرد بهینه‌ی ای بدست آمده و تحت رکوردهای مختلف مورد بررسی قرار گیرد. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد، که جداساز رول درون قفس و دارای بخش نورد شده‌ی داخلی قادر به ارائه‌ی حفاظت کارآمد و مناسب در برابر لرزه‌های حوزه‌ی نزدیک می‌باشد که حتی در دوره تناوب‌های نسبتاً کوچک نیز کارایی خود را خواهد داشت. همچنین علاوه بر توانایی بهینه‌سازی و افزایش کارایی جداسازی لرزه‌ای، مطلقاً هیچ ضربه‌ی درونی تحت زلزله قوی اتفاق نمی‌افتد [۱۷].

شرستا در سال ۲۰۱۵ به ارزیابی پاسخ پل‌های کابلی تحت رکورد قائم زلزله‌های حوزه‌ی نزدیک گسل پرداخته است. در این پژوهش پاسخ پل کابلی با دهانه‌های بلند تحت رکوردهای حوزه‌ی نزدیک گسل در حالت‌های با و بدون تاثیر رکورد قائم لرزه مورد بررسی قرار گرفته است. پنج شتاب نگاشت مختلف با نسبت‌های مختلف شتاب قائم به شتاب افقی انتخاب و پاسخ پل کابلی کارنالی مورد مطالعه قرار گرفته است. همچنین اثر هم‌زمانی نقاط حداکثر شتاب و سرعت رکورد نیز مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد اثر ارتعاش قائم و همچنین اثر هم‌زمانی حداکثر شتاب و سرعت رکورد لرزه‌ای بر روی پل کابلی مورد مطالعه به طور قابل ملاحظه‌ای کم است [۱۸].

داس و همکاران در سال ۲۰۱۶ به ارزیابی تاثیر خرابی پیش‌رونده در پل‌های کابلی پرداخته‌اند. در پژوهش مذکور مدلسازی پدیده‌ی حذف ناگهانی کابل‌های نگهدارنده‌ی دال عرشه و بروز خرابی پیش‌رونده در ادامه‌ی خرابی به‌وجود آمده نیز مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد احتمال بروز خرابی پیش‌رونده در شرایطی که کابل حذف شده نزدیک به پایه پل باشد بسیار بیشتر از حالتی است که کابل حذف شده در فاصله‌ی دورتری از پایه باشد [۱۹].

کابل‌های مجاور تحمل می‌شود و مابقی نیرو به سایر کابل‌ها منتقل می‌گردد. همچنین زمانی که کابل خسارت دیده تعویض می‌گردد، توزیع بار در مقطع کابل‌ها تا زمانی که نیروی کابل به حداکثر خود برسد در حالتی است که کابل‌های مجاور سهمی از انتقال نیرو خواهند داشت. در این میان نرخ بازیابی نیروی کابل بستگی به زاویه پیچش دارد که افزایش زاویه‌ی پیچش به بازیابی شرایط طبیعی کابل را تسریع می‌کند. این در حالی است که افزایش قطر کابل تاثیر نامطلوبی بر سرعت بازیابی نیروی مقطع کابل نشان می‌دهد [۱۳].

لی و همکاران در سال ۲۰۱۴ به ارزیابی قابلیت اطمینان پل‌های کابلی بر اساس تکنیک‌های نظارت بر سلامت سازه پرداخته‌اند. مدل سازی بر اساس بارهای وسایل نقلیه، بارهای مرده و محیطی و همچنین تلاش‌های داخلی سازه مد نظر قرار گرفته است. در این پژوهش شاخص اطمینان سازه بر اساس روش پیشنهادی پژوهش مورد بررسی قرار گرفته است و به عنوان نمونه شاخص اطمینان شاه تیرهای پل کابلی در حالت تعویض و تعمیر بعد از هجده سال از اجرا و شاخص خرابی آن مورد ارزیابی قرار گرفته است [۱۴].

دینگ و همکاران در سال ۲۰۱۴ به تحلیل خرابی تیر جعبه‌ای پل‌های کابلی پرداخته‌اند. در این پژوهش مدل سه بعدی المان محدود پل راینانگ به گونه‌ای مناسب بر اساس بارهای دینامیکی وسایل نقلیه و تست‌های سلامت سازه صحت سنجی شده است. توزیع مناسب تنش در طول تیر جعبه‌ای پل و شناسایی خرابی آن بر اساس روش‌های شاخص انحنای مودال، شاخص انرژی کرنشی مودال و شاخص انعطاف پذیری مودال ارزیابی شده است. نتایج تحلیل‌های مذکور نشان می‌دهد که به منظور دستیابی به ارزیابی مناسب از خرابی پل، اثر خرابی و مولفه‌های آن در تیر جعبه‌ای پل کابلی می‌بایست در تحلیل‌های خرابی به گونه‌ای مناسب لحاظ گردد [۱۵].

توکلی و همکاران در سال ۲۰۱۵ به بررسی تاثیر استفاده از جداساز لرزه‌ای بر افزایش مقاومت در برابر خرابی پیش‌رونده پرداخته‌اند. در مطالعه‌ی مذکور با استفاده از جداسازهای لاستیکی با هسته‌ی سربی به بهبود عملکرد ساختمان‌هایی با تعداد طبقات مختلف در برابر خرابی پیش‌رونده پرداخته شده است. قاب خمشی بتنی با شرایط تکیه گاهی ثابت و جداسازی شده با استفاده از تحلیل‌های استاتیکی غیرخطی پوش داون و تحلیل دینامیکی غیر خطی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد استفاده از جداساز لاستیکی با



شکل ۱. نمایی از پل کابلی بیل امرسون در آمریکا [۱۲]

Fig. 1. Bill Emerson Memorial Cable Stayed Bridge in USA

متر و ارتفاع ۱۵۰ متر می باشد که بر اساس پژوهش صورت گرفته توسط محمد اسماعیل و همکاران [۱۲] در سال ۲۰۱۳ انتخاب و مدلسازی شده است. پل کابلی مذکور ساخته شده در دو حالت با و بدون جداساز لرزه ای نیز مورد ارزیابی و صحت سنجی قرار گرفته است. شکل ۱ نمایی از پل کابلی بیل امرسون را نمایش می دهد. شکل ۲ عرشه و مقطع عرضی پل کابلی بیل امرسون را نشان می دهد و همچنین شکل ۳ نحوه ی محل های جداسازی پل مورد مطالعه و مقاطع مورد استفاده در پایه های پل را نمایش می دهد.

مدل سازه ای مورد استفاده پل کابلی بیل امرسون در آمریکا می باشد که توسط هشت جداساز لرزه ای غلطکی درون قفس در چهار نقطه از عرشه ی پل و در دو طرف آن بکار گرفته شده است. در شکل ۳- الف محل بکارگیری جداسازهای استفاده شده نمایش داده شده است. مدل سه بعدی تحلیل المان محدود پل کابلی در نرم افزار اپنسیس مدلسازی شده و بارگذاری و تحلیل دینامیکی غیر خطی بر روی آن صورت پذیرفته است. مدل پل کابلی در دو حالت (۱) بدون جداساز لرزه ای (۲) با جداساز لرزه ای غلطکی درون قفس در دو انتهای عرشه و در محل اتصال عرشه به پایه های پل مورد مطالعه قرار گرفته است. در حالت بدون جداساز جابجایی انتهای عرشه در راستای پل آزاد در نظر گرفته شده است و محل اتصال عرشه و پایه های پل به صورت اتصال مفصلی در نظر گرفته شده و چرخش حول محور عمود بر پل در این اتصال باز در نظر گرفته شده است. همچنین از اثرات اندرکنشی سازه و خاک صرف نظر شده است. المان های پایه های پل و عرشه با استفاده از المان های تیر-ستون نیرویی مدلسازی شده اند. ۱۲۸ کابل مورد استفاده در پل با استفاده از المان های خرپایی با رفتار کششی و پیش تنیدگی مدلسازی شده اند. لازم به توضیح

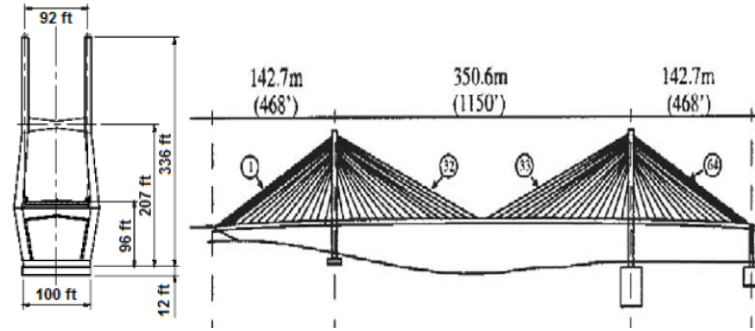
وی و همکاران در سال ۲۰۱۶ به ارزیابی پاسخ لرزه ای پل های کابلی با سیستم های جداساز عایق نورد با توزیع اصطکاک مقعر پرداخته اند. در این پژوهش سعی شده است به بهبود عملکرد جداساز عایق نورد شده بر اساس فرض افزایش خطی اصطکاک عایق نورد شده نسبت به افزایش فاصله ی جداساز و زمین، پرداخته شود. در نهایت مدل سازی عددی پل تحت رکوردهای لرزه ای مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می دهد توزیع مقعر اصطکاک به تنهایی نمی تواند انرژی لرزه را مستهلک نماید. اما باعث می گردد دوره تناوب اصلی پل تغییر نماید [۲۰].

الانانی و تایت در سال ۲۰۱۷ به ارزیابی جداسازهای تقویت شده با الیاف الاستومری به منظور استفاده در پل های جداسازی لرزه ای شده پرداخته اند. در این پژوهش مطالعه ای آزمایشگاهی و عددی بر روی جداسازهای الیاف الاستومری صورت پذیرفته است. رفتار جانبی پل تحت بارهای قائم و جابجایی های چرخشی به منظور بررسی پایداری پل های جداسازی شده ارزیابی شده است. همچنین تنش ها و کرنش های جداساز در بیشترین جابجایی ها مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می دهد استفاده از جداسازهای الیاف الاستومری برای بارهای جانبی و قائم مناسب بوده اما برای استفاده در برابر بارهای چرخشی نیاز به بررسی های بیشتر وجود دارد [۲۱].

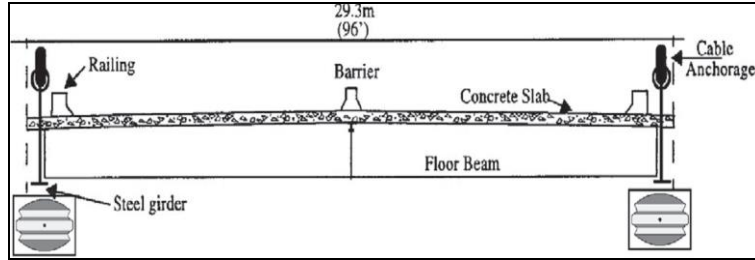
با مطالعه ی مقالات و متون موجود در این زمینه مشخص می شود که تاثیر استفاده از جداسازهای غلطکی درون قفس بر روی رفتار خرابی پیش رونده ی پل های کابلی در مطالعات قبلی مورد توجه قرار نگرفته است. در نتیجه ی این پژوهش بر روی ارزیابی تاثیر استفاده از جداسازهای غلطکی درون قفس در برابر بارهای دینامیکی خرابی پیش رونده ناشی از حذف یک یا چند کابل تمرکز می کند. به همین منظور پل کابلی بیل امرسون بدین منظور انتخاب شده است. سپس پل کابلی مورد مطالعه در سناریوهای مختلف حذف کابل مورد مطالعه قرار گرفته است.

