

ارزیابی حساسیت پاسخ یک پل کابلی دارای جداساز لرزه ای تحت زلزله ی نزدیک به گسل نسبت به تغییرات مصالح

حمیدرضا توکلی^{*۱}، مجید مرادی^۲

^۱دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، ایران
^۲دانشجوی دکتری مهندسی زلزله، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸-۰۴-۰۱
بازنگری: ۱۳۹۸-۰۸-۰۴
پذیرش: ۱۳۹۸-۰۸-۰۴
ارائه آنلاین: ۱۳۹۸-۰۸-۱۵

کلمات کلیدی:

پل کابلی
جداساز RNC
تحلیل حساسیت
متغیر تصادفی
زلزله حوزه نزدیک

خلاصه: عوامل متعددی می تواند بر پاسخ سازه ها تحت بارهای لرزه ای مؤثر باشد. مشخصات مصالح مورد استفاده می تواند نسبت به پارامترهای مورد نیاز در طرح سازه ها متفاوت باشد. این تفاوت می تواند بر پاسخ سازه ها مؤثر باشد. در این تحقیق سعی شده است تا با استفاده از روش ها تحلیل حساسیت اثر تغییر مشخصات مصالح بر پاسخ لرزه ای یک پل کابلی معلق مجهز به جداساز RNC بررسی شود. یک پل کابلی با و بدون جداساز RNC پس از مدل سازی اولیه تحت یک زلزله ی سنفرنادو به صورت دینامیکی غیرخطی تحلیل شده است. سپس تأثیر متغیرهای تصادفی بر پاسخ این سازه ها با استفاده از روش های حساسیت سنجی مونت کارلو و مرتبه اول مسمان دوم بررسی شده است. در نهایت دقت روش تحلیل FOSM نسبت به روش مونت کارلو ارزیابی شده است. دو پارامتر برش پایه و بیشینه جابجایی عرشه به عنوان پاسخ های سازه در نظر گرفته شده است. نتایج نشان می دهد در بین مشخصات مصالح مقاومت نهایی بتن، تنش تسلیم آرماتور و مدول الاستیسیته کابل ها بیشترین تأثیر را بر پاسخ لرزه ای این سازه ها دارد. همچنین میزان حساسیت این پارامترها در پل جداسازی شده کمتر از پل بدون جداساز است.

۱-مقدمه

است [۵]. جداسازهای تک پاندول اصطکاکی، سه پاندول اصطکاکی، الاستومری با هسته سربی و الاستومری با میرایی بالا مواردی هستند که در جداسازی پل ها دارای کاربردهای فراوانی هستند. تحقیقات در زمینه ارزیابی پاسخ لرزه ای پل ها همواره مورد علاقه پژوهشگران در زمینه مهندسی سازه قرار داشته است. تحقیقات متعددی نیز در مورد تأثیر استفاده از جاذب های انرژی بر پاسخ پل ها تحت بارهای متعددی وجود دارد [۶]. نتایج این تحقیقات نشان داده است پاسخ پل های بدون جاذب انرژی نسبت به سازه های دارای جاذب متفاوت است و استفاده از آن می تواند پاسخ لرزه ای پل ها را تا حد زیادی کاهش دهد. این کاهش پاسخ بخصوص در زلزله های نزدیک به گسل می تواند آسیب های وارده ناشی از بار لرزه ای را به شدت کاهش دهد [۷]. میزان پاسخ سازه ها از جمله پل ها به عوامل مختلفی وابسته است. یک تغییر کوچک در خواص مصالح یا

پل ها یکی از سازه های ضروری و مهم در سیستم حمل و نقل هستند [۱]. امروزه سیستم های سازه ای مختلف و متنوعی از پل ها طراحی و اجرا می شوند. یکی از محبوب ترین سیستم ها برای احداث پل استفاده از سیستم پل کابلی معلق است [۲]. احداث پل ها در مناطق دارای خطر زلزله باید دارای ملاحظات خاصی باشد [۳]. مشخصات مصالح، میرایی، انعطاف پذیری، اندازه ی دهانه ها و مواردی از این دست عواملی هستند که باید در هنگام تحلیل و طراحی این سازه ها مورد توجه خاصی قرار گیرند [۴]. کاستن اثرات ناشی از بار لرزه ای یکی از مهم ترین روش ها برای مقابله با این بارها است. امروزه ابزار متفاوتی برای کاستن این اثرات بر سازه های مختلف وجود دارد. استفاده از جاذب های انرژی مانند جداسازها و میراگرها یکی از این روش ها

* نویسنده عهده دار مکاتبات: Tavakoli@nit.ac.ir



شده دنبال شده است. در ادامه با بحث در مورد خصوصیات زلزله نزدیک به گسل و ویژگی جداساز RNC دلیل در نظر گرفتن آن‌ها به عنوان اهداف این تحقیق ذکر شده است.

بار لرزه‌ای نزدیک به گسل دارای ویژگی‌های خاصی است. حداقل یک دامنه با پرپود بلند در طیف پاسخ شتاب‌نگاشت یک زلزله‌ی نزدیک به گسل در جهت عمود بر گسل وجود دارد [۱۵]. چندین دامنه با پرپود کوتاه در طیف پاسخ مربوط به شتاب‌نگاشت در جهت موازی گسل وجود دارد. یکی دیگر از مشخصات زلزله‌های نزدیک به گسل وجود پیک‌های جابجایی، سرعت و شتاب در رکوردهای مربوط به زلزله است [۱۶]. این ویژگی‌ها در زلزله‌ی نزدیک به گسل باعث شده است تا آسیب‌پذیری پل‌ها نسبت به زلزله‌های نزدیک به گسل بیشتر از زلزله‌های دور از گسل باشد. حساسیت بیشتر پاسخ پل‌ها نسبت به دامنه‌ی حرکتی پرپودهای بلند زلزله‌های نزدیک به گسل و مشارکت مودهای مختلف در طی بارهای لرزه‌ای باعث شده است تا استفاده از جاذب‌های لرزه‌ای در پل‌ها تبدیل به یک راهکار مناسب و مفید برای کاهش پاسخ لرزه‌ای شود [۱۷].

استفاده از جداسازها در ناحیه‌ی اتصال عرشه به ستون‌ها می‌تواند ارتعاشات عرشه را تا حدود زیادی کنترل کند. در سی سال اخیر استفاده از جداسازهای با خواص الاستومتریکی، اصطکاکی، لغزشی و غلتکی در سازه‌های مختلف به خصوص در پل‌ها گسترش زیادی یافته است. جداسازهای RNC یکی از جداسازهایی است که به خصوص در پل مورد استفاده قرار گرفته است. اگرچه تحقیقاتی در زمینه حساسیت سنجی پل‌های مختلف نسبت به متغیرهای تصادفی در بارگذاری‌های مختلف از جمله بارگذاری لرزه‌ای انجام شده است اما تحقیقی بر روی پل‌های کابلی که حساسیت آن را نسبت به متغیرهای تصادفی در بارگذاری لرزه‌ای نشان دهد وجود ندارد. بنابراین در این تحقیق سعی شده است تا با انتخاب پل بیل امرسن هم حساسیت سنجی لرزه‌ای بر روی یک پل کابلی انجام شود و هم با اضافه کردن جداساز لرزه‌ای تاثیر این جداساز بر حساسیت لرزه‌ای پاسخ‌های پل بررسی گردد. از آن جایی که ممکن است تغییراتی در مشخصات مصالح اجرا شده نسبت به طرح وجود داشته باشد، خصوصیات مکانیکی مصالح به عنوان عدم قطعیت در این تحقیق انتخاب شده است و اثرات آن‌ها بر روی پاسخ لرزه‌ای پل مورد نظر محاسبه و ارائه شده است.

بارگذاری می‌تواند بر میزان پاسخ لرزه‌ای سازه‌ها تاثیر گذار باشد [۸]. تحلیل حساسیت تائید می‌کند که تغییرات پارامترهای مختلف تا چه میزان می‌تواند بر میزان پاسخ‌ها تأثیرگذار باشد [۹]. در زمینه ارزیابی حساسیت پارامترهای مختلف بر روی سازه‌ها تحقیقات متعددی انجام شده است. مانگالاسو^۱ و همکاران (۲۰۱۸) اثر پارامترهای عدم قطعیت را بر پاسخ لرزه‌ای پل‌ها با استفاده از رگرسیون لسو مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داده است تغییرات عدم قطعیت موجود در یک پل می‌تواند تاثیرات قابل توجهی را بر پاسخ پل‌ها ایجاد کند [۱۰]. نیلسون^۲ و همکاران (۲۰۰۶) اثرات فرضیات مختلف از جمله فرضیات مدل‌سازی را بر پاسخ لرزه‌ای پل‌ها در مناطق با خطرات لرزه‌ای مختلف بررسی کردند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که اثرات توزیع بارگذاری و میرایی تاثیرات زیادی را بر روی پاسخ لرزه‌ای پل‌ها می‌گذارد [۱۱]. ساپنتازیس^۳ و همکاران (۲۰۱۷) اثرات میراگر KD را بر روی کاهش پاسخ لرزه‌ای پل‌های جداسازی شده بررسی کردند. نتایج نشان داده است استفاده از این میراگرها در کنار جداسازها می‌تواند کمک زیادی به کاهش پاسخ لرزه‌ای نماید. همچنین تغییرات خواص این میراگر بر میزان کاهش پاسخ لرزه‌ای نیز بررسی شده است [۱۲]. مائو^۴ و همکاران (۲۰۱۸) خواص دینامیکی پل‌های معلق کابلی را بر اساس داده‌های میدانی بررسی کردند. آن‌ها با در نظر گرفتن خواص حرارتی حساسیت پاسخ دینامیکی این پل‌ها را نسبت به تغییرات دما ارزیابی کردند [۱۳].

