

Damage Probability and Reliability Assessment of Cable-Stayed Bridge Isolated with Roll-N-Cage (RNC) Isolators (Case Study of Bill Emerson Bridge)

Mohammad Esmaeilnia Omran ^{1*}, Abbas Hoseini Karani ²

1- Assistant Professor, Engineering Department, Kurdistan University, Kurdistan, Iran

2- PhD student, Engineering Department, Kurdistan University, Kurdistan, Iran

ABSTRACT

Seismic isolators are the common methods to improve the seismic performance of cable-stayed bridges. Roll-N-Cage (RNC) Isolator is one of the modern systems in recent years. In this paper, it is aimed to study the damage probability and reliability of cable-stayed bridges isolated with Roll-N-Cage (RNC) instruments. For this purpose, Bill Emerson Bridge is selected and based on the Monte Carlo method, damage probability assessment is performed under artificial seismic records and initial imperfection as cable loss. Artificial records have been produced with a proper distribution of random data based on the frequency content and duration of the earthquake and also according to the model of the spectral density function of the earthquake with the dominant Kanai-Tajimi frequency. Nonlinear time history dynamic analysis under the mentioned records are performed for 2000 random samples in accordance with the Monte Carlo method in the form of modeling in MATLAB and Opensees software. The results show that without initial imperfection, the bridge has proper vibration and isolator performance. The failure is observed only in the form of minor permanent deformations of the deck at the end of the vibration. The probability of failure of the cable-stayed bridge without initial imperfection is about 1%, which has a reliability index of 2.3263. By applying an initial imperfection in the middle cable of the middle span of the model, under some records, it experiences a complete collapse. In these conditions, the probability of failure is 2.81% and the reliability index of the bridge is 1.911.

ARTICLE INFO

Receive Date: 17 November 2021

Revise Date: 21 February 2022

Accept Date: 21 April 2022

Keywords:

Cable-Stayed Bridge, Roll-N-Cage (RNC) isolator
Damage Probability
Reliability Assessment
Artificial Records

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2022.306927.2592>

*Corresponding author: Mohammad Esmaeilnia Omran.

Email address: m.esmaeilnia@uok.ac.ir

ارزیابی احتمال خرابی و قابلیت اطمینان در پل‌های کابلی جداسازی شده با جداساز

غلطکی درون قفس (مطالعه موردی پل کابلی بیل امرسون)

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

۱- استادیار، دانشکده مهندسی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران

۲- دانشجوی دکترا، دانشکده مهندسی، دانشگاه کردستان سنندج، ایران

چکیده

استفاده از جداسازهای لرزه‌ای یکی از روش‌های متداول برای بهبود عملکرد لرزه‌ای پل‌های کابلی است. جداساز غلطکی درون قفس یکی از سیستم‌های نوین در سال‌های اخیر است که در این مقاله سعی شده تا احتمال خرابی و قابلیت اطمینان پل‌های کابلی جداسازی شده با استفاده از این جداساز تحت بارهای لرزه‌ای و بعد از حذف یک کابل از آن مورد مطالعه قرار گیرد. به همین منظور پل کابلی بیل امرسون انتخاب و براساس روش مونت کارلو، تحلیل احتمال خرابی برای بروز نقص اولیه و تحت رکوردهای لرزه‌ای مصنوعی انجام شده است. رکوردهای مصنوعی با توزیع مناسبی از داده‌های تصادفی براساس محتوای فرکانسی و مدت زمان لرزه و همچنین مطابق مدل تابع چگالی طیفی زمین لرزه با فرکانس غالب کانای-تاجیمی تولید شده‌اند. تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی تحت رکوردهای مذکور برای ۲۰۰۰ نمونه تصادفی و مطابق با روش مونت کارلو در قالب مدل‌سازی در نرم افزار متلب و اپنسیس انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد که بدون نقص اولیه پل دارای ارتعاش و عملکرد مناسب جداساز غلطکی درون قفس تحت رکوردهای لرزه‌ای است و خرابی در پل تنها بصورت بروز تغییرشکلهای ماندگار جزئی در انتهای ارتعاش مشاهده می‌شود. احتمال خرابی پل کابلی مورد بررسی در حالت جداسازی شده بدون نقص اولیه حدود ۱ درصد می‌باشد که دارای شاخص قابلیت اطمینان ۲/۳۲۶۳ است. با اعمال نقص اولیه در کابل میانی دهانه وسط مدل تحت برخی رکوردها توسعه نقص و خرابی را تجربه می‌کند. در این شرایط احتمال خرابی ۲/۸۱ درصد و شاخص قابلیت اطمینان سازه ۱/۹۱۱ و قابل توجه می‌باشد. چنانچه نقص اولیه در دو کابل مجاور در دهانه وسط ایجاد شود، احتمال خرابی ۸/۷۸ درصد و شاخص قابلیت اطمینان ۱/۳۵۳۲ بدست می‌آید.