۲- مدل سازه ای

پل کابلی یادبود بیل امرسون پل سه دهانه ای است که بر روی رود می سی سی پی واقع شده است و ایالت های میسوری و ایلینویز را مرتبط می کند. این پل در مجموع به طول یک و دو دهم کیلومتر (شامل بخش اصلی ۶۵۰ متری به صورت کابلی)، عرض بیست و نه

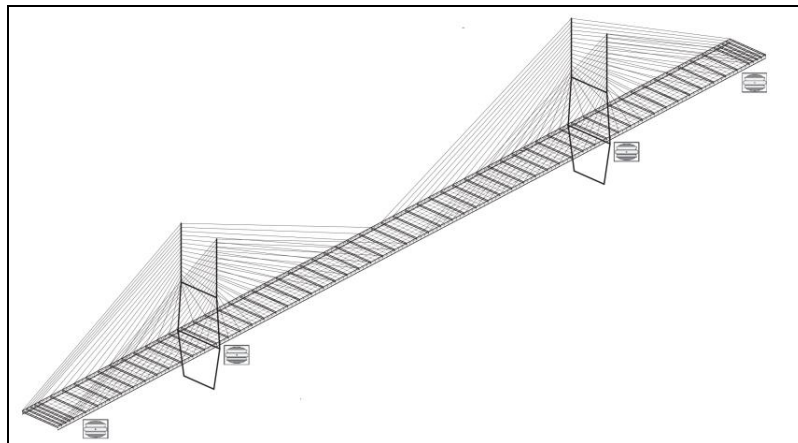


(الف)

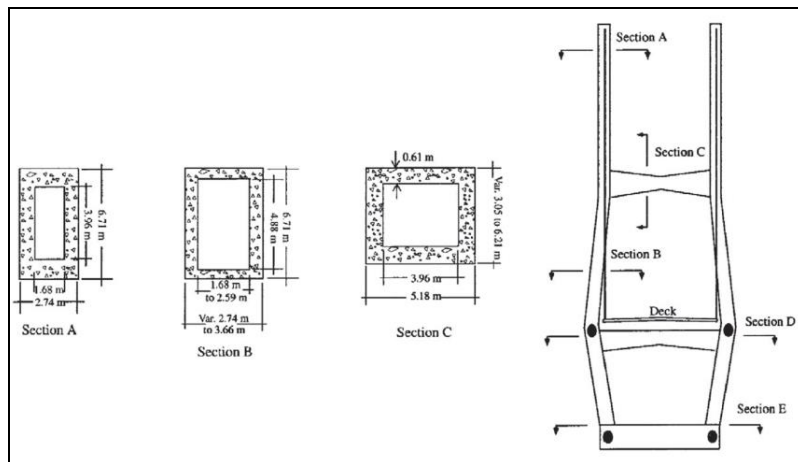


(ب)

شکل ۲. پل کابلی بیل امرسون (الف) مقطع عرضی (ب) عرشه پل [۱۲]
Fig. 2. Cable-stayed bridge (a) Longitudinal dimensions (b) Deck section

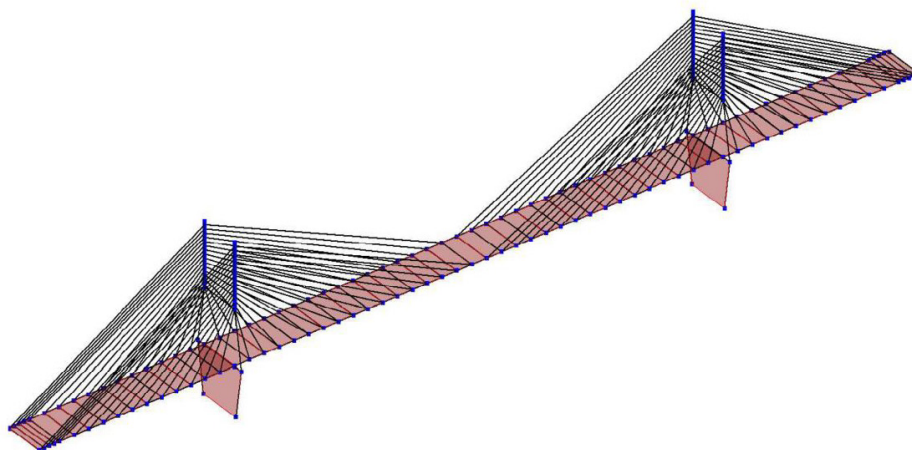


(الف)



(ب)

شکل ۳. (الف) محل‌های جداسازی پل بیل امرسون (ب) مقاطع مورد استفاده در پایه‌های پل [۱۲]
Fig. 3. (a) RNC isolator locations (b) Towers sections



شکل ۴. مدل پل کابلی بیل امرسون در نرم افزار اپنسیس
Fig. 4. Cable stayed bridge model in Opensees

جدول ۱. مختصات مربوط به کابل های پل بیل امرسون [۲۲]

Table 1. Cable coordinates of the Bill Emerson Cable Stayed Bridge

شماره کابل	مختصات اتصال در انتهای پایه ی پل (m)		مختصات اتصال در انتهای عرشه پل	
	X*	Z*	X	Z
۱	-۱.۷۶	۹۴.۶۴	-۱۴۰.۴۸	۲۰.۱۳
۲	-۱.۷۶	۹۳.۱۲	-۱۳۶.۸۲	۲۰.۲۸
۳	-۱.۷۶	۹۱.۵۹	-۱۳۳.۱۶	۲۰.۴۰
۴	-۱.۷۶	۹۰.۰۷	-۱۲۹.۵۳	۲۰.۵۳
۵	-۱.۷۶	۸۸.۵۱	-۱۲۶.۰۰	۲۰.۶۲
۶	-۱.۷۵	۸۷.۰۲	-۱۱۵.۴۱	۲۰.۹۸
۷	-۱.۷۳	۸۵.۵۲	-۱۰۴.۸۶	۲۱.۳۵
۸	-۱.۷۲	۸۴.۰۰	-۹۴.۳۱	۲۱.۷۵
۹	-۱.۷۳	۸۲.۵۰	-۸۳.۸۱	۲۲.۱۱
۱۰	-۱.۷۱	۸۱.۰۱	-۷۳.۲۹	۲۲.۴۸
۱۱	-۱.۷۱	۷۹.۵۱	-۶۲.۷۷	۲۲.۸۸
۱۲	-۱.۸۲	۷۷.۹۰	-۵۲.۲۵	۲۳.۲۷
۱۳	-۱.۸۴	۷۶.۰۷	-۴۱.۸۲	۲۳.۶۱
۱۴	-۱.۸۴	۷۴.۰۲	-۳۱.۳۲	۲۴.۰۰
۱۵	-۲.۳۵	۷۰.۳۹	-۲۰.۸۶	۲۴.۳۷
۱۶	-۲.۳۷	۶۵.۱۲	-۱۰.۴۰	۲۴.۸۳

X* در راستای طول عرشه

Z* در راستای ارتفاع پایه ی پل

کابل ها در هر طرف آن با استفاده از المان های رابط صلب مدل سازی شده اند. در ادامه و در شکل ۴ مدل پل کابلی مورد بررسی نمایش داده شده است.

است که تیر های عرشه ی پل با استفاده از المان های خطی (المان های تیر و ستون نیرویی) و دال عرشه با استفاده از المان صفحه ای چهار گره ای مدل سازی شده اند. اتصال پایه و عرشه ی پل به انتهای

جدول ۲. مشخصات مربوط به کابل های پل بیل امرسون [۲۲]

Table 2. Mechanical properties of the cables

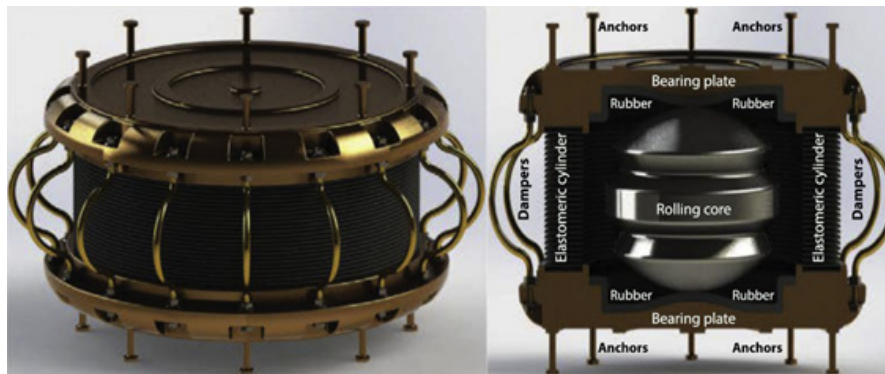
شماره کابل	طول (m)	قطر بیرونی (m)	مدول یانگ (GPa)	کشش کابل (KN)	چگالی (Kg/m ³)	وزن واحد حجم (KN/m ³)	وزن واحد طول (KN/m)
۱	۱۵۷.۴۷	۰.۲۷	۱۵.۵۸	۴۵۳۷.۲۰	۲۵۹۳.۶۰	۲۵.۴۵	۱.۴۹
۲	۱۵۳.۴۵	۰.۲۷	۱۵.۵۸	۴۷۵۸.۸۰	۲۵۹۳.۶۰	۲۵.۴۵	۱.۴۹
۳	۱۴۹.۴۵	۰.۲۷	۱۵.۰۲	۴۵۳۷.۲۰	۲۵۴۴.۰۰	۲۴.۹۶	۱.۴۶
۴	۱۴۵.۴۵	۰.۲۲	۱۹.۰۷	۴۳۵۹.۲۰	۲۷۶۳.۲۰	۲۷.۱۱	۱.۰۲
۵	۱۴۱.۵۸	۰.۲۲	۱۸.۰۶	۴۱۶۲.۹۰	۲۷۲۸.۰۰	۲۶.۷۷	۱.۰۱
۶	۱۳۱.۴۶	۰.۲۲	۱۷.۳۸	۴۰۱۰.۷۰	۲۶۸۸.۰۰	۲۶.۳۸	۰.۹۹
۷	۱۲۱.۴۵	۰.۲۲	۱۶.۷۱	۳۸۰۶.۹۰	۲۶۸۸.۰۰	۲۶.۳۸	۰.۹۹
۸	۱۱۱.۵۷	۰.۲۲	۱۶.۷۱	۳۶۸۱.۹۰	۲۶۸۸.۰۰	۲۶.۳۸	۰.۹۹
۹	۱۰۱.۹۰	۰.۱۸	۲۴.۵۶	۳۲۷۲.۱۰	۲۸۸۹.۶۰	۲۸.۳۵	۰.۷۳
۱۰	۹۲.۴۵	۰.۱۸	۲۳.۷۳	۲۹۹۲.۲۰	۲۸۳۲.۰۰	۲۷.۷۹	۰.۷۲
۱۱	۸۳.۳۰	۰.۱۸	۲۲.۹۰	۲۸۳۱.۹۰	۲۷۷۴.۴۰	۲۷.۲۲	۰.۷۰
۱۲	۷۴.۳۳	۰.۱۸	۲۲.۰۸	۲۶۳۰.۸۰	۲۷۱۶.۸۰	۲۶.۶۶	۰.۶۹
۱۳	۶۵.۹۷	۰.۱۷	۱۹.۲۲	۲۴۹۷.۸۰	۲۷۵۰.۴۰	۲۶.۹۹	۰.۶۰
۱۴	۵۸.۰۴	۰.۱۷	۱۷.۰۰	۲۰۶۰.۸۰	۲۶۸۳.۲۰	۲۶.۳۳	۰.۵۸
۱۵	۵۱.۵۸	۰.۱۷	۱۵.۹۰	۱۸۲۰.۹۰	۲۶۱۶.۰۰	۲۵.۶۷	۰.۵۷
۱۶	۴۵.۰۵	۰.۱۷	۱۵.۳۴	۱۶۹۱.۹۰	۲۶۱۶.۰۰	۲۵.۶۷	۰.۵۷