همان‌طور که در این تحقیقات بررسی شده است، ارائه بازه تغییرات پاسخ سازه‌ها به خصوص پل‌ها نسبت به تغییرات متغیرهای تصادفی می‌تواند منجر به شناخت دو عامل مهم شود. اولین عامل این است که تغییرات متغیرهای تصادفی تا چه میزان می‌تواند بر پاسخ پل‌ها تأثیرگذار باشد و دوم اینکه تغییرات در کدام پارامتر باعث ایجاد حساسیت بیشتر بر پاسخ می‌شود [۱۴]. بر این مبنا در این تحقیق سعی شده است تا با استفاده از روش‌های تحلیل حساسیت، تاثیر متغیرهای تصادفی بر میزان پاسخ یک پل کابلی معلق دارای جداساز لرزه‌ای RNC تحت یک رکورد زلزله نزدیک به گسل بررسی شود. برای این منظور پل کابلی بیل امرسن به صورت غیرخطی مدل‌سازی شده و سپس با استفاده از روش‌های تحلیل حساسیت، اهداف ذکر

- 1 Mangalathu
- 2 Nielson
- 3 Sapountzakis
- 4 Mao

۱-۱- جداساز RNC

روش متغیر تصادفی به صورت مجموعه‌ای از مقادیر تعینی تعریف می‌شود. این مجموعه‌ی داده‌های ورودی مجموعه‌ای از خروجی تعینی را نتیجه می‌دهند. در نهایت شکل احتمالاتی خروجی‌ها محاسبه و ارائه می‌شود. به علت دقت بالا معمولاً از روش MCS برای صحت سنجی سایر روش‌های احتمالاتی استفاده می‌شود [۱۹، ۲۰]. استفاده از روش MCS بسیار زمان‌بر است. روش‌های مختلفی برای ارزیابی حساسیت سازه نسبت به پارامترهای موردنظر مهندسی وجود دارد. یکی از این روش‌ها روش تحلیل مرتبه‌ی اول ممان دوم (FOSM) است. در روش FOSM تنها میانگین و انحراف معیار (SD) متغیرهای تصادفی بر اساس توزیع خود فرض می‌شوند. میانگین و SD پاسخ‌ها اندازه‌گیری می‌شود. انحراف معیار این روش می‌تواند معیاری برای حساسیت سنجی محسوب شد. مزیت اصلی روش FOSM این است که با وجود ساده‌تر بودن روند تحلیل در آن نسبت به سایر روش‌ها، مشخصات احتمالاتی پاسخ‌های سازه قابل حاصل شدن هستند [۱۹].

درواقع این روش علی‌رغم سادگی دقت بالایی در تعیین میانگین و انحراف معیار پاسخ سازه دارد. در این روش $Y = g(X)$ به عنوان تابعی با متغیر تصادفی X دارای میانگین μ_X و واریانس σ_X^2 در نظر گرفته می‌شود. با توجه به اینکه مشتقات $g(x)$ نسبت به X موجود است تقریب مرتبه‌ی اول از $g(x)$ با استفاده از بست سری تیلر در نقطه‌ی X به صورت زیر محاسبه می‌شود (رابطه (۱)).

$$Y \approx g_0 + \left(\frac{dg}{dx}\right)_0 (X - x_0) \quad (1)$$

ممان مرتبه‌ی اول و دوم Y (یعنی میانگین و واریانس) می‌توانند از رابطه‌ی (۱) محاسبه شوند. که این تقریب روش FOSM نامیده می‌شود. به طور خاص اگر $x_0 = \mu_X$ (این یک انتخاب معمول در روش FOSM است) میانگین و واریانس از طریق روابط (۲) محاسبه می‌شوند:

$$\mu_Y = g(\mu_X) \quad (2)$$

$$\sigma_Y^2 \approx \left(\frac{dg}{dx}\right)_0^2 \sigma_X^2 \quad (3)$$

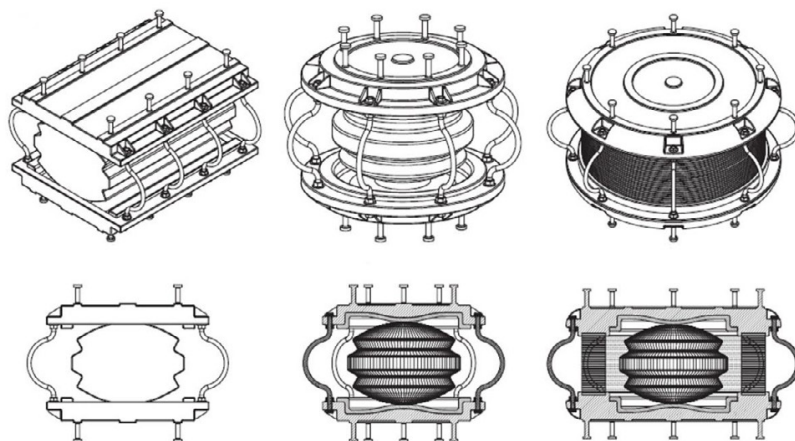
این تقریب روش مقدار میانگین FOSM نامیده می‌شود. که می‌توان با استفاده از آن مقدار میانگین و واریانس (و انحراف معیار) را

جداساز RNC یکی از جداسازهایی است که اخیراً برای کنترل سازه‌ها پیشنهاد شده است. شکل شماتیکی از این جداساز در شکل ۱ نشان داده شده است. مکانیسم عملکردی این جداساز بر اساس حرکت غلتک است تا حداقل حرکت زیر سازه به بالای آن انتقال پیدا کند. عملکرد این جداساز مانند اکثر جداسازها برای کنترل حرکت افقی طراحی شده است. پیکربندی منحصر به فرد از نوع نورد، یک مکانیزم بازتاب دهنده مبتنی بر جاذبه خطی ساخته شده و یک مکانیسم ترمز مکانیکی جذب انرژی (بافر) با کمک پدال‌های پرپشتی است که پوشش‌های داخلی پلاک‌های بالاتری و پایین‌تر را پوشش می‌دهد. میرایی در حرکت افقی در این جداساز از طریق یک سری از میراگرهای هیسترتیک فلزی که در اطراف غلتک تعبیه شده است ایجاد می‌شود. میراگرهای تسلیمی فلزی طوری انتخاب شده است که طول کافی را برای حرکت انبساطی ایجاد می‌کند، تنش متمرکز را در حالت خمشی کاهش می‌دهد و حرکات غلتک را دور از بدنه اصلی قرار می‌دهد طوری که آن‌ها هرگز همدیگر را لمس نمی‌کنند. این جداساز به علت طراحی دقیق خود به هیچ عنوان در اثر حرکات و شتاب افقی، شتاب عمودی‌ای را از خود تولید نمی‌کنند [۱۸]. جزئیات بیشتری از این نوع جداسازها در مرجع [۴] موجود است.

همان‌طور که در عنوان شده است عوامل متعددی بر پاسخ‌های لرزه‌ای پل‌ها تاثیر می‌گذارند. در این تحقیق سعی شده است تا تاثیر مشخصات مصالح بر پاسخ یک پل معلق کابلی با و بدون جداساز بررسی شود. در ادامه مشخصات مدل مربوطه و روش‌های تحلیل بحث شده است. پل بیل امرسن نمونه عملی یک پل دارای جداساز RNC است به همین دلیل تحقیق حاضر با مدل کردن عددی پل بیل امرسن به ارزیابی حساسیت پاسخ لرزه‌ای پل کابلی دارای جداساز RNC پرداخته است.

۲- روش تحلیل

روش‌های مختلفی برای ارزیابی حساسیت سازه نسبت به پارامترهای موردنظر مهندسی وجود دارد. سه روش: مونت کارلو (MCS)، دیاگرام تورنادو و FOSM پرکاربردترین این روش‌ها در ارزیابی حساسیت سازه‌ها هستند. MCS یکی از روش‌های عمیق در مسائل مربوط به تحلیل عدم قطعیت و تحلیل احتمالاتی است. در این



شکل ۱. جزئیات جداساز لرزه‌ای RNC [۱۸]
Fig. 1. Details of RNC seismic isolator

فقط پل مدل‌سازی شده است. در حالت بدون جداساز دو انتهای پل در راستای حرکت افقی آزاد هستند اما در حالتی که جداساز لرزه‌ای در آن مدل شده است جابجایی افقی مقید به جابجایی افقی جداساز RNC شده است. مشخصات کامل این پل در تحقیق اسماعیل^۱ و همکاران (۲۰۱۳) با جزئیات کامل ارائه شده است. بر اساس این مرجع و همان‌طور که در شکل ۲ نشان داده شده است، این پل از سه دهانه تشکیل شده است. دهانه ابتدایی دارای ۱۴۲.۷ متر، دهانه دوم دارای ۳۵۰.۶ متر و دهانه سوم نیز دارای ۱۴۲.۷ متر است. عرض پل دارای ۲۹ متر طول است که توسط کابل‌ها به چهار ستون متصل می‌شود. برای مدل‌سازی این پل جمعاً ۱۱۲۵ المان تیر، ۱۲۸ المان کابل، ۳۲۰۰ گره و ۴۱۸ لینک صلب مدل شده است. همچنین ارتفاع ستون‌ها برابر با ۱۰۸ متر در نظر گرفته شده است. مساحت کابل‌ها بین ۲۸.۵ تا ۷۶ سانتی‌متر مربع لحاظ شده است.