۳- مدل سازی جداساز لرزه ای غلطکی درون قفس

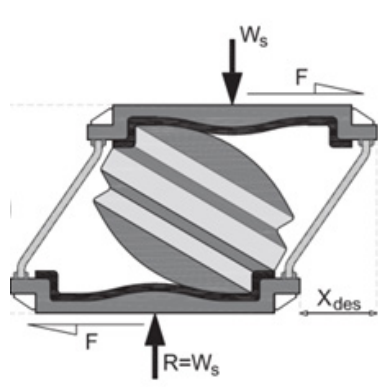
در سال های متمادی و تا حال حاضر جداسازهای لرزه ای بر اساس اصول فیزیکی مورد تاییدی به کار گرفته شده اند. اما همچنان نقاط ضعف عملکردی در این ابزارها مشاهده می گردد که در جهت ارتقاء این نقاط ضعف تلاش های متعددی صورت پذیرفته است. در همین راستا جداساز غلطکی درون قفس در سال های اخیر پیشنهاد شده است. این جداساز در شکل ۵-الف نمایش داده شده است. جداساز غلطکی درون قفس با توجه به سیستم هسته ی غلطکی به منظور تأمین بیشترین جداسازی پایه و سازه، حداقل انتقال نیروی دینامیکی و همچنین تأمین پایدار تقاضای جابجایی جداساز و بارهای وارده به سازه طراحی شده است. سیستم مذکور به طور همزمان صلبیت قائم، شکل پذیری افقی، پایداری، اتلاف هیستریزیس انرژی و انتقال حداقل

بارهای ارتعاشی را تأمین می کند. اگر چه هسته نورد شده ی داخلی شبه بیضی است، اما جداساز با توجه به انحنا ی داخلی صفحات اتکایی بالا و پایین در طول حرکت، جداسازی را با کمترین نوسان عمودی ایجاد می نماید.

سیستم جداساز غلطکی درون قفس دارای سه مشخصه ی اساسی است: (۱) مکانیسم خود نگهدار در ارتعاش های شدید که با استفاده از سپر فبری دور جداساز و هندسه ی غلطک در جابجایی های بیشتر از جابجایی سطح عملکرد طراحی ایجاد می گردد و به صورت سختی ذخیره شده در انتهای سیکل چرخش جداساز به وجود می آید (شکل ۵-ب). در واقع بعد از آنکه جداساز جابجایی حد طراحی را تجربه کرد با استفاده از قفل گوی درون جداساز و قفس دور آن جداساز یک سختی ذخیره شده ای را بدست می آورد و می تواند



(الف)



(ب)

شکل ۵. (الف) جداساز لرزه غلطکی درون قفس و بخش های مختلف آن (ب) ایست خودکار درون جداساز بعد از جابجایی طراحی [۱۲]
Fig. 5. (a) Roll-N-Cage (RNC) isolator parts (b) self-braking or buffer mechanism

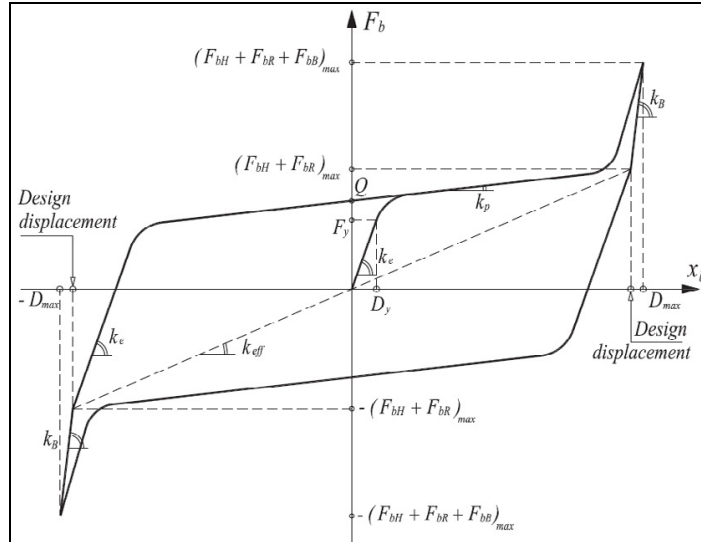
در این رابطه F_b نیروی کلی عکس العمل جداساز غلطکی درون قفس، F_{bH} مولفه هیستریزس جداساز، F_{bR} ولفه‌ی نیروی مرکزگرای غلطک، F_{bB} ولفه‌ی نیروی کششی ذخیره یا خودنگهدار، X_b ابه‌جایی پایه و X_{des} ابه‌جایی حد طراحی جداساز می‌باشند. نمودار عملکردی هیستریزس نیرو- جابه‌جایی جداساز غلطکی درون قفس در شکل ۶ نمایش داده شده‌است.

به‌منظور مدل‌سازی سه مشخصه‌ی جداساز به طور هم زمان در نرم افزار اپنسیس از ماده‌ی موازی^۱ به‌منظور ترکیب سه مشخصه‌ی جداساز استفاده شده‌است. مشخصه‌ی هیستریزس جداساز غلطکی درون قفس با استفاده از مدل ماده‌ی هیسترتیک بوس-ون^۲ مدل‌سازی شده‌است. در این مدل پارامترهای بی بعد کنترل شکل منحنی هیستریزس رابطه برابر با $A=1$ و $\beta=\gamma=0.5$ در نظر گرفته شده‌است. مکانیسم خطی مرکزگرای مبتنی بر نیروی محوری جداساز

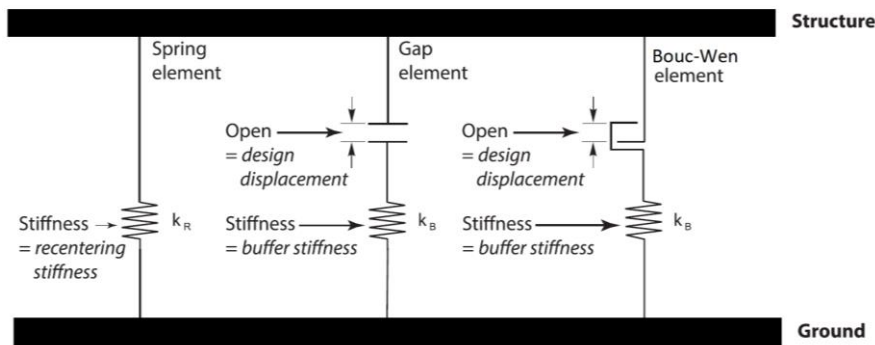
موجب بهبود عملکرد آن شود (۲) مکانیسم خطی مرکزگرای مبتنی بر نیروی محوری جداساز که مانع از ایجاد جابه‌جایی‌های ماندگار در برابر بارهای دینامیکی می‌گردد. (۳) مقاومت کششی یا میرایی ناشی از سپر که با توجه به هندسه و نوع مصالح میراگر بکارگرفته شده درون جداساز و حلقه‌های دور قفس ایجاد می‌گردد. در حالت کلی ترکیب سه مشخصه‌ی جداساز غلطکی درون قفس موجب بهبود عملکرد جداساز و افزایش مقاومت و جذب انرژی آن در مقایسه با دیگر جداسازهای معمول می‌گردد. مدل‌سازی عددی جداساز لرزه‌ای غلطکی درون قفس بر اساس همین سه بخش صورت می‌پذیرد. رابطه‌ی عددی رفتار جداساز غلطکی درون قفس طبق رابطه‌ی^۱ بیان می‌گردد.

$$F_b = \begin{cases} F_{bH} + F_{bR} & \text{if } \rightarrow |X_{bR}| < X_{des} \\ F_{bH} + F_{bR} + F_{bB} & \text{if } \rightarrow |X_{bR}| > X_{des} \end{cases} \quad (1)$$

1 Parallel uniaxial material
2 Bouc-Wen hysteretic material



شکل ۶. منحنی هیستریزس جداساز لرزه‌ای غلطکی درون قفس بر اساس سه مشخصه عملکردی [۱۲]
Fig. 6. Force–displacement relationship curve of RNC isolator



شکل ۷. تصویر شماتیک ترکیب موازی سه ماده‌ی به‌کارگرفته شده به منظور مدل‌سازی مشخصه‌های جداساز
Fig. 7. Schematic image of the Roll-N-Cage (RNC) isolator model

تحت بارهای لرزه‌ای مختلف مورد ارزیابی قرار گرفته است. بدین منظور ابتدا رکوردهای لرزه‌ای جدول ۴ انتخاب و برای انجام تحلیل دینامیکی غیرخطی تاریخچه زمانی مورد استفاده قرار گرفته اند. در انتخاب شتابنگاشت‌ها سعی شده‌است مشخصات آن‌ها از جمله سرعت موج برشی، جهت پذیری، بزرگا، فاصله از مرکز لرزه، حداکثر شتاب، حداکثر سرعت و حداکثر جابه‌جایی در محدوده‌ی مشخص و متناسب با ساختگاه پل باشند. در شکل ۸ ارتفاع پل کابلی تحت سه رکورد سان فراندو، نورث‌ریچ و امپریال والی ترسیم شده‌است. به منظور سهولت در بیان نتایج در شکل ۹ نحوه‌ی شماره گذاری کابل‌های مدل نمایش داده شده‌است. همانطور که مشاهده می‌گردد در هر طرف عرشه ۶۴ کابل عرشه‌ی پل را به پایه‌ها متصل کرده

بر اساس ماده‌ی الاستیک ساده با سختی ثابت K_R دل‌سازی می‌گردد. همچنین مقاومت کششی سپر یا ذخیره‌ی خودنگه‌دار که با توجه به هندسه و نوع مصالح میراگر ایجاد می‌گردد با استفاده از ماده‌ی کششی دارای درز کرنش یا جابه‌جایی با سختی K_B . درز جابه‌جایی X_{des} دل‌سازی می‌گردد. در ادامه در شکل ۷ تصویر شماتیک ترکیب موازی سه ماده‌ی بکارگرفته شده به منظور مدل‌سازی مشخصه‌های جداساز به نمایش در آمده است. مشخصات جداساز در جدول ۳ ارائه شده‌است.