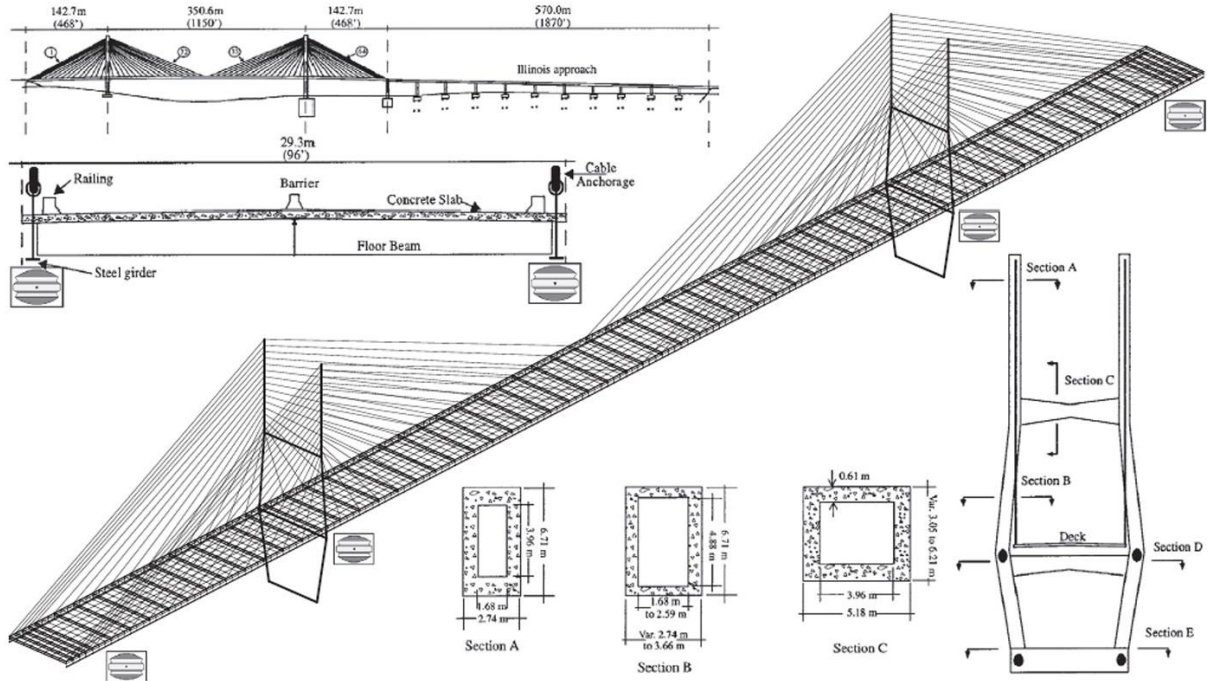
برای مدل‌سازی المان‌ها هر المان به چندین المان کوچک‌تر تقسیم شده است. در واقع با تعبیه گره‌هایی بین المان‌های سازه‌ای سعی شده است تا دقت مدل افزایش داده شود. همچنین در هر گره جرم مربوط به آن المان محاسبه و به آن گره اختصاص داده شده است. برای مدل‌سازی المان‌های عرشه، شاه‌تیر و ستون این پل کابلی از پلاستیسیته گسترده استفاده شده است. دستور Section Fiber برای مدل‌سازی ستون‌ها در نرم‌افزار Opensees بکار گرفته شده است. در این دستور برای ساخت مقطع بتن آرمه از patch quad و برای مدل‌سازی آرماتورها از layer straight استفاده شده است. برای

پاسخ را تخمین زد. توضیحات کاملی در مورد چگونگی انجام تحلیل حساسیت به روش FOSM در مرجع [۲۱] موجود است. روش مونت کارلو علی‌رغم زمان‌بر بودن یکی از روش‌های مطمئن با دقت بالا در مبنای عدم قطعیت، تحلیل‌های احتمالاتی و تحلیل‌های حساسیت بشمار می‌رود. اکثر روش‌های موجود در این زمینه‌ها با استفاده از روش مونت کارلو سنجیده می‌شوند و دقت آن‌ها با استفاده از این روش تخمین زده می‌شود. از این‌رو این روش به عنوان مبنا برای ارزیابی پاسخ‌ها و تخمین دقت روش FOSM استفاده شده است.

۳- مدل اجزاء محدود

برای انتخاب مدل سازه‌ای و انجام تحلیل و رسیدن به اهداف تحقیق از پل کابلی بیل امرسن در میسوری آمریکا استفاده شده است. جزئیات سازه‌ای و معماری این پل در شکل ۲ نشان داده شده است. جزئیات بیشتر این پل در مرجع [۴] بیان شده است و در این تحقیق از مدل ارائه شده در این مرجع استفاده شده است. این پل توسط هشت جداساز لرزه‌ای از نوع RNC در طول پل مجهز شده است. موقعیت قرارگیری این جداسازها در شکل ۲ نشان داده شده است. یک مدل اجزای محدودی سه بعدی از این پل کابلی در نرم‌افزار Opensees مدل‌سازی شده است. پس از مدل‌سازی اولیه تحلیل‌های مونت کارلو و FOSM با استفاده از نرم‌افزار RT انجام شده است. پل در دو حالت مدل‌سازی شده است. در حالت اول یک جداساز لرزه‌ای از نوع RNC در بین ستون و عرشه قرار داده شده است و در حالت دوم بدون در نظر گرفتن این جداساز

1 Ismaeil



شکل ۲. مشخصات پل بیل امرسن [۱۸]
Fig. 2. Details of Bill Emerson Bridge

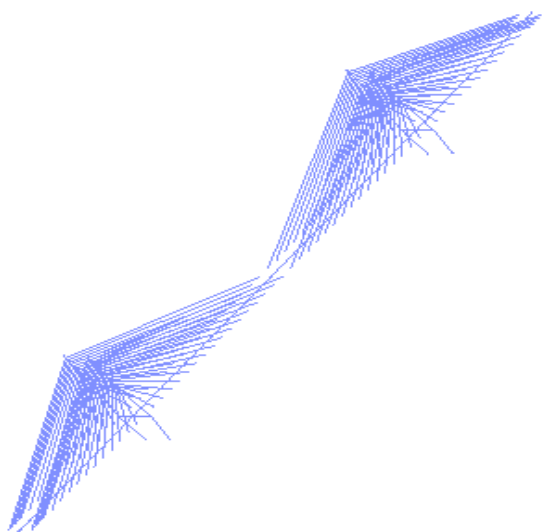
جدول ۱. مشخصات پارامترهای طراحی جداساز RNC
Table 1. Specifications of RNC Isolator Design Parameters

واحد	مقدار	پارامتر	حرکت	
نیوتن بر مترمربع	۱۷۲۲۵۲۰۹۳	مدول فشاری	قائم	
نیوتن بر مترمربع	۱۳۵۰۰۰۰	مدول الاستیک		
m ⁴	۰,۰۰۰۴۰۱۸	ممان اینرسی		
متر	۰,۰۷۵۳	شعاع چرخش		
نیوتن بر متر	۸۷۰۸۳۵۷۸	سختی اولیه کششی		
نیوتن بر متر	۶۸۲۵۰۴	سختی ثانویه کششی		
رادیان	۵۸۴۱۷۳۶۴	مدول چرخشی		
مترمربع	۰,۱۵۱۶۶	مساحت برشی		
m ⁴	۰,۰۰۰۸۶۵۴	ممان اینرسی جداساز		
نیوتن	۵۴۲۲۰۹۱	بار کمانش اولیه		
نیوتن	۶۰۸۳۲۵	بار بحرانی کمانش فشاری		
متر	۰,۰۰۶۹۸	جابجایی بحرانی فشاری		
متر	۰,۰۰۳۵	جابجایی تسلیم		حرکت افقی
متر	۰,۶۱	جابجایی نهایی افقی		
نیوتن	۴۴۰۰۴	بار تسلیم الاستومتریک		
نیوتن بر متر	۱۲۵۷۲۶۴۸	سختی اولیه		
نیوتن بر متر	۶۶۷۰۰۰	سختی ثانویه		
نیوتن ثانیه بر متر	۱۰۸۲۱۵۲	میرایی بحرانی		
نیوتن ثانیه بر متر	۳۲۳۲۴۶۴	میرایی در المان الاستومتریک		

اولیر، بار بحرانی کمانش و جابجایی بحرانی در فشار محاسبه شده و در مدل‌سازی از آن استفاده شده است. این پارامترهای بر اساس روابط موجود در مرجع [۴] محاسبه شده و خلاصه آن در جدول ۱ نشان داده شده است. این پارامترها در غالب المان ElastomericX در نرم افزار Opensees مدل‌سازی شده است. برای ارزیابی صحت نتایج مدل‌سازی این جداساز، منحنی نیرو تغییر مکان این جداساز در بار لرزه‌ای زلزله سنفرنادو با منحنی ارائه شده در تحلیل عددی مرجع [۴] در شکل ۵ در بخش ۳-۱ ارائه شده است. با توجه به توضیحات داده شده، مدل اجزای محدودی مطابق شکل ۳ در دو حالت با جداساز و بدون جداساز در نرم‌افزار Opensees مدل‌سازی و آماده تحلیل شده است. در واقع شکل ۳ مدل عددی تحقیق حاضر در محیط نرم افزار Opensees است که برای درک بهتر خواننده به نمایش گذاشته شده است.