۴- المان‌های کلیدی

در این بخش به‌منظور شناسایی کابل‌های مستعد خرابی، مدل

جدول ۳. پارامترهای جداساز لرزه‌ای غلطکی درون قفس [۱۲]

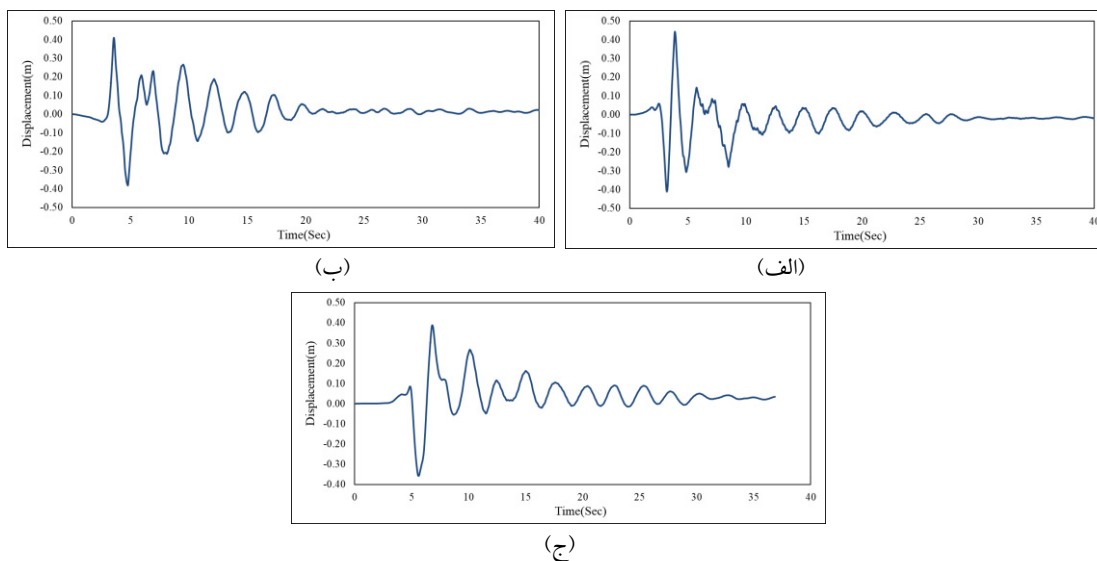
Table 3. Roll-N-Cage (RNC) isolator parameters

پارامترهای مدل‌سازی جداساز RNC	(kN, mm, s)
سختی ذخیره‌ی بافر، kB	۴۹۰۳۳
جابه‌جایی طراحی، Gap	۳۰۰
سختی مکانیسم مرکز گرا، kR	۸.۵۸۰۸
صلبیت قائم	نامحدود
سختی هیترزیس، k	۳.۴۳۲۳
نیروی نظیر تسلیم مکانیسم هیستریزیس	۴۹۰۳۳۳
نسبت سختی تسلیم مکانیسم هیستریزیس	۰.۰۵

جدول ۴. مشخصات رکوردهای لرزه‌ای مورد استفاده [۷]

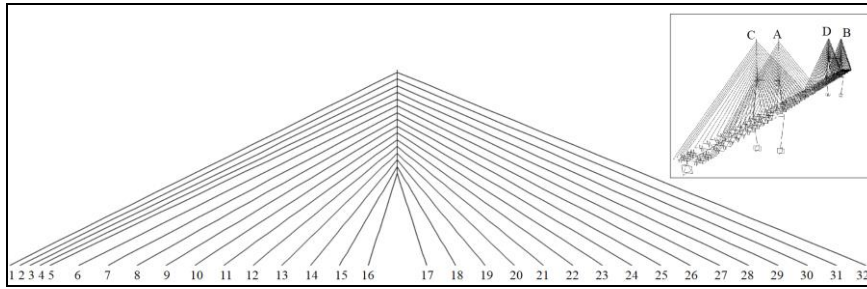
Table 4. Seismic records characteristics

Earthquake name	Station name	Magnitude	Distance to fault (km)	Peak Accel. (g)
San Fernando 1971	Pacoima Dam	6.61	1.8	1.23
Northridge 1994	Sylmar – Conv. SE	6.69	5.2	0.83
Imperial Valley 1979	El Centro Ar.	6.53	0.6	0.46

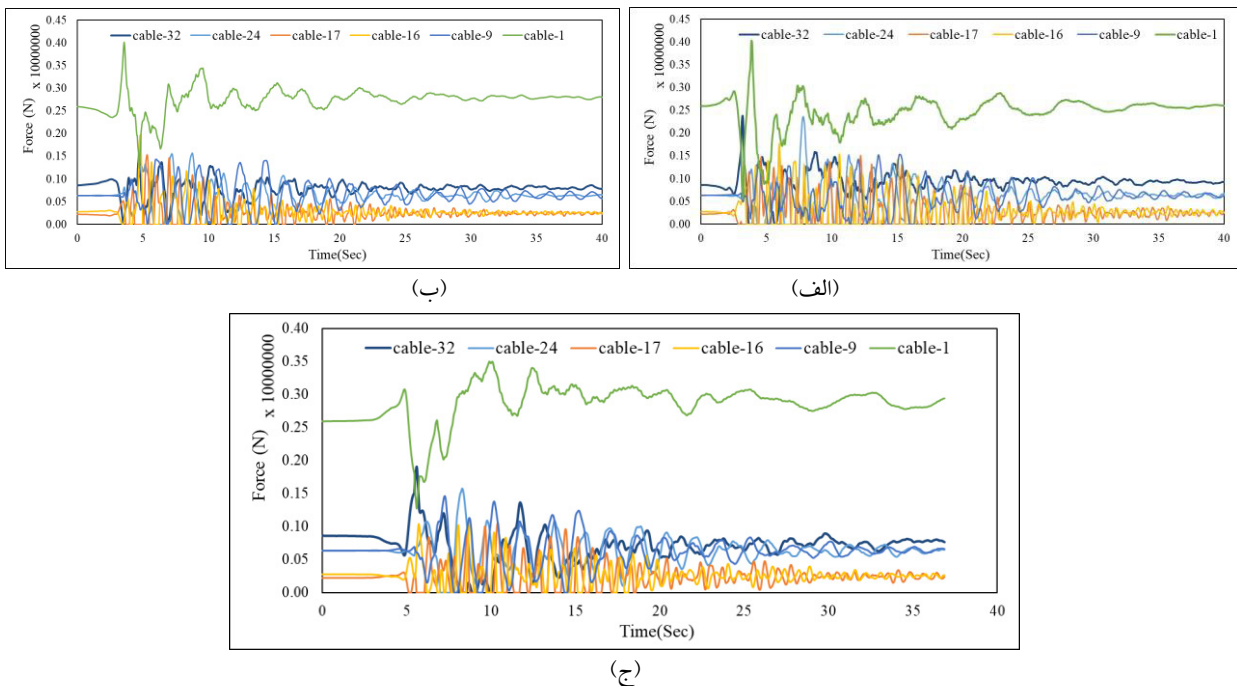


شکل ۸. ارتعاش پل کابلی تحت زلزله‌های (الف) سان فرناندو (ب) نورتریج (ج) امپریال والی

Fig. 8. Cable stayed bridge horizontal displacement under seismic records (a) San Fernando (b) Northridge (c) Imperial Valley



شکل ۹. شماره گذاری کابل‌های متصل به پایه‌های پل مورد بررسی
Fig. 9. Assigned cable numbers



شکل ۱۰. نیروی بوجود آمده در کابل‌ها تحت زلزله‌های (الف) سان فرناندو (ب) نورتریج (ج) امپریال والی
Fig. 10. Cable axial forces under seismic records records (a) San Fernando (b) Northridge (c) Imperial Valley

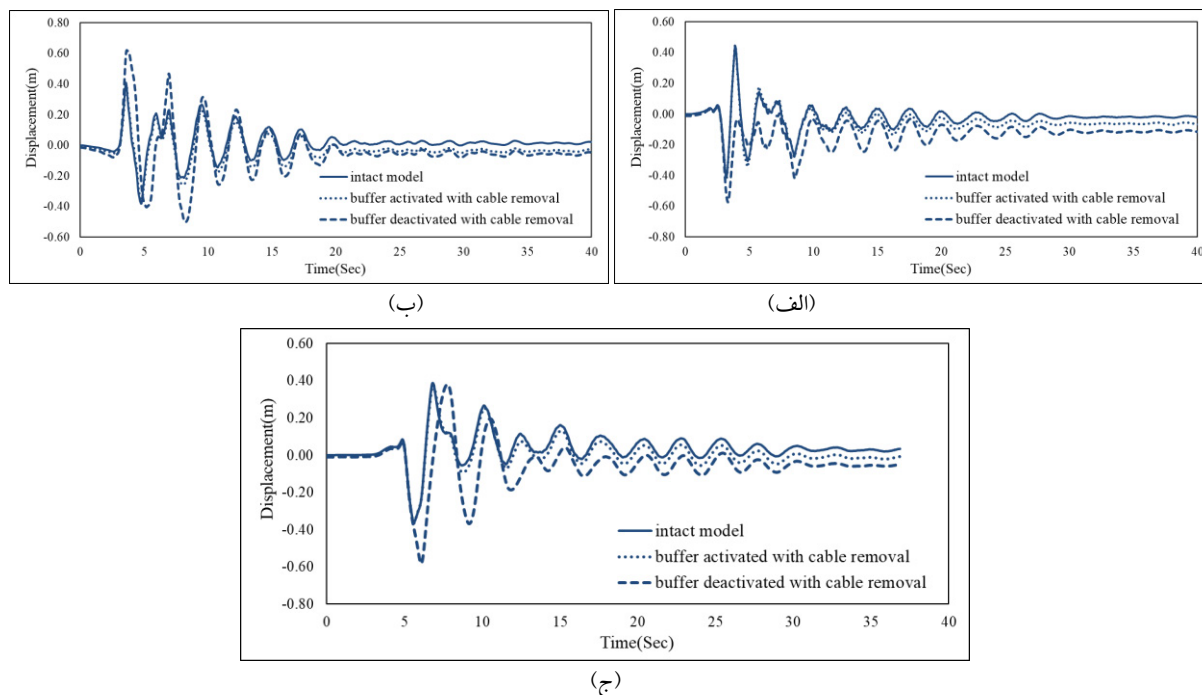
فاصله‌ی کمتری داشته باشند نیروی کمتری را تجربه کرده‌اند. از طرفی کابل‌های انتهایی عرشه که متصل به بالای پایه‌ها هم می‌باشند در مقایسه با کابل‌های متصل به بالای پایه و وسط عرشه نیروی به مراتب بیشتری را تحمل کرده‌اند. لذا احتمال به‌وجود آمدن خرابی در این کابل‌ها از همه بیشتر می‌باشد. بعد از آن کابل‌های وسط عرشه و بعد کابل‌های میانی مستعد خرابی می‌باشند.