۳-۱- متغیرهای تصادفی

همان‌طور که پیش از این بیان شده است هدف از این تحقیق ارزیابی تاثیر متغیرهای تصادفی بر پاسخ لرزه‌ای پل موردنظر تحقیق تحت زلزله‌ی نزدیک به گسل است. برای این منظور عدم قطعیت‌های مربوط به مصالح به عنوان متغیرهای تصادفی در نظر گرفته شده است. مشخصات مربوط به مصالح دسته بندی شده و سپس با استفاده از روش‌های تحلیل حساسیت مونت کارلو و FOSM تاثیر آن‌ها بر میزان پاسخ این پل در دو حالت با جداساز و بدون آن



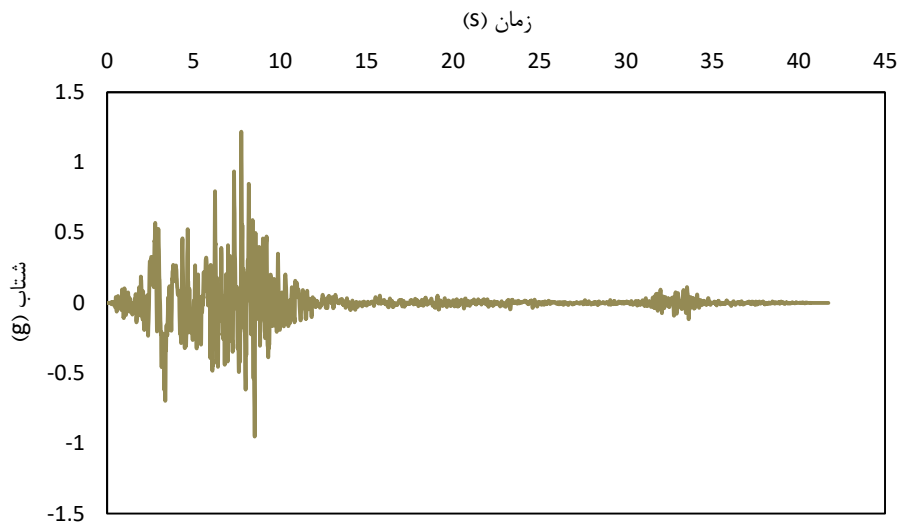
شکل ۳. پل مدل‌سازی شده در نرم‌افزار Opensees
Fig. 3. Bridge modeled on the Opensees software

مدل‌سازی المان‌ها از دستور forceBeamColumn در کتابخانه نرم‌افزار Opensees استفاده شده است. این المان دارای خواص غیرخطی است که می‌تواند به خوبی و بر مبنای پلاستیسیته گسترده رفتار المان‌های تیر و ستون را مدل‌سازی کند. برای مدل‌سازی کابل‌ها از دستور element truss در نرم‌افزار Opensees استفاده شده است. این المان با در نظر گرفتن خواص محوری برای اعضا می‌تواند رفتار کابل را به خوبی مدل‌سازی کند. المان‌های تیر عرشه و تیر در جهت موازی پل با استفاده از دستور rigidLink beam به هم مقید شده‌اند. المان rigidLink beam یک المان صلب است که تمامی درجات مقید شده را از یک گره به گره دیگر انتقال می‌دهد. برای مدل‌سازی جداساز لرزه‌ای از المان ElastomericX استفاده شده است. پارامترهای موجود در مدل‌سازی المان جداساز RNC مطابق با مرجع [۴] محاسبه شده و در نرم‌افزار برای المان ElastomericX اختصاص داده شده است. مصالح ElastomericX توسط مانیش کومار در دانشگاه بوفالو به کتابخانه‌ی مصالح نرم‌افزار Opensees اضافه شده است. مدل رفتاری جداساز RNC بر اساس المان ElastomericX تعریف شده است. منحنی رفتاری این المان از سه بخش تشکیل شده است. بخش اول مربوط به حالت الاستیک اولیه با سختی اولیه است. بخش دوم مربوط به فاز غیرخطی است که در آن با سختی کمتر از سختی الاستیک، با نیروی کمتر جابجایی افزایش می‌یابد. در فاز سوم در یک جابجایی بسیار کم نیرو به شدت افزایش می‌یابد. مدل رفتاری مربوط به این المان در مرجع [۴] با جزئیات ارائه شده است.

در مدل‌سازی جداساز لرزه‌ای مطابق با مرجع [۴] فشار محوری برابر با 4.3×10^6 نیوتن بر مترمربع استفاده شده است. مدول برشی لاستیک برابر با 4.5×10^5 نیوتن بر مترمربع در نظر گرفته شده است. سختی کمانشی لاستیک جداساز نیز برابر با 2000×10^6 لحاظ شده است. ضخامت صفحات فولادی موجود در جداساز برابر با ۳ میلی‌متر، ضخامت لاستیک‌ها برابر با ۷ میلی‌متر تعداد صفحات لاستیکی برابر با ۲۰ قطر داخلی غلتک برابر با ۱۹ میلی‌متر، قطر خارجی برابر با ۲۹۶ سانتی‌متر و شاخص آسیب نیز برابر با ۰٫۵ لحاظ شده است. با استفاده از این مشخصات پارامترهای مدول فشاری، مدول الاستیک، ممان اینرسی، شعاع چرخش، سختی اولیه کششی، سختی ثانویه کششی، مدول چرخشی، مساحت برشی، ممان اینرسی جداساز، بار کمانش

جدول ۲. مشخصات رکورد زلزله سانفرنادو [۱۸]
Table 2. San Francisco earthquake record specifications

نام	سال	ایستگاه	بزرگا	فاصله از گسل	PGA (g)	PGV (m/s)	PGD (cm)
سنفرنادو	۱۹۷۱	سد پاکوما	۶،۱	۱،۸	۱،۲۳	۱۱۴،۷	۳۶،۱

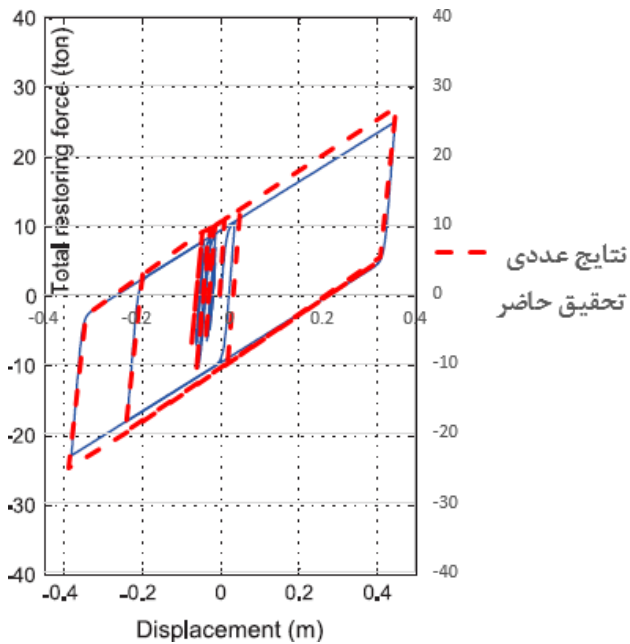


شکل ۴. رکورد زلزله سنفرنادو
Fig. 4. Sanfernado earthquake record

ارزیابی شده است. تمامی متغیرهای تصادفی به صورت یک منحنی تابع توزیع خود تعریف شده‌اند که در ادامه مشخصات توزیع آن‌ها ارائه شده است. مقاومت نهایی بتن، مقاومت تسلیم آرماتورها، مدول الاستیسیته آرماتور، مدول الاستیسیته کابل‌ها و تنش تسلیم کابل به عنوان عدم قطعیت‌های موردنظر این پل در قالب متغیرهای تصادفی در تحلیل‌های حساسیت لحاظ شده‌اند. برای مقاومت نهایی بتن از یک توزیع نرمال با میانگین 2.8×10^6 نیوتن بر مترمربع و ضریب تغییرات ۱۰٪ (انحراف معیار 2.8×10^5) استفاده شده است. برای تنش تسلیم آرماتور نیز از یک توزیع لاگنرمال با میانگین 2.4×10^7 نیوتن بر مترمربع و ضریب تغییرات ۱۰٪ (انحراف معیار 2.4×10^6) استفاده شده است. برای مدول الاستیسیته آرماتورها از یک توزیع لاگنرمال با میانگین 200000×10^6 و ضریب تغییرات ۵٪ (انحراف معیار 100000×10^5) استفاده شده است. تنش تسلیم کابل‌ها با یک توزیع لاگنرمال با مقدار میانگین 1.8×10^7 و ضریب تغییرات ۵٪ (انحراف معیار 9×10^5) لحاظ شده‌اند. مدول الاستیسیته کابل‌ها نیز با یک توزیع لاگنرمال با مقدار میانگین 200000×10^6 و ضریب تغییرات ۵٪ (انحراف معیار 1×10^{10}) تعریف شده است. ذکر این نکته ضروری است که در تحلیل‌های

حساسیت که به منظور تاثیر متغیرهای تصادفی بر پاسخ لرزه‌ای پل موردنظر انجام شده است، هنگامی که یک پارامتر به عنوان متغیرهای تصادفی در نظر گرفته می‌شود سایر پارامترها در مقدار میانگین خود قرار دارند. به عنوان مثال هنگامی که با استفاده از تحلیل‌های مونت کارلو و FOSM تاثیر تنش تسلیم آرماتور بر تغییرات پاسخ سازه بررسی می‌شود سایر متغیرها در مقدار میانگین خود قرار دارند درحالی‌که تنش تسلیم آرماتور به صورت یک تابع توزیع لاگنرمال با مقدار میانگین نیوتن بر مترمربع و ضریب تغییرات ۱۰٪ (انحراف معیار 2.8×10^5) اعمال خواهد شد. این روند برای سایر متغیرها نیز صادق است.