۵- ارزیابی خرابی پیشرونده

در این بخش به بررسی عملکرد جداسازهای غلطکی درون قفس تحت بارهای خرابی پیشرونده در حین بارگذاری لرزه‌ای پرداخته

اند که به ترتیب از ۱ تا ۳۲ در دو سمت پایه‌ی A، از ۳۳ تا ۶۴ در دو سمت پایه‌ی B، از ۶۵ تا ۹۶ در دو سمت پایه‌ی C و از ۹۷ تا ۱۲۸ در دو سمت پایه‌ی D نیز شماره گذاری می‌شوند. از آنجا که پیش بینی می‌گردد کابل‌هایی که بیشترین سطح بارگذاری را تجربه نمایند بیشترین احتمال خرابی در آن‌ها می‌باشد، نیروهای ایجاد شده در کابل‌های مختلف مدل در شکل ۱۰ ترسیم شده‌است.

همان‌طور که در شکل ۱۰ مشاهده می‌گردد، کابل‌های متصل به بالای پایه‌های پل بیشترین نیرو را تحمل کرده‌اند و کابل‌های متصل به وسط پایه‌ها و عرشه نیروی کمتر و کابل‌های متصل به پایین پایه کمترین نیرو را تجربه کرده‌اند. در واقع کابل‌ها هرچه از پایه‌ها

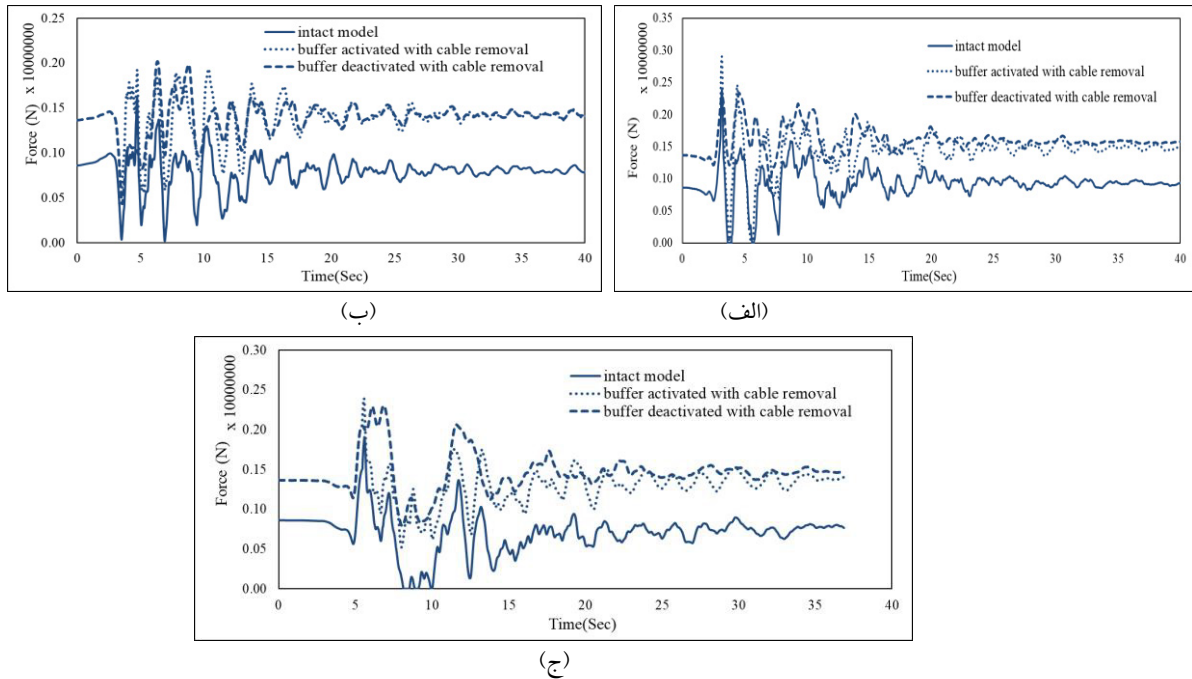


شکل ۱۱. جابه‌جایی عرشه پل کابلی در سه حالت مدل سالم، مدل با حذف کابل ۳۲ در حالت‌های بدون و با مکانیسم خودنگهدار تحت زلزله‌های (الف) سان فرناندو (ب) نورثریج (ج) امپریال والی

Fig. 11. Displacement history of the isolated cable-stayed bridge considering cable 32 removal under seismic records (a) San Fernando (b) Northridge (c) Imperial Valley

درون قفس در شرایطی که مکانیسم خودنگهدار فعال می‌باشد موجب گردیده جابجایی ماندگار و جابجایی حداکثر عرشه تحت رکورد‌های لرزه ای به مراتب کمتر شود. همچنین موجب گردیده کابل‌های مجاور کابل گسیخته شده تاریخچه ی نیرویی با شدت کمتری را چه در مقدار متوسط و چه در نقاط حداکثر نیرویی تجربه نمایند. این میزان کاهش در میزان متوسط تاریخچه نیرویی برای زلزله های سان فرناندو، نورثریج و امپریال والی به ترتیب برابر با ۶ ، ۳۰ و ۱۰ درصد می باشد. کاهش بارهای وارده منجر به کنترل خرابی پیشرونده و جلوگیری از گسترش تسلیم در سایر کابل ها شده است. مکانیسم خودنگهدار همانطور که قبلا توضیح داده شد، در جداساز غلطکی درون قفس مکانیسمی است که در شرایطی که جابجایی جداساز از مقدار طراحی آن عبور کند، وارد عمل شده و با افزایش سختی جداساز، موجب کاهش جابجایی تحت زلزله های سان فرناندو، نورثریج و امپریال والی به ترتیب تا حدود ۱۶ ، ۴۵ و ۲۸ درصد نسبت به حالتی که مکانیسم خودنگهدار فعال نمی باشد نیز می گردد. در شکل های ۱۱ و ۱۲ مشاهده می گردد که جابجایی در عرشه ی پل در شرایطی که پل کابلی، کابل شماره ۳۲ خود را از دست داده و

می‌شود. بدین منظور با توجه به بخش قیل مدل پل کابلی در قالب چهار سناریو تحت سه رکورد لرزه‌ای تحلیل دینامیکی شده‌است. در دو سناریوی اول در شرایط حذف کابل ۳۲ و در دو حالت با و بدون مکانیسم خودنگهدار و در دو سناریوی بعدی در شرایط حذف کابل شماره ۱ و در دو حالت با و بدون مکانیسم خودنگهدار تحلیل صورت می‌گیرد. تحلیل دینامیکی با این فرض صورت می‌گیرد که کابل‌های بحرانی در شروع تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی دچار زوال شده اند و هدف بررسی رفتار سازه بعد از حذف کابل می‌باشد. در شکل ۱۱ جابه‌جایی عرشه‌ی پل کابلی جداسازی شده با جداسازهای غلطکی درون قفس تحت زلزله‌های مختلف در شرایط پل سالم، حذف کابل ۳۲ در دو حالت با و بدون مکانیسم خودنگهدار ترسیم شده‌است. همچنین نیروی کابل‌های مجاور کابل حذف شده در شکل ۱۲ تحت زلزله‌های مورد بررسی ترسیم شده‌است. همانطور که در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ مشاهده می‌گردد، انهدام و حذف کابل موجب بروز جابه‌جایی‌های ماندگار در عرشه‌ی پل می‌گردد و با افزایش نیروی محوری در کابل‌های مجاور می‌تواند احتمال بروز خرابی و گسستگی در این کابل‌ها را مضاعف نماید. استفاده از جداساز غلطکی



شکل ۱۲. نیروی کابل مجاور در سه حالت مدل سالم، مدل با حذف کابل ۳۲ در حالت‌های بدون و با مکانیسم خودنگهدار تحت زلزله‌های (الف) سان فرناندو (ب) نورتریج (ج) امپریال والی

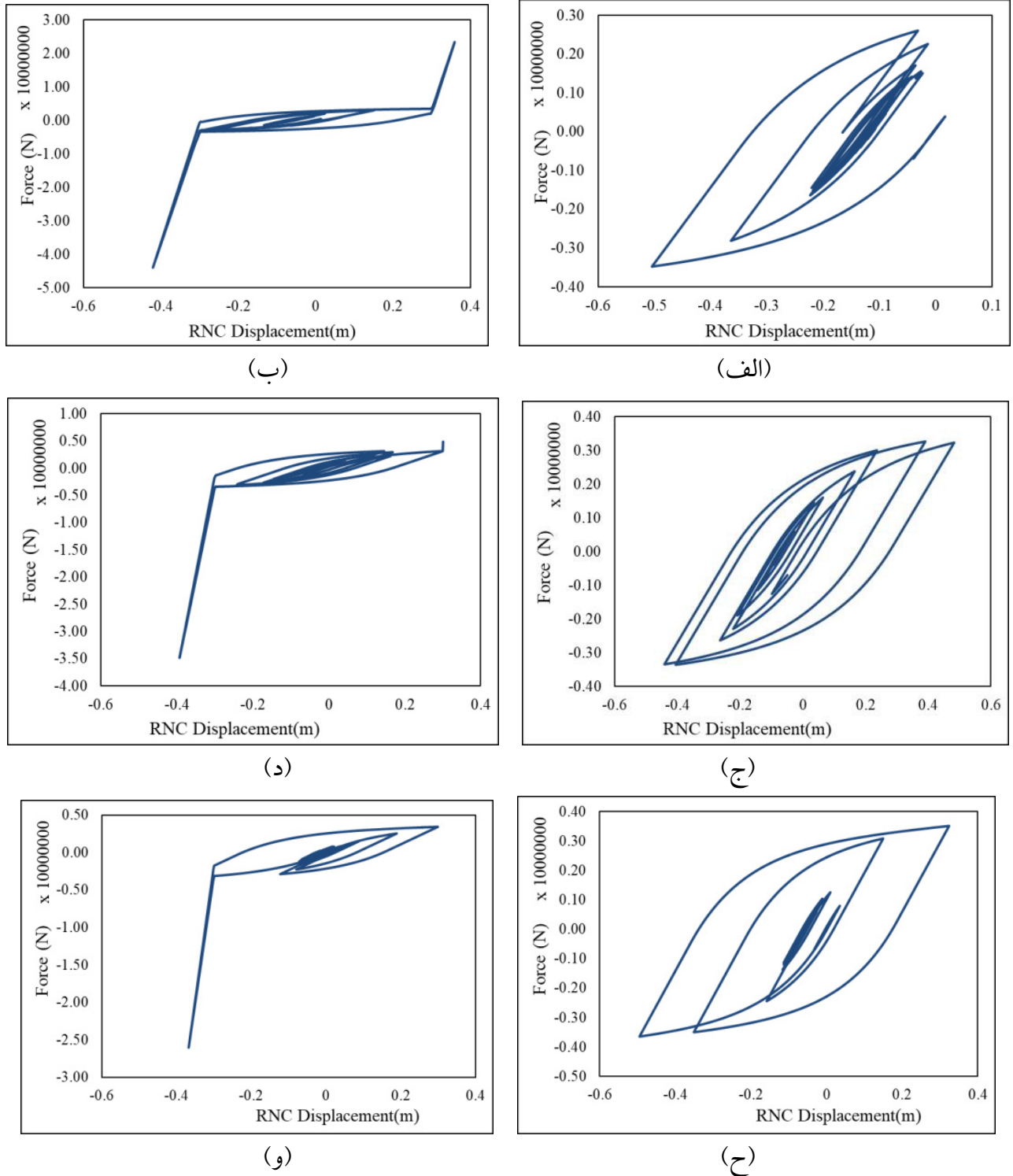
Fig. 12. Adjacent cables axial forces history of the isolated cable-stayed bridge considering cable 32 removal under seismic records(a) San Fernando (b) Northridge (c) Imperial Valley