برای بار لرزه‌ای از یک رکورد زلزله حوزه نزدیک استفاده شده است. رکورد زلزله‌ی سن فرنادو با مشخصات جدول ۲ و شکل ۴ برای انجام تحلیل‌های تاریخچه زمانی غیرخطی در نظر گرفته شده است. پل‌ها تحت رکورد این زلزله به صورت غیرخطی تحلیل و پاسخ آن‌ها در قال بیشینه جابجایی افقی عرشه و بیشینه برش پایه ارزیابی و بررسی شده است. در ادامه نتایج حاصل از تحلیل‌های انجام شده در این تحقیق ارائه شده است. در واقع هدف از این تحقیق ارزیابی



شکل ۵. منحنی هیستریزیس جداساز RNC تحت زلزله سنفرنادو در تحقیق حاضر و مدل عددی اسماعیل
Fig. 5. RNC Isolation Hysteresis Curve under Sanfernado Earthquake in the Present Research and the Ismail Numerical Model

عرشه در پل دارای جداساز لرزه‌ای ۳۴٪ کمتر از بیشینه جابجایی عرشه در پل بدون جداساز لرزه‌ای بوده است.

اضافه شدن جداساز لرزه‌ای به پل علاوه بر ایجاد ظرفیت جذب انرژی (که در شکل ۵ نشان داده شده است) باعث می‌شود پیوند سازه افزایش یابد. این افزایش پیوند باعث می‌شود رفتار لرزه‌ای پل دارای جداساز متفاوت از پل بدون جداساز باشد. حساسیت پاسخ سازه در تاریخچه زمانی جابجایی عرشه نسبت به یک شتاب‌نگاشت ثابت گویای این نکته است. چراکه در پل بدون جداساز بیشینه جابجایی در پیک اول زلزله ایجاد شده است و در دو پیک بعدی مقدار جابجایی کمتر از پیک اول است. مقایسه‌ی منحنی‌های سرعت و جابجایی رکورد زلزله سنفرنادو (شکل ۷) نشان می‌دهد که درست در لحظه‌ای که پل بدون جداساز بیشترین جابجایی را داشته است سرعت رکورد زلزله سنفرنادو بیشترین مقدار بوده است. به عبارت دیگر پل بدون جداساز در محدوده‌ی حساس به سرعت قرار داشته است و در لحظه‌ی که سرعت برابر با PGV است پاسخ سازه بیشترین مقدار است. بررسی بیشترین پاسخ پل دارای جداساز لرزه‌ای نشان می‌دهد که درست در لحظه‌ای که جابجایی عرشه بیشینه است جابجایی در رکورد زلزله سنفرنادو برابر با PGD است. در واقع اضافه شدن جداساز باعث

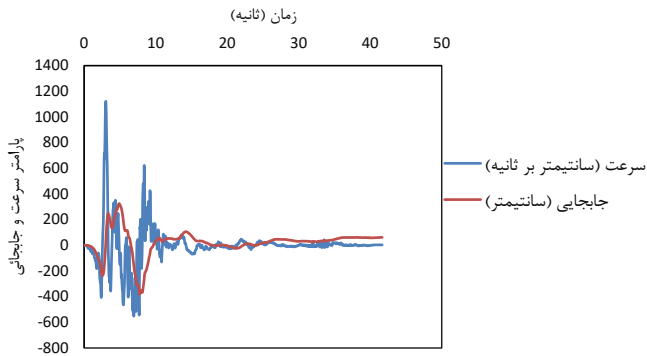
پاسخ لرزه‌ای پل بی‌امرسن نیست، چرا که در تحقیقات مختلفی پاسخ لرزه‌ای این پل و تاثیر استفاده از جداساز لرزه‌ای بررسی شده است. همانطور که در مقدمه تحقیق ذکر شده است، هدف اصلی این تحقیق بررسی حساسیت پاسخ لرزه‌ای نسبت به متغیرهای تصادفی است، بنابراین و با توجه به حجم بالای مدل عددی و زمان تحلیل بسیار زیاد و انجام تحلیل مونت کارلو که به خودی خود بسیار زمان بر است از یک تک رکورد زلزله حوزه نزدیک برای ارزیابی حساسیت پاسخ لرزه‌ای استفاده شده است.

۴- بررسی نتایج

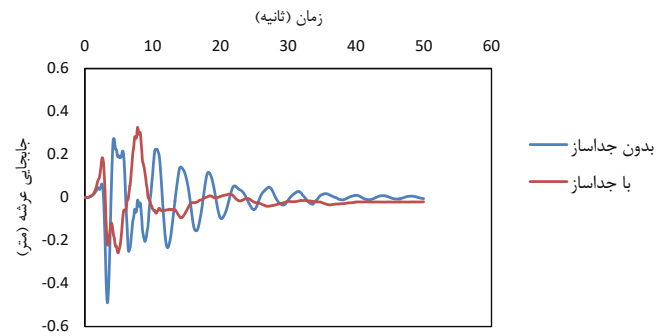
۴-۱- بررسی پاسخ سازه تحت بار لرزه‌ای

در گام نخست تحلیل ابتدا پاسخ پل تحت زلزله‌ی سنفرنادو در دو حالت با جداساز و بدون جداساز بررسی شده است. پل کابلی موردنظر این تحقیق تحت زلزله‌ی سنفرنادو به صورت غیرخطی تحلیل شده و برش پایه و جابجایی عرشه به عنوان پاسخ‌های موردنظر تحلیل انتخاب شده‌اند. در ابتدا منحنی هیستریزیس یکی از جداسازهای موردنظر تحقیق تحت این بار لرزه‌ای بررسی شده است. در شکل ۵ منحنی نیرو تغییر مکان در جداساز لرزه‌ای RNC نشان داده شده است. برای ارزیابی صحت مدل‌سازی و ارائه اعتبار سنجی، این منحنی با منحنی نیرو تغییر مکان در تحلیل عددی مرجع [۴] مقایسه شده است. از آن جایی که کلیه مشخصات مربوط به این تحقیق بر مبنای این مرجع لحاظ شده است، نتایج مدل‌سازی عددی این تحقیق نشان می‌دهد منحنی‌های نیرو تغییر مکان در جداسازها همگرایی مناسبی با هم دارند. حداکثر خطا در این منحنی هیستریزیس برابر با ۸.۹٪ محاسبه شده است. بر اساس این شکل منحنی هیستریزیس نشان می‌دهد روند مدل‌سازی این جداساز توانسته است معیارهای رفتاری جداساز RNC را مطابق مرجع [۴] به خوبی مدل کند.

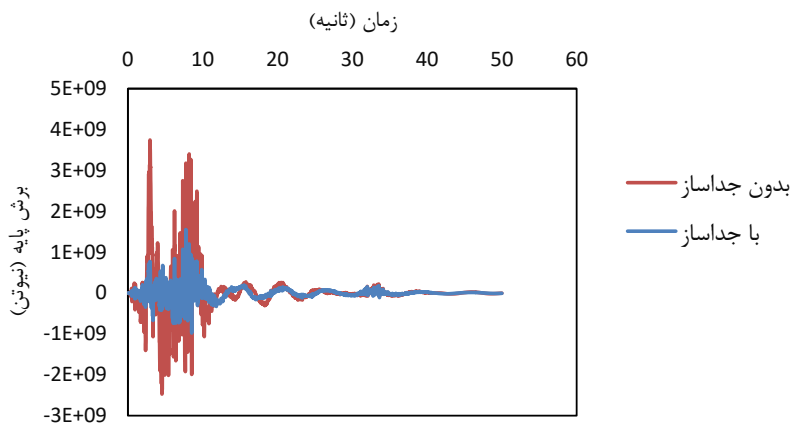
در شکل ۶ منحنی تاریخچه زمانی عرشه پل کابلی در حالت با و بدون جداساز نشان داده شده است. بررسی پاسخ پل‌های جداسازی شده و بدون جداساز نشان می‌دهد که رفتار دو سازه کاملاً متفاوت از هم است. بیشترین جابجایی عرشه در پل بدون جداساز لرزه‌ای برابر با ۴۹ سانتی‌متر در جهت منفی محاسبه شده است در حالی که بیشینه جابجایی عرشه در پل دارای جداساز RNC برابر با ۳۱ سانتی‌متر در جهت مثبت محاسبه شده است. نتایج نشان می‌دهد بیشینه جابجایی



شکل ۷. منحنی‌های سرعت و جابجایی رکورد زلزله سنفرنادو
 Fig. 7. Sanfernado earthquake record velocity and displacement curves



شکل ۶. منحنی تاریخچه زمانی جابجای افقی عرشه در پل دارای جداساز RNC و بدون جداساز لرزه‌ای تحت زلزله سنفرنادو
 Fig. 6 Horizontal displacement time history curve in bridge with RNC isolator and without seismic isolator under Sanfernado earthquake



شکل ۸. منحنی تاریخچه زمانی برش پایه در دو پل دارای جداساز RNC و بدون جداساز
 Fig. 8. base shear time history curve in two bridges with and without RNC isolator

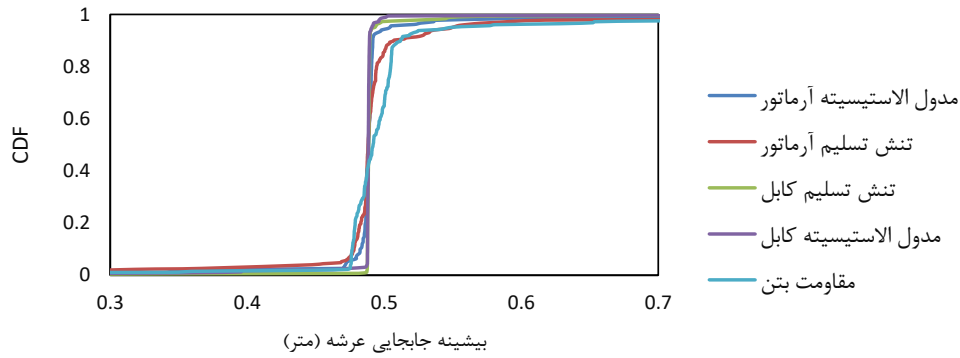
آسیب ناشی از بار لرزه‌ای خواهد شد. این کاهش برش پایه در سازه‌ی دارای جداساز لرزه‌ای برابر با ۵۹٪ بوده است. همچنین زمانی که پل دارای جداساز و بدون جداساز بیشترین برش پایه را تجربه می‌کنند در همان لرزه‌ای است که بیشترین جابجایی عرشه در سازه ایجاد می‌شود.

۴-۲- تحلیل حساسیت به روش مونت کارلو

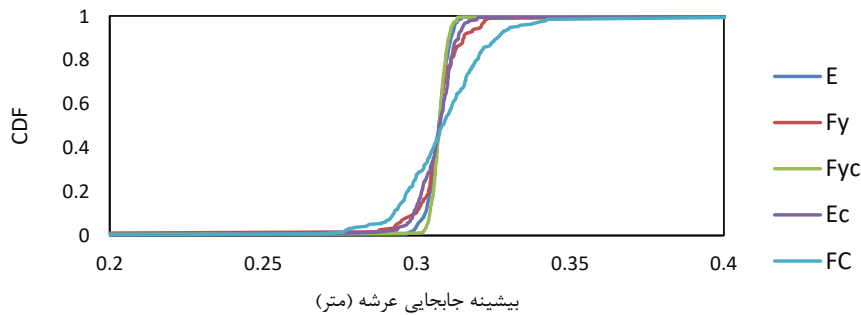
پس از بررسی‌های اولیه دو پل موردنظر این تحقیق تحت تحلیل‌های مونت کارلو و FOSM قرار گرفته‌اند تا میزان تاثیر متغیرهای تصادفی عنوان شده در بخش ۳-۱ بر بیشینه برش پایه و تغییر مکان عرشه بررسی شود. در شکل ۹ نتایج حاصل از تحلیل مونت کارلو نشان برای بیشینه جابجایی عرشه پل با و بدون جداساز لرزه‌ای نشان داده شده است. نتایج تحلیل مونت کارلو به صورت

شده است سازه از محدوده حساس به سرعت به محدوده حساس به جابجایی منتقل شود و بیشینه پاسخ در آن در لحظه‌ی رخ دهد که جابجایی رکورد برابر با PGD است.

در ادامه منحنی‌های برش پایه دو سازه بررسی شده است تا تاثیر جداساز RNC بر برش پایه نیز ارزیابی شود. در شکل ۸ منحنی‌های تاریخچه زمانی برش پایه در پل جداسازی شده و بدون جداساز تحت زلزله سنفرنادو نشان داده شده است. نتایج حاصل از تحلیل نشان می‌دهد در سازه دارای جداساز RNC برش پایه وارد بر سازه به مراتب کمتر از سازه‌ی بدون جداساز لرزه‌ای است. کاهش برش پایه در یک سازه دو مفهوم را می‌رساند، مفهوم اول این است که ظرفیت سازه در برابر بار لرزه‌ای کمتر است و مفهوم دوم این است که با اضافه شدن جداساز لرزه‌ای و افزایش پیروی رفتار سازه نرم‌تر شده و برش وارده بر آن کاهش می‌یابد که این کاهش برش پایه باعث کاهش



(الف)



(ب)

شکل ۹. نتایج تحلیل حساسیت به روش مونت کارلو برای بیشینه جابجایی افقی عرشه

Fig. 9 Monte Carlo sensitivity analysis results for maximum horizontal deck displacement

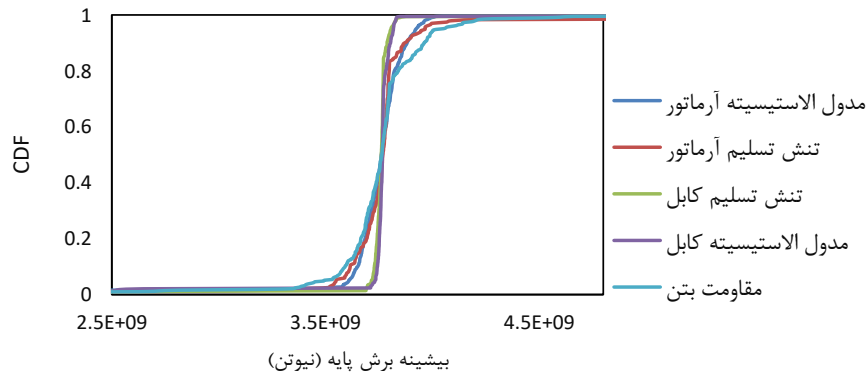
جدول ۳. خلاصه نتایج تحلیل مونت کارلو برای حساسیت سنجی بیشینه جابجایی عرشه

Table 3. summarizes the results of Monte Carlo analysis for maximum deck displacement sensitivity

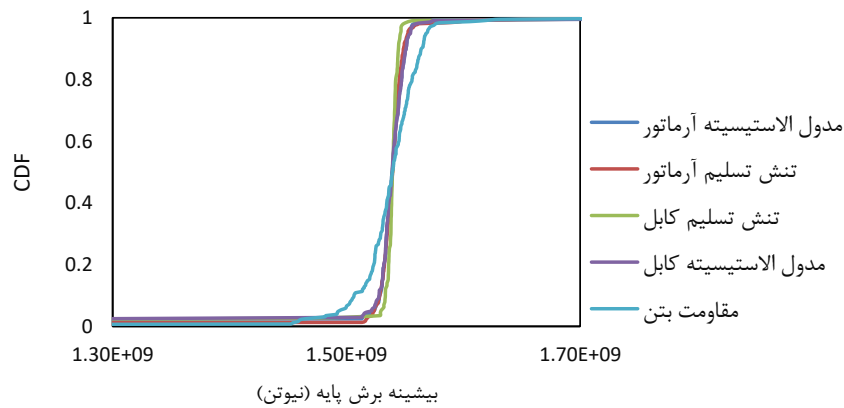
		مدول الاستیسیته آرماتور	تنش تسلیم آرماتور	تنش تسلیم کابل	مدول الاستیسیته کابل	مقاومت بتن
با جداساز RNC	میانگین	0.306	0.306	0.306	0.306	0.306
	نوسان	0.018	0.028	0.017	0.024	0.033
	ضریب حساسیت	0.059	0.091	0.058	0.081	0.108
بدون جداساز	میانگین	0.488	0.488	0.488	0.488	0.488
	نوسان	0.053	0.097	0.029	0.057	0.115
	ضریب حساسیت	0.109	0.199	0.060	0.117	0.236

شده است. در واقع برای بررسی تاثیر هر متغیر تصادفی بر پاسخ لرزه‌ای سازه یک تحلیل مجزا در غالب روش تحلیل مونت کارلو انجام شده است. در هر تحلیل پارامتر مورد نظر با توزیع خود در تحلیل در نظر گرفته شده است و سایر پارامترها در مقدار میانگین خود لحاظ شده‌اند. برای انجام تحلیل حساسیت برای هر متغیر، سایر متغیرهای دارای مقدار (تعیینی) میانگین توزیع خود هستند. پهنای منحنی CDF می‌تواند یک معیار برای حساسیت سنجی در نظر گرفته شود.