جابه‌جایی ماندگار و جابه‌جایی حداکثر تحت رکوردهای لرزه‌ای و پس از خرابی المان بحرانی ۳۲ در مقایسه با سیستم جداساز بدون مکانیسم خودنگهدار کاهش می‌یابد.

در ادامه به بررسی تاثیر حذف کابل شماره ۱ و عملکرد جداساز غلطکی درون قفس تحت این شرایط پرداخته شده‌است. در شکل ۱۴ جابه‌جایی عرشه‌ی پل تحت زلزله‌های مختلف در شرایط پل سالم، حذف کابل شماره ۱ با و بدون مکانیسم خودنگهدار در جداسازهای غلطکی درون قفس ترسیم شده‌است. همچنین نیروی کابل‌های مجاور کابل حذف شده در مدل‌ها در شکل ۱۵ و تحت زلزله‌های مورد بررسی نمایش داده شده‌است. همانطور که مشاهده می‌گردد، انهدام و حذف کابل متصل به بالای پایه‌ی پل و انتهای عرشه در شرایطی که از جداساز غلطکی درون قفس با فعال سازی مکانیسم خودنگهدار استفاده شده‌است نیز فقط موجب تحمیل جابه‌جایی‌های ماندگار در عرشه‌ی پل تحت بارهای لرزه‌ای می‌گردد. البته جابه‌جایی ماندگار در شرایطی که کابل شماره ۱ حذف می‌گردد بیشتر از حالتی است که کابل شماره ۳۲ حذف شده‌است که همان کابل متصل به بالای پایه و وسط عرشه پل می‌باشد. از طرفی در شکل ۱۵ مشاهده می‌گردد

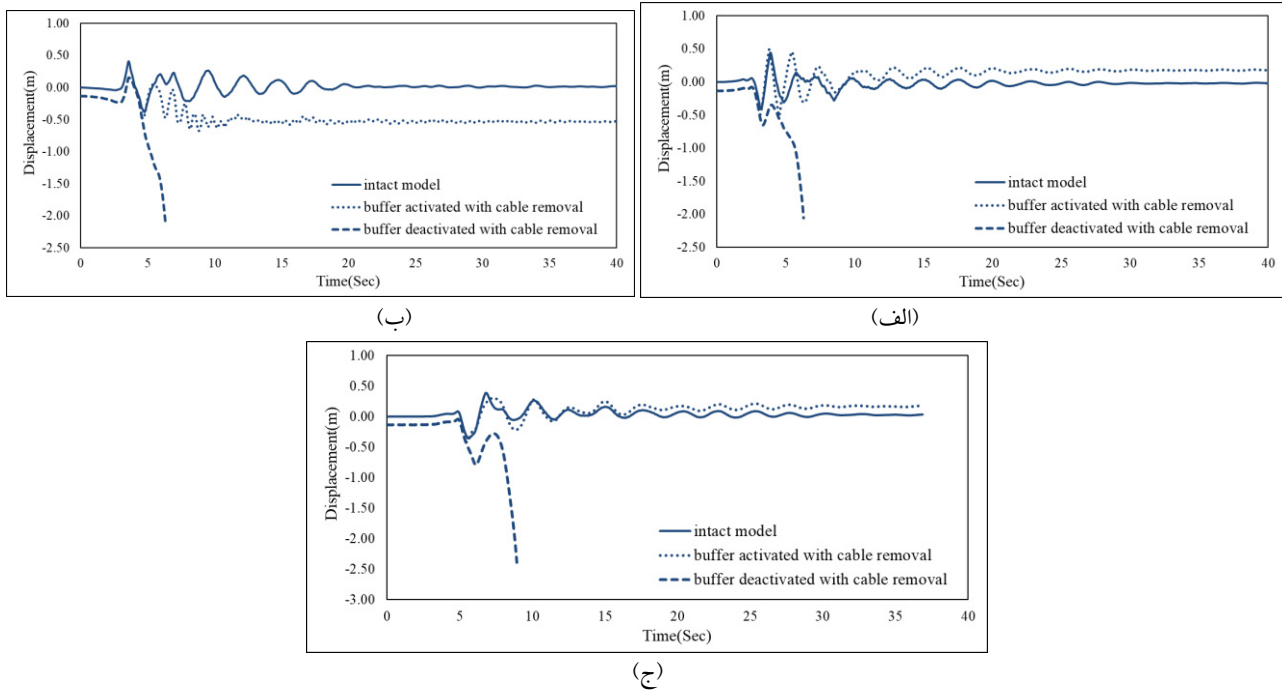
مکانیسم خودنگهدار هم فعال نمی‌باشد چندین برابر حالتی است که مکانیسم خودنگهدار فعال بوده و این بدان معناست که مکانیسم خودنگهدار با کنترل جابه‌جایی‌های خود جداساز بعد از جابه‌جایی حد طراحی (۳۰ سانتی متر در جداساز) آن موجب کاهش نیرو در کابل‌های مجاور کابل حذف شده می‌گردد و در نتیجه‌ی آن می‌تواند جابه‌جایی در عرشه را در شرایط بحرانی کنترل نماید.

در شکل ۱۳ منحنی‌های نیرو-جابه‌جایی در جداسازهای غلطکی درون قفس تحت رکوردهای مختلف لرزه و در دو حالت با و بدون مکانیسم خودنگهدار ترسیم شده‌است. همانطور که مشاهده می‌گردد فعال سازی مکانیسم خودنگهدار در جداساز موجب می‌گردد، در اثر افزایش سختی جداساز، نیروی آن تا ۱۰ برابر افزایش یافته و به طبع آن جابه‌جایی جداساز بعد از جابه‌جایی حد طراحی (۳۰ سانتی متر) کنترل شود و از بروز تغییرشکل‌های زیاد جلوگیری به عمل آید. لذا جابه‌جایی کل سازه بعد از جابه‌جایی حد طراحی در جداساز با استفاده از سختی ذخیره در این مکانیسم محدود می‌شود. همچنین با افزایش مساحت چرخه‌ی جداساز، استهلاک انرژی همراه با پایداری سازه تامین می‌گردد. لذا در نتیجه‌ی عملکرد مکانیسم خودنگهدار،



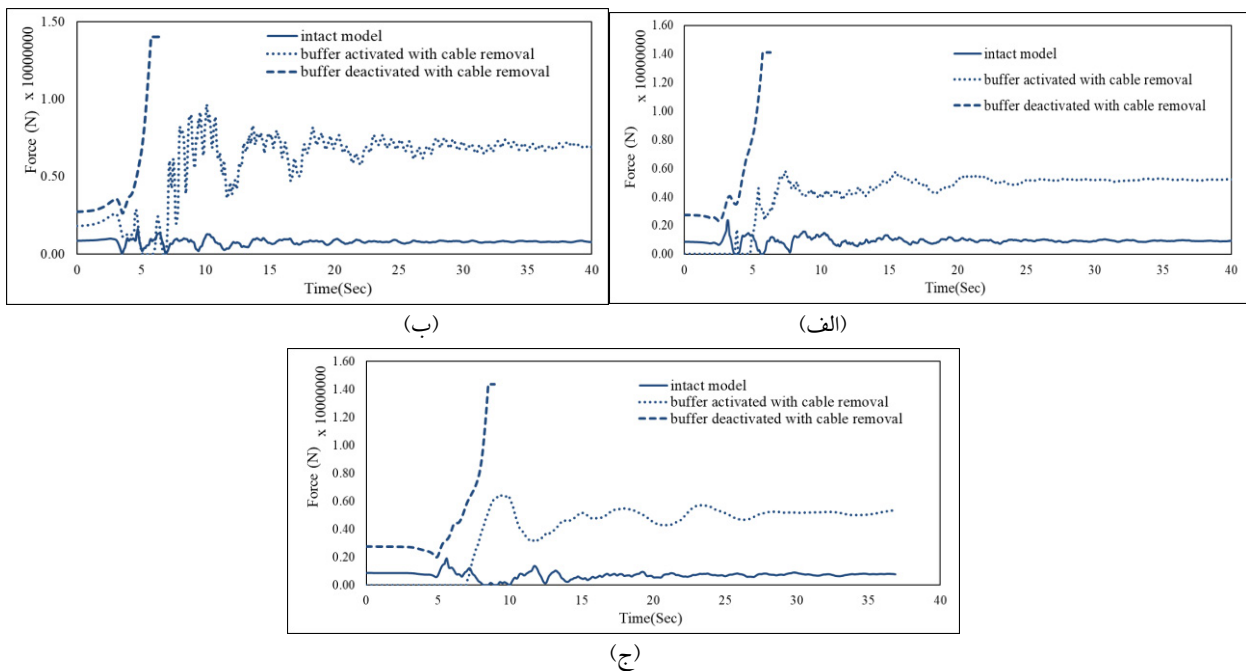
شکل ۱۳. منحنی‌های نیرو-تغییر مکان جداسازهای غلطکی درون قفس در مدل با حذف کابل ۳۲ (الف) سان فرناندو-بدون مکانیسم خودنگهدار(ب) سان فرناندو-با مکانیسم خودنگهدار (ج) نورثریج-بدون مکانیسم خودنگهدار(د) نورثریج-با مکانیسم خودنگهدار (ح) امپریال والی-بدون مکانیسم خودنگهدار(و) امپریال والی-با مکانیسم خودنگهدار

Fig. 13. Force-displacement history response of the Roll-N-Cage (RNC) isolators considering cable 32 removal under seismic records (a) Activated buffer mechanism under San Fernando earthquake (b) Deactivated buffer mechanism under San Fernando earthquake (c) Activated buffer mechanism under Northridge earthquake (d) Deactivated buffer mechanism under Northridge earthquake (e) Activated buffer mechanism under Imperial Valley earthquake (f) Deactivated buffer mechanism under Imperial Valley earthquake



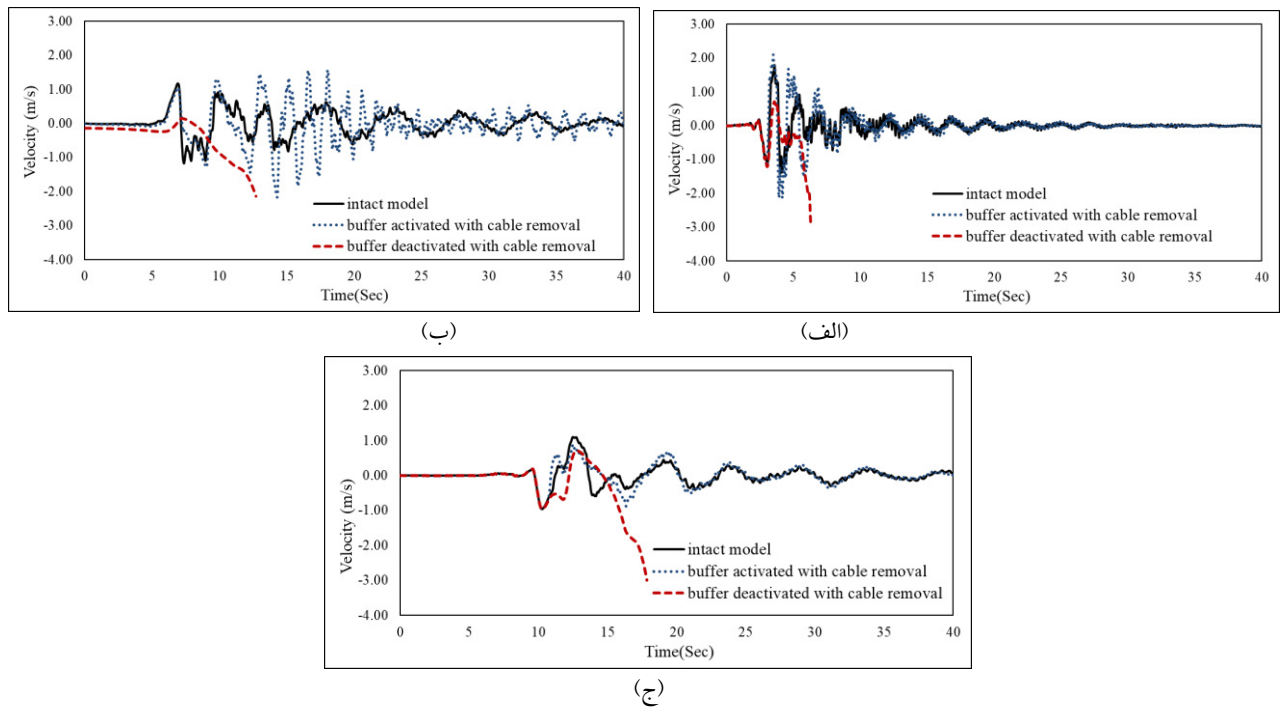
شکل ۱۴. جابه‌جایی عرشه پل کابلی در سه حالت مدل سالم، مدل با حذف کابل ۱ در حالت‌های بدون و با مکانیسم خودنگهدار تحت زلزله‌های (الف) سان فرناندو (ب) نورث‌ریج (ج) امپریال والی

Fig. 14. Displacement history of the isolated cable-stayed bridge considering cable 1 removal under seismic records (a) San Fernando (b) Northridge (c) Imperial Valley



شکل ۱۵. نیروی کابل مجاور در سه حالت مدل سالم، مدل با حذف کابل ۱ در حالت‌های بدون و با مکانیسم خودنگهدار تحت زلزله‌های (الف) سان فرناندو (ب) نورث‌ریج (ج) امپریال والی

Fig. 15. Adjacent cables axial forces history of the isolated cable-stayed bridge considering cable 1 removal under seismic records (a) San Fernando (b) Northridge (c) Imperial Valley



شکل ۱۶. سرعت عرشه پل کابلی در سه حالت مدل سالم، مدل با حذف کابل ۱ در حالت‌های بدون و با مکانیسم خودنگهدار تحت زلزله‌های (الف) سان فرناندو (ب) نورتریج (ج) امپریال والی

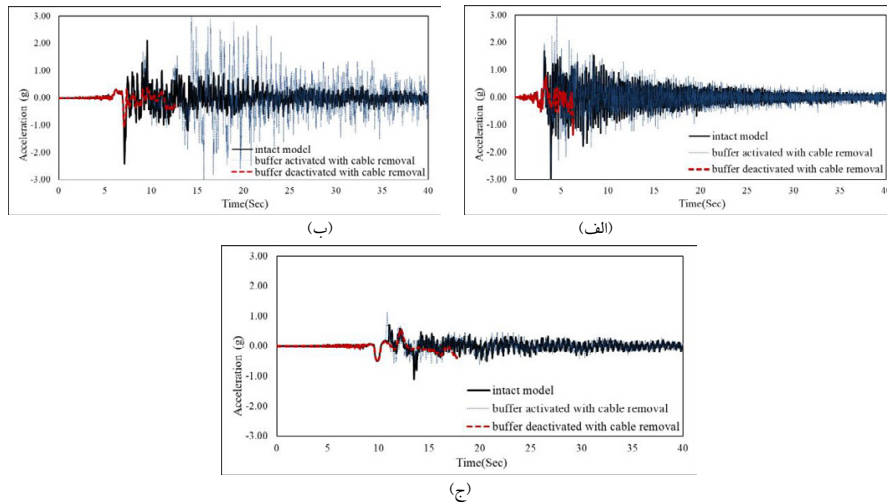
Fig. 16. Vibration velocity of the isolated cable-stayed bridge considering cable 1 removal under seismic records (a) San Fernando (b) Northridge (c) Imperial Valley

پل جابه‌جایی بیشتر از جابه‌جایی طراحی را تجربه می‌کند، مکانیسم خودنگهدار فعال شده و با افزایش سختی موجب ایست خودکار و به طبع آن کنترل سرعت و شتاب ارتعاش در عرشه‌ی پل می‌گردد. در نبود این مکانیسم حذف کابل موجب افزایش شدید سرعت ارتعاش می‌شود به گونه‌ای که منجر به انهدام پل و خرابی پیش‌رونده می‌گردد. در طول تحلیل انهدام پل هم زمان با وقوع حداکثر شتاب در رکوردهای لرزه‌ای اتفاق می‌افتد.

از آنجا که تنها در شرایطی که جداساز بتواند چرخه‌های کامل و پایدار داشته باشد می‌تواند جداسازی و استهلاک انرژی لرزه را انتظار داشت لذا در شکل ۱۶ منحنی‌های نیرو-جابه‌جایی در جداسازهای غلطکی درون قفس تحت رکوردهای مختلف لرزه و در دو حالت با و بدون مکانیسم خودنگهدار ترسیم شده‌است. همانطور که در این شکل مشاهده می‌گردد در شرایط حذف کابل شماره ۱ و تحت ارتعاش لرزه‌ای، منحنی هیستریزس جداساز غلطکی درون قفس بدون مکانیسم خودنگهدار یک چرخه‌ی کامل و پایدار ایجاد نمی‌نماید لذا موجب می‌گردد جابه‌جایی جداساز و به طبع آن کل سازه به شدت

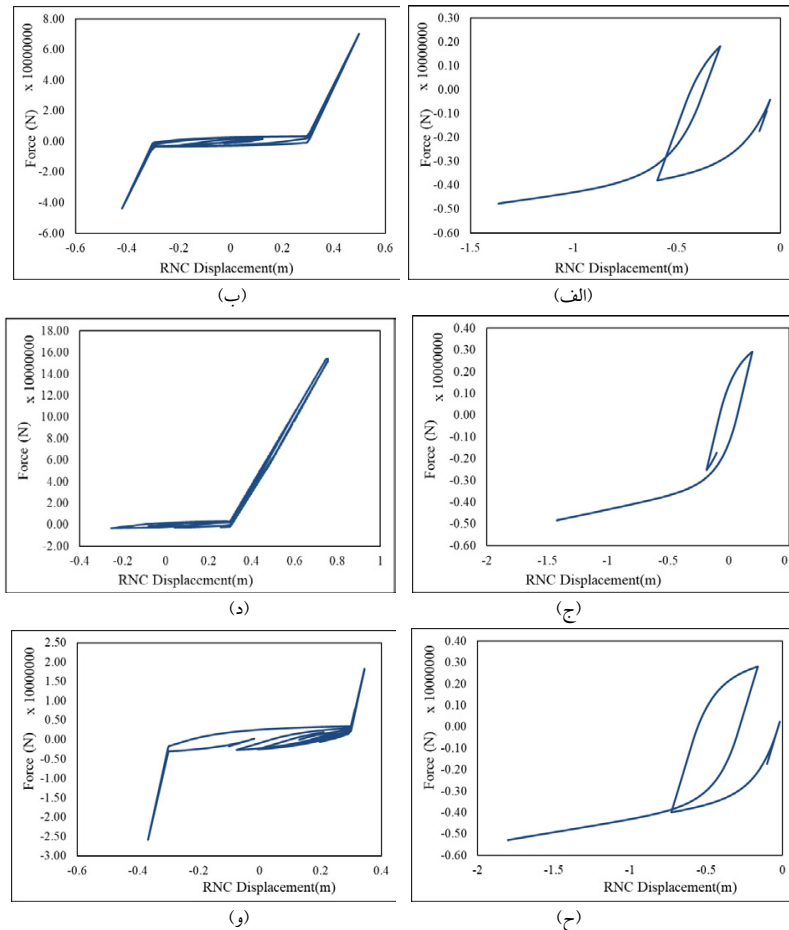
تحت بار لرزه‌ای در شرایطی که کابل شماره یک حذف شده‌است، نیروی محوری کابل‌های مجاور می‌تواند تا چندین برابر افزایش یابد و احتمال بروز خرابی و گسستگی در این کابل‌ها و به طبع آن احتمال بروز خرابی پیش‌رونده در پل کابلی را دوچندان نماید. علاوه بر آن در شرایطی که مکانیسم خودنگهدار در جداساز غیرفعال است، خرابی و گسیختگی کابل‌های مجاور که با رسیدن نیروی محوری آن‌ها به حد تسلیم و بعد از آن به حد گسیختگی موجب بروز خرابی پیش‌رونده و افزایش شدید جابه‌جایی عرشه‌ی پل می‌گردد.