منحنی‌های تجمعی احتمال (CDF) برای مقادیر مختلف جابجایی عرشه ارائه شده است. این منحنی نشان می‌دهد به ازای یک مقدار مشخص از تغییر مکان چه مقدار احتمال دارد تا در اثر این زلزله بیشینه جابجایی عرشه از این مقدار کمتر شود. این منحنی نشان می‌دهد که در صورتی که یک پارامتر با توزیع احتمالی خود در نظر گرفته شود چه مقدار بر پاسخ سازه‌ها تاثیر می‌گذارد. برای ارزیابی تاثیر هر یک از پارامترها بر پاسخ سازه یک تحلیل مونت کارلو انجام



(الف)



(ب)

شکل ۱۰. نتایج تحلیل حساسیت به روش مونت کارلو برای بیشینه برش پایه
 Fig. 10. Monte Carlo sensitivity analysis results for maximum base shear

برای ارزیابی بهتر میزان حساسیت پارامترهای مختلف از مفهوم نوسان^۱ استفاده شده است. تغییرات پاسخ سازه در اثر تغییرات ورودی یا متغیرهای تصادفی یا عدم قطعیت‌ها با عنوان نوسانات تعریف می‌شود. اندازه‌ی نوسان نشان می‌دهد که تأثیر متغیر تصادفی بر پاسخ سازه‌ها چه مقداری است. در این تحقیق اندازه نوسان پاسخ‌ها به صورت فاصله‌ی بین میانگین بعلاوه‌ی انحراف معیار تا میانگین منهای انحراف معیار (دو برابر انحراف معیار پاسخ‌ها) در نظر گرفته شده است. یکی دیگر از معیارهای ارزیابی حساسیت ضریب حساسیت است. در این تحقیق نسبت نوسان به میانگین به عنوان ضریب حساسیت تعریف شده است. در جدول ۳ خلاصه‌ی نتایج تحلیل مونت کارلو برای بیشینه جابجایی عرشه به صورت سه پارامتر میانگین، نوسان و ضریب حساسیت نشان داده شده است. نتایج تحلیل حساسیت به

هرچقدر منحنی CDF پهن‌تر باشد نشان می‌دهد پراکندگی پاسخ‌ها بیشتر است و پارامتر مربوطه توانسته است پراکندگی بیشتری را در پاسخ‌ها ایجاد کند. شکل ۹-الف منحنی‌های CDF را برای بیشینه جابجایی پل برای حالت بدون جداساز نشان می‌دهد. بررسی این شکل نشان می‌دهد که دو پارامتر تنش تسلیم آرماتور و مقاومت نهایی بتن بیشترین پراکندگی را برای بیشینه جابجایی عرشه ایجاد کرده است که نشان می‌دهد این دو پارامتر بیشترین حساسیت را برای جابجایی بیشینه عرشه ایجاد کرده‌اند. شکل ۹-ب نتایج تحلیل حساسیت سنجی به روش مونت کارلو را به صورت منحنی‌های CDF برای بیشینه جابجایی پل برای حالت با جداساز RNC نشان می‌دهد. در این شکل برخلاف شکل ۹-الف مقاومت نهایی بتن بیشترین پهنا را دارد که نشان می‌دهد تغییرات مقاومت نهایی بتن تأثیر بیشتری را بر بیشینه جابجایی عرشه ایجاد کرده است.

1 swing

جدول ۴. خلاصه نتایج تحلیل مونت کارلو برای حساسیت سنجی بیشینه برش پایه
Table 4. Summary of the results of Monte Carlo analysis for maximum shear sensitivity

		مدول الاستیسیته آرما تور	تنش تسلیم آرما تور	تنش تسلیم کابل	مدول الاستیسیته کابل	مقاومت بتن
با جداساز	میانگین	1.54E+09	1.54E+09	1.54E+09	1.54E+09	1.54E+09
	نوسان	5.31E+07	1.12E+08	6.92E+07	7.29E+07	1.51E+08
	ضریب حساسیت	0.034	0.072	0.044	0.047	0.097
بدون جداساز	میانگین	3.76E+09	3.76E+09	3.76E+09	3.76E+09	3.76E+09
	نوسان	4.019e+9	6.41e+9	2.79E+9	4.6E+9	7.438E+9
	ضریب حساسیت	0.106	0.171	0.074	0.122	0.197

از تاثیر این متغیرها بر بیشینه جابجایی عرشه است. همچنین همانند بیشینه جابجایی عرشه ضریب حساسیت در سازه بدون جداساز بیشتر از مقدار مشابه در پل جداسازی شده است. مقاومت نهایی بتن بیشترین تاثیر را در بیشترین برش پایه پلها تحت بار لرزه ای دارد. در پل بدون جداساز RNC مدول الاستیسیته آرما تور کمترین تاثیر را بر تغییرات بیشینه برش پایه دارد درحالی که در پل بدون جداساز تنش تسلیم کابل کمترین تاثیر را بر بیشینه برش پایه از خود نشان می دهد. پس از مقاومت نهایی بتن تنش تسلیم آرما تور بیشترین تاثیر را بر تغییرات برش پایه در هر دو پل دارای جداساز و بدون جداساز دارد.

۳-۴ تحلیل حساسیت به روش FOSM

روش تحلیل مونت کارلو یک روش بسیار زمان بر با تعداد تحلیل های بسیار بالا اما با دقت بسیار زیاد است. اما روش تحلیل حساسیت FOSM یک روش سریع برای رسیدن به انحراف معیار پاسخها با توجه به نوع تابع توزیع متغیرهای تصادفی است. با این حال این روش نسبت به روش مونت کارلو دارای خطا نیز هست که در این تحقیق به میزان این خطا نیز پرداخته شده است. در این تحقیق نتایج حاصل از روش تحلیل حساسیت FOSM با روش مونت کارلو مقایسه شده است. نتایج تحلیل حساسیت FOSM به صورت مقدار نوسانات (دو برابر انحراف معیار) محاسبه و ارائه شده است. همچنین ضریب حساسیت با این روش محاسبه و در نهایت میزان خطای تحلیل FOSM نسبت به تحلیل مونت کارلو سنجیده شده است. خلاصه

روش مونت کارلو نشان می دهد که ضریب حساسیت در سازه بدون جداساز لرزه ای بیشتر از پل دارای جداساز است. هرچه این ضریب بزرگ تر باشد نشان می دهد که حساسیت سازه نسبت به آن متغیر بیشتر است. بنابراین نتایج تحلیل نشان می دهد که وجود جداساز در پل علاوه بر اینکه پاسخ سازه را کاهش می دهد حساسیت پاسخ را نسبت به متغیرهای تصادفی را نیز کاهش می دهد. پارامترهایی مانند مدول الاستیسیته آرما تور و تنش تسلیم کابل کمترین تاثیر را بر تغییرات جابجایی عرشه دارند. با این حال مدول الاستیسیته کابل به علت تأثیری که بر پیود سازه نیز دارد اثر بیشتری را بر تغییرات بیشینه جابجایی عرشه پلها می گذارد. همچنین بر اساس جدول ۳ بیشترین ضریب حساسیت در پل دارای جداساز تقریباً نصف مقدار مشابه در سازه ی بدون جداساز است.

در ادامه تاثیر متغیرهای تصادفی مورد نظر تحقیق بر بیشینه برش پایه پل های مورد نظر تحقیق بررسی شده است. شکل ۱۰ نتایج حاصل از تحلیل حساسیت به روش مونت کارلو به صورت منحنی های CDF مربوط به بیشینه برش پایه را برای متغیرهای مورد نظر این تحقیق نشان می دهد. بر اساس این شکل و مقایسه آن با شکل ۹ می توان نتیجه گرفت دامنه تغییرات منحنی CDF برای برش پایه کمتر از بیشینه جابجایی عرشه است. خلاصه نتایج حاصل از تحلیل مونت کارلو در غالب نوسان، میانگین و ضریب حساسیت در جدول ۴ نشان داده شده است. بر اساس جدول ۴ و شکل ۱۰ می توان نتیجه گرفت که تاثیر متغیرهای تصادفی بر تغییرات بیشینه برش پایه کمتر

جدول ۵. نتایج تحلیل حساسیت به روش FOSM برای بیشینه جابجایی عرشه
Table 5. FOSM method sensitivity analysis results for maximum deck displacement

		مدول الاستیسیته آرماتور	تنش تسلیم آرماتور	تنش تسلیم کابل	مدول الاستیسیته کابل	مقاومت بتن
با جداساز RNC	میانگین	0.306	0.306	0.306	0.306	0.306
	نوسان	0.018	0.032	0.0168	0.028	0.035
	ضریب حساسیت	0.06	0.104	0.055	0.094	0.114
	خطا	4.42	14.24	-5.59	16.0	6.028
بدون جداساز	میانگین	0.488	0.488	0.488	0.488	0.488
	نوسان	0.055	0.107	0.025	0.060	0.105
	ضریب حساسیت	0.113	0.220	0.052	0.124	0.216
	خطا	3.736	10.23	-13.468	5.891	-8.637

جدول ۶. نتایج تحلیل حساسیت به روش FOSM برای بیشینه برش پایه
Table 6. FOSM Sensitivity Analysis Results for Maximum Base shear

		مدول الاستیسیته آرماتور	تنش تسلیم آرماتور	تنش تسلیم کابل	مدول الاستیسیته کابل	مقاومت بتن
با جداساز RNC	میانگین	1540000000	1540000000	1540000000	1540000000	1540000000
	نوسان	54888864.95	131503841.1	77168687.44	69900066.41	130874011
	ضریب حساسیت	0.035	0.085	0.050	0.045	0.084
	خطا	-3.39E+00	-1.79E+01	-1.16E+01	4.12E+00	1.33E+01
بدون جداساز	میانگین	3760000000	3760000000	3760000000	3760000000	3760000000
	نوسان	381910932.8	681265401.6	259759239.4	481736530.8	813848032.3
	ضریب حساسیت	0.101	0.181	0.069	0.128	0.216
	خطا	4.976	-6.23	7.149	-4.33	-9.41

حداکثر خطای تحلیل حساسیت به روش FOSM نسبت به روش مونت کارلو در این تحقیق مربوط به تغییرات تنش تسلیم آرماتور بر برش پایه پل با جداساز RNC است.

خلاصه و نتیجه گیری

هدف از این تحقیق ارزیابی تاثیر متغیرهای تصادفی مربوط به مصالح در پاسخ یک پل کابلی تحت زلزله حوزه نزدیک بود. در این تحقیق پل موردنظر پل از مدل سازی مجهز به جداساز RNC شده و سپس در دو حالت با جداساز و بدون آن در معرض زلزله‌ی سنفرنادو قرار گرفت. در گام نخست پاسخ پل موردنظر تحت زلزله عنوان شده

نتایج تحلیل حساسیت به روش FOSM در جدول ۵ و ۶ نشان داده شده است. نتایج این تحلیل نشان می‌دهد همانند تحلیل مونت کارلو تغییرات مقاومت نهایی بتن بیشترین تاثیر را بر مقادیر پاسخ پل‌های جداسازی شده و بدون جداساز می‌گذارد. بیشترین خطای تحلیل FOSM در سازه جداسازی شده برای بیشینه جابجایی عرشه برابر با ۱۶ درصد محاسبه شده است. این مقدار برای پل بدون جداساز برابر با ۱۰.۲ درصد محاسبه شده است. بیشترین خطای تحلیل FOSM برای تاثیر متغیرهای تصادفی بر برش پایه پل جداسازی شده برابر با ۱۷ درصد محاسبه شده است که این مقدار برای حالت پل بدون جداساز برابر با ۹.۴ درصد بوده است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت

است همانند تحلیل مونت کارلو مقاومت نهایی بتن بیشترین تاثیر را بر پاسخ‌های مدل‌های سازه‌ای این تحقیق داشته است. در نهایت خطای تحلیل حساسیت به روش FOSM نسبت به روش مونت کارلو محاسبه شده است. نتایج نشان داده است بیشترین خطای تحلیل FOSM نسبت به تحلیل مونت کارلو در مدل جداسازی شده برابر با ۱۶٪ و در مدل بدون جداساز برابر یا ۱۰.۲٪ محاسبه شده است.

قدردانی

این تحقیق تحت حمایت دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل با شماره گرنت BUT/388011/98 قرار گرفت.

مراجع

- [1] H.-E.M. Ali, A.M. Abdel-Ghaffar, Seismic passive control of cable-stayed bridges, *Shock and Vibration*, 2(4) (1995) 259-272.
- [2] K.-S. Park, H.-J. Jung, I.-W. Lee, Hybrid control strategy for seismic protection of a benchmark cable-stayed bridge, *Engineering Structures*, 25(4) (2003) 405-417.
- [3] H.E.M. Ali, A.M. Abdel-Ghaffar, Seismic energy dissipation for cable-stayed bridges using passive devices, *Earthquake engineering & structural dynamics*, 23(8) (1994) 877-893.
- [4] M. Ismail, J. Rodellar, F. Ikhouane, Seismic protection of low-to moderate-mass buildings using RNC isolator, *Structural Control and Health Monitoring*, 19(1) (2012) 22-42.
- [5] N. MAKRIS, Rigidity-plasticity-viscosity: Can electrorheological dampers protect base-isolated structures from near-source ground motions?, *Earthquake engineering & structural dynamics*, 26(5) (1997) 571-591.
- [6] P.K. Malhotra, Response of buildings to near-field pulse-like ground motions, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 28(11) (1999) 1309-1326.
- [7] J.M. Kelly, Aseismic base isolation: review and bibliography, *Soil Dynamics and earthquake engineering*, 5(4) (1986) 202-216.
- [8] Z. Kala, Global sensitivity analysis of reliability of structural

بررسی شده است. نتایج نشان داد پل دارای جداساز RNC توانسته است جابجایی عرشه را کاهش دهد و کنترل مناسبی در جهت حرکت افقی عرشه داشته باشد به طوری که بیشینه جابجایی افقی عرشه در پل دارای جداساز RNC ۳۴٪ کمتر از پل بدون جداساز بوده است. همچنین استفاده از جداساز RNC برش پایه وارد بر پل را نیز کاهش داده است. نتایج نشان داده است استفاده از جداساز RNC توانسته است بیشینه برش پایه وارد بر پل را تا ۵۹٪ در زلزله سنفرناردو کاهش دهد. ارائه حساسیت پاسخ لرزه‌ای یک پل کابلی در دو حالت بدون جداساز و با جداساز RNC مهم‌ترین هدفی است که در این تحقیق به آن پرداخته شده است. برای این منظور و با وجود حجم بالای المان‌ها و زمان طولانی تحلیل از روش مونت کارلو برای انجام تحلیل حساسیت استفاده شده است.

در ادامه با استفاده از تحلیل مونت کارلو تاثیر متغیرهای تصادفی بر بیشینه جابجایی افقی عرشه و بیشینه برش پایه بررسی شده است. نتایج این تحلیل که با استفاده از منحنی‌های CFD، میانگین پاسخ و انحراف معیار پاسخ‌ها ارائه شده است نشان داد که تغییرات مقاومت نهایی بتن و تنش تسلیم آرماتور بیشترین تاثیر را بر تغییرات بیشینه برش پایه و بیشینه جابجایی افقی عرشه داشته است. ضریب حساسیت یکی دیگر از پارامترهای محاسبه شده در این تحقیق بود که با نسبت دو برابر انحراف معیار به میانگین پاسخ‌ها تعریف شده است. نتایج تحلیل حساسیت به روش مونت کارلو بر روی بیشینه جابجایی افقی عرشه نشان می‌دهد که ضریب حساسیت برای مدول الاستیسیته آرماتور، تنش تسلیم آرماتور، تنش تسلیم کابل، مدول الاستیسیته کابل و مقاومت بتن در سازه با جداساز به ترتیب برابر با ۰.۰۵۹، ۰.۰۹۲، ۰.۰۵۸، ۰.۰۸۲ و ۰.۱ است. ضریب حساسیت در این پارامترها در پل بدون جداساز به ترتیب برابر با ۰.۱، ۰.۲، ۰.۰۶، ۰.۱۲ و ۰.۲۳ است. ضریب حساسیت در این پارامترها برای بیشینه برش پایه برای پل جداسازی شده به ترتیب برابر با ۰.۰۳، ۰.۰۷، ۰.۰۴۵، ۰.۰۴۴ و ۰.۱ و برای پل بدون جداساز برابر با ۰.۱۱، ۰.۱۷، ۰.۰۷، ۰.۱۲ و ۰.۱۹ است. مقایسه ضریب حساسیت پل‌های جداسازی شده و بدون جداساز به متغیرهای تصادفی نشان می‌دهد که سازه جداسازی شده حساسیت کمتری نسبت به متغیرهای تصادفی دارد. در ادامه تحلیل حساسیت سنجی به روش FOSM بر روی مدل‌های موردنظر تحقیق انجام شده است. نتایج نشان داده

- Processing, 119 (2019) 293-311.
- [15] R. Jangid, J. Kelly, Base isolation for near-fault motions, *Earthquake engineering & structural dynamics*, 30(5) (2001) 691-707.
- [16] M.J. Wesolowsky, J.C. Wilson, Seismic isolation of cable-stayed bridges for near-field ground motions, *Earthquake engineering & structural dynamics*, 32(13) (2003) 2107-2126.
- [17] M. Ismail, J. Rodellar, F. Ikhrouane, A seismic isolation system for supported objects. Spanish Patent No. P200802043, Spanish Office of Patents and Marks, (2008).
- [18] M. Ismail, J.R. Casas, J. Rodellar, Near-fault isolation of cable-stayed bridges using RNC isolator, *Engineering Structures*, 56 (2013) 327-342.
- [19] Z. Kala, J. Valeš, Imperfection sensitivity analysis of steel columns at ultimate limit state, *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 18(4) (2018) 1207-1218.
- [20] J. Kim, J.-H. Park, T.-H. Lee, Sensitivity analysis of steel buildings subjected to column loss, *Engineering Structures*, 33(2) (2011) 421-432.
- [21] T.H. Lee, K.M. Mosalam, Seismic demand sensitivity of reinforced concrete shear-wall building using FOSM method, *Earthquake engineering & structural dynamics*, 34(14) (2005) 1719-1736.
- bridge system, *Engineering Structures*, 194 (2019) 36-45.
- [9] Y. Xie, R. DesRoches, Sensitivity of seismic demands and fragility estimates of a typical California highway bridge to uncertainties in its soil-structure interaction modeling, *Engineering Structures*, 189 (2019) 605-617.
- [10] S. Mangalathu, J.S. Jeon, R. DesRoches, Critical uncertainty parameters influencing seismic performance of bridges using Lasso regression, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 47(3) (2018) 784-801.
- [11] B.G. Nielson, R. DesRoches, Influence of modeling assumptions on the seismic response of multi-span simply supported steel girder bridges in moderate seismic zones, *Engineering structures*, 28(8) (2006) 1083-1092.
- [12] E. Sapountzakis, P. Syrimi, I. Pantazis, I. Antoniadis, KDamper concept in seismic isolation of bridges with flexible piers, *Engineering Structures*, 153 (2017) 525-539.
- [13] J.X. Mao, H. Wang, D.M. Feng, T.Y. Tao, W.Z. Zheng, Investigation of dynamic properties of long-span cable-stayed bridges based on one-year monitoring data under normal operating condition, *Structural Control and Health Monitoring*, 25(5) (2018) e2146.
- [14] P. Ni, Y. Xia, J. Li, H. Hao, Using polynomial chaos expansion for uncertainty and sensitivity analysis of bridge structures, *Mechanical Systems and Signal*

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. Moradi, H.R. Tavakoli, *Sensitivity Analysis of Response of a Cable Bridge with Base Isolation to Material Variation under Near Earthquake*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 52(12) (2021) 3145-3160.

DOI: [10.22060/ceej.2019.16617.6280](https://doi.org/10.22060/ceej.2019.16617.6280)