در شکل‌های ۱۶ و ۱۷ به ترتیب سرعت و شتاب ارتعاش در عرشه‌ی پل در سه حالت پل سالم، پل با حذف کابل شماره ۱ در حالت‌های با و بدون مکانیسم خودنگهدار جداساز و تحت سه رکورد ارتعاش سان فرناندو، نورتریج و امپریال والی نمایش داده شده‌است. همانطور که مشاهده می‌گردد، حذف کابل موجب افزایش سرعت و شتاب ارتعاش پل کابلی تحت لرزه‌های مورد بررسی می‌شود. فعال بودن مکانیسم خودنگهدار در جداساز غلطکی درون قفس موجب می‌گردد افزایش سرعت ارتعاش محدود شده و هر بار که عرشه‌ی



شکل ۱۷. شتاب عرشه پل در سه حالت مدل سالم، مدل با حذف کابل ۱ در حالت‌های بدون و با مکانیسم خودنگهدار تحت زلزله‌های (الف) سان فرناندو (ب) نورتریج (ج) امپریال والی

Fig. 17. Vibration acceleration of the isolated cable-stayed bridge considering cable 1 removal under seismic records (a) San Fernando (b) Northridge (c) Imperial Valley



شکل ۱۸. منحنی‌های نیرو-تغییر مکان جداسازهای غلطکی درون قفس در مدل با حذف کابل ۱ (الف) سان فرناندو-بدون مکانیسم خودنگهدار(ب) سان فرناندو-با مکانیسم خودنگهدار (ج) نورتریج -بدون مکانیسم خودنگهدار(د) نورتریج -با مکانیسم خودنگهدار (ه) امپریال والی -بدون مکانیسم خودنگهدار(و) امپریال والی -با مکانیسم خودنگهدار

Fig. 18. Force-displacement history response of the Roll-N-Cage (RNC) isolators considering cable 1 removal under seismic records(a) Activated buffer mechanism under San Fernando earthquake (b) Deactivated buffer mechanism under San Fernando earthquake (c) Activated buffer mechanism under Northridge earthquake (d) Deactivated buffer mechanism under Northridge earthquake (e) Activated buffer mechanism under Imperial Valley earthquake (f) Deactivated buffer mechanism under Imperial Valley earthquake

۳- مکانیسم خودنگهدار موجب می‌گردد جابه‌جایی جداساز بعد از جابه‌جایی حد طراحی با استفاده از سختی ذخیره در این مکانیسم محدود شود و با افزایش مساحت چرخه‌ی جداساز، استهلاک انرژی همراه با پایداری سازه تامین می‌گردد.

۴- در شرایطی که مکانیسم خودنگهدار در جداساز غیرفعال است و کابل متصل به انتهای عرشه و بالای پایه دچار خرابی شده‌است، تحت بار لرزه‌ای کابل‌های مجاور کابل حذف شده دچار گسیختگی می‌شوند و توان بار مضاعف وارد شده را نخواهند داشت لذا خرابی پیش‌رونده و افزایش شدید جابه‌جایی در عرشه‌ی پل ایجاد می‌گردد. این در حالی است که چنانچه از مکانیسم خودنگهدار فعال باشد تنها سازه جابه‌جایی‌های ماندگار را تحمل می‌کند و از وقوع خرابی پیش‌رونده جلوگیری بعمل می‌آید.

۵- در نبود مکانیسم خودنگهدار حذف کابل انتهای عرشه موجب افزایش شدید سرعت ارتعاش می‌گردد به گونه‌ای که هم زمان با وقوع حداکثر شتاب در رکوردهای لرزه‌ای سطوح خرابی به شدت افزایش می‌یابد و سازه دچار فروپاشی می‌شود.

مراجع

- [1] H. Wibowo, D. Lau, Seismic progressive collapse: qualitative point of view, *Civil Engineering Dimension*, 11(1) (2009) 8-14.
- [2] U. Gsa, *Progressive collapse analysis and design guidelines for new federal office buildings and major modernization projects*, Washington, DC, (2003).
- [3] M. Ismail, J. Rodellar, F. Ikhrouane, Seismic protection of low-to moderate-mass buildings using RNC isolator, *Structural Control and Health Monitoring*, 19(1) (2012) 22-42.
- [4] S.J. Dyke, J.M. Caicedo, G. Turan, L.A. Bergman, S. Hague, Phase I benchmark control problem for seismic response of cable-stayed bridges, *Journal of Structural Engineering*, 129(7) (2003) 857-872.
- [5] P. Boroumand, M. Tehranizadeh, Response Sensitivity of Base-Isolated Steel Buildings to Near-Fault Ground Motions.
- [6] F.H. Rezvani, A.M. Yousefi, H.R. Ronagh, Effect of span length on progressive collapse behaviour of steel moment

افزایش یابد. این در حالی است که فعال سازی مکانیسم خودنگهدار موجب می‌گردد در جابه‌جایی‌های بیش از جابه‌جایی طراحی سختی ذخیره در این مکانیسم جابه‌جایی را محدود کرده و ضمن تشکیل چرخه‌های کامل هیستریزیس و افزایش مساحت چرخه‌ی جداساز، استهلاک انرژی همراه با پایداری سازه تامین شود و از گسترش خرابی و بروز خرابی پیش‌رونده جلوگیری شود.

۶- بحث و نتیجه گیری

در این مطالعه عملکرد جداساز لرزه‌ای غلطکی درون قفس در برابر خرابی پیش‌رونده در پل‌های کابلی در برابر زلزله بررسی شد. به همین منظور پل کابلی بیل امرسون با سه دهانه و به طول ۶۵۰ متر انتخاب و جداسازهای لرزه‌ای غلطکی درون قفس مناسب برای آن در زیر عرشه در دو انتهای آن و در محل اتصال به پایه‌ها تعبیه شدند. مدل پل کابلی جداسازی شده‌ی بیل امرسون تحت سه رخداد لرزه‌ای سان فرناندو، نورث‌ریج و امپریال والی در حالت‌های پل سالم و پل با یک کابل حذف شده مورد مطالعه قرار گرفتند. در این تحقیق یکی از مهم ترین مشخصات جداساز غلطکی درون قفس یعنی مکانیسم خودنگهدار و تاثیر آن بر ممانعت از وقوع خرابی پیش‌رونده و با استفاده از تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی مورد ارزیابی قرار گرفت و نتایج زیر به دست آمد:

۱- کابل‌های متصل به بالای پایه‌های پل بیشترین نیرو را تحت بارهای لرزه‌ای وارده تحمل می‌کنند و کابل‌های متصل به وسط پایه‌ها و عرشه نیروی کمتر و کابل‌های متصل به پایین پایه کمترین نیرو را تحمل می‌کنند. لذا احتمال وقوع گسیختگی در کابل‌هایی که فاصله‌ی بیشتری از پایه‌ها دارند به مراتب بیشتر از کابل‌هایی است که در نزدیکی پایه‌های پل قرار گرفته اند.

۲- در مورد حذف کابل متصل به بالای پایه‌ی پل و میانه‌ی دهانه، استفاده از جداساز غلطکی درون قفس با استفاده از مکانیسم خودنگهدار موجب می‌گردد جابه‌جایی‌های ماندگار و جابه‌جایی حداکثر عرشه تحت رکوردهای لرزه‌ای به مراتب کمتر شود و موجب می‌گردد کابل‌های مجاور کابل گسیخته شده تاریخچه‌ی نیرویی با شدت کمتری را چه در مقدار متوسط و چه در نقاط حداکثر نیرویی تجربه نماید. کاهش بارهای وارده منجر به کنترل پیشروی خرابی و جلوگیری از وقوع خرابی پیش‌رونده می‌گردد.

- techniques, Structure and Infrastructure Engineering, 8(9) (2012) 829-845.
- [15] Y. Ding, A. Li, D. Du, T. Liu, Multi-scale damage analysis for a steel box girder of a long-span cable-stayed bridge, Structure and Infrastructure Engineering, 6(6) (2010) 725-739.
- [16] H.R. Tavakoli, F. Naghavi, A.R. Goltabar, Effect of base isolation systems on increasing the resistance of structures subjected to progressive collapse, Earthq. Struct, 9(3) (2015) 639-656.
- [17] M. Ismail, Inner pounding control of the RNC isolator and its impact on seismic isolation efficiency under near-fault earthquakes, Engineering Structures, 86 (2015) 99-121.
- [18] B. Shrestha, Seismic response of long span cable-stayed bridge to near-fault vertical ground motions, KSCE Journal of Civil Engineering, 19(1) (2015) 180-187.
- [19] R. Das, A. Pandey, M. Mahesh, P. Saini, S. Anvesh, Progressive collapse of a cable stayed bridge, Procedia Engineering, 144 (2016) 132-139.
- [20] B. Wei, P. Wang, M. Yang, L. Jiang, Seismic response of rolling isolation systems with concave friction distribution, Journal of Earthquake Engineering, 21(2) (2017) 325-342.
- [21] Y.M. Al-Anany, M.J. Tait, Fiber reinforced elastomeric isolators for the seismic isolation of bridges, Composite Structures, 160 (2017) 300-311.
- [22] G. Chen, D. Yan, W. Wang, M. Zheng, L. Ge, F. Liu, Assessment of the Bill Emerson memorial cable-stayed bridge based on seismic instrumentation data, (2007).
- resisting frames, in: Structures, Elsevier, 2015, pp. 81-89.
- [7] I. Talebinejad, C. Fischer, F. Ansari, Numerical evaluation of vibration-based methods for damage assessment of cable-stayed bridges, Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 26(3) (2011) 239-251.
- [8] H. Li, J. Liu, J. Ou, Seismic response control of a cable-stayed bridge using negative stiffness dampers, Structural Control and Health Monitoring, 18(3) (2011) 265-288.
- [9] A. Pipinato, C. Pellegrino, G. Fregno, C. Modena, Influence of fatigue on cable arrangement in cable-stayed bridges, International Journal of Steel Structures, 12(1) (2012) 107-123.
- [10] J.-g. Cai, Y.-x. Xu, L.-p. Zhuang, J. Feng, J. Zhang, Comparison of various procedures for progressive collapse analysis of cable-stayed bridges, Journal of Zhejiang University SCIENCE A, 13(5) (2012) 323-334.
- [11] M. Ismail, J. Rodellar, G. Carusone, M. Domaneschi, L. Martinelli, Characterization, modeling and assessment of Roll-N-Cage isolator using the cable-stayed bridge benchmark, Acta Mechanica, 224(3) (2013) 525-547.
- [12] M. Ismail, J.R. Casas, J. Rodellar, Near-fault isolation of cable-stayed bridges using RNC isolator, Engineering Structures, 56 (2013) 327-342.
- [13] S.-H. Han, W.-S. Lee, M.-S. Bang, Probabilistic optimal safety with minimum life-cycle cost based on stochastic finite element analysis of steel cable-stayed bridges, International Journal of Steel Structures, 11(3) (2011) 335.
- [14] H. Li, S. Li, J. Ou, H. Li, Reliability assessment of cable-stayed bridges based on structural health monitoring

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M.E. Omeran, A.H. Karani, Performance Assessment of the Roll-N-Cage (RNC) Isolators impacts on Progressive Collapse Behavior in Cable-Stayed Bridges, Amirkabir J. Civil Eng., 53(2) (2021) 639-658.

DOI: 10.22060/ceej.2019.16458.6236