کلمات کلیدی: پل کابلی، جداساز غلطکی درون قفس، احتمال خرابی، ارزیابی قابلیت اطمینان، رکورد مصنوعی

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	https://doi.org/10.22065/jsce.2022.306927.2592	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2022.306927.2592	۱۴۰۱/۱۰/۳۰	۱۴۰۱/۰۲/۰۱	۱۴۰۱/۰۲/۰۱	۱۴۰۰/۱۲/۰۲	۱۴۰۰/۰۸/۲۶
محمد اسماعیل نیا عمران m.esmaeilnia@uok.ac.ir					*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:	

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر، ارزیابی احتمال خرابی سازه‌ها در برابر بارهای دینامیکی ناشی از زمین لرزه‌های شدید مورد توجه محققان و مهندسان طراح بوده است. این مسئله در مورد زیرساخت‌های عمرانی و بخصوص پل‌ها اهمیت دوچندانی دارد، چراکه بروز خرابی در این سازه‌ها خسارت‌های شدیدی به همراه داشته و ممکن است بحران‌های جدی را ایجاد نماید. مطالعه ارزیابی احتمال خرابی پل‌ها باید شرایط مختلفی که امکان وقوع دارد را شامل شود و نمی‌تواند منحصر به شرایط ایده‌آل و بدون نقص‌های اولیه باشد. چراکه ممکن است در طول عمر سرویس یک پل هر یک از اجزای باربر اصلی به دلایل پیش‌بینی نشده‌ای دچار خرابی و نقص بشوند. عدم وجود راهکاری مناسب برای انتقال ایمن نیروهای ایجاد شده در این شرایط می‌تواند منجر به وقوع خرابی پیشرونده شده و پایداری کل سازه را تهدید نماید [۱]. بدین سبب با تحلیل سازه در شرایط وقوع نقص اولیه و بکارگیری طرح‌های مناسب آن علاوه بر آنکه مقاومت سازه در برابر بارهای لرزه‌ای معمول را فراهم می‌کند، بلکه می‌تواند پایداری سازه را پس از خرابی هر یک از اجزای سازه‌ای آن فراهم نماید [۲، ۳]. بررسی این پدیده در پل‌های کابلی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است و مطالعات کای و همکاران در سال ۲۰۱۲ [۴]، هان و همکاران در سال ۲۰۱۱ [۵]، لی و همکاران در سال ۲۰۱۴ [۶]، دینگ و همکاران در سال ۲۰۱۴ [۷]، شریستا در سال ۲۰۱۵ [۸]، داس و همکاران در سال ۲۰۱۶ [۹]، ژانگ و همکاران در سال ۲۰۲۰ [۱۰] و شائو و همکاران در سال ۲۰۲۱ [۱۱] لزوم بررسی انواع خرابی در پل‌های کابلی و پدیده خرابی پیشرونده و همچنین لزوم افزایش ظرفیت لرزه‌ای این سازه‌ها را در برابر بارهای پیش‌بینی نشده‌ی ناشی از نقص‌های اولیه و یا بارهای مشابه را نشان می‌دهند.

افزایش ظرفیت لرزه‌ای با استفاده از تکنولوژی‌های نوین همچون جداسازهای لرزه‌ای یکی از روش‌های متداول امروزی است که با معرفی انواع مختلف و مدرن امروزی کاربرد گسترده‌ای پیدا کرده‌اند. مفهوم اصلی جداسازی لرزه‌ای یکی افزایش دوره تناوب سازه و دیگری افزایش میرایی سازه یا هردو با هم می‌باشد. امروزه موارد کاربرد زیادی از آن‌ها در سرتاسر دنیا بویژه در زلاندنو، امریکا، کانادا، ایتالیا، ایسلند، ژاپن و تایوان مشاهده می‌شود [۱۲]. با توجه به توانایی جداسازهای لرزه‌ای در کاهش نیروهای دینامیکی وارد بر پایه‌ها و کوله‌های پل، می‌توان به نحو مؤثری در مقاوم سازی پل‌ها در برابر بارهای لرزه‌ای و اثرات دینامیکی آنها بهره برد [۱۳ و ۱۴]. مطالعاتی همچون طالب نژاد و همکاران در سال ۲۰۱۱ [۱۵]، لی و همکاران در سال ۲۰۱۱ [۱۶]، پیپینتو و همکاران در سال ۲۰۱۲ [۱۷]، توکلی و همکاران در سال ۲۰۱۵ [۱۸]، وی و همکاران در سال ۲۰۱۶ [۱۹]، الانانی و تایت در سال ۲۰۱۷ [۲۰]، اسماعیل نیا و حسینی کرانی ۲۰۲۱ [۲۱] عملکرد لرزه‌ای پلهای کابلی و تاثیر جداسازهای لرزه‌ای را در بهبود عملکرد آن‌ها مورد بررسی قرار داده‌اند. این مطالعات نشان می‌دهند، جداسازهای لرزه‌ای می‌توانند در بهبود عملکرد پل‌های در برابر زمین‌لرزه‌های شدید موثر باشند.

جداساز لرزه‌ای غلطکی درون قفس^۱ یکی از سیستم‌های جداسازی نوین است که 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 شده است. مطالعات صورت گرفته نشان می‌دهد که سیستم مذکور عملکرد مناسبی در صلبیت قائم، شکل پذیری افقی و اتلاف هیستریزس انرژی از خود نشان می‌دهد [۱۴]. مطالعات محمد اسماعیل و همکاران در سال‌های ۲۰۱۳ و ۲۰۱۵ [۲۲، ۲۳ و ۲۴] نشان داده است که جداسازهای غلطکی درون قفس ابزاری قابل اتکا و مناسب به منظور ایجاد جداسازی ایزوتروپیک افقی بر روی پل‌های کابلی می‌باشند و همچنین ابزار مناسبی به منظور مقاوم سازی پل کابلی در برابر زمین لرزه‌های شدید و ضربه‌های دینامیکی هستند.

این مقاله سعی دارد به بررسی احتمال خرابی و قابلیت اطمینان پل‌های کابلی بعد از بروز نقص اولیه در کابل‌های آن بپردازد و تاثیر استفاده از جداساز غلطک درون قفس بر کنترل اثرات این پدیده را مطالعه نماید. بدین منظور پل کابلی بیل امرسون انتخاب و پس از انجام مدلسازی سازه تحت سناریوهای مختلف حذف کابل مورد مطالعه قرار داده است.

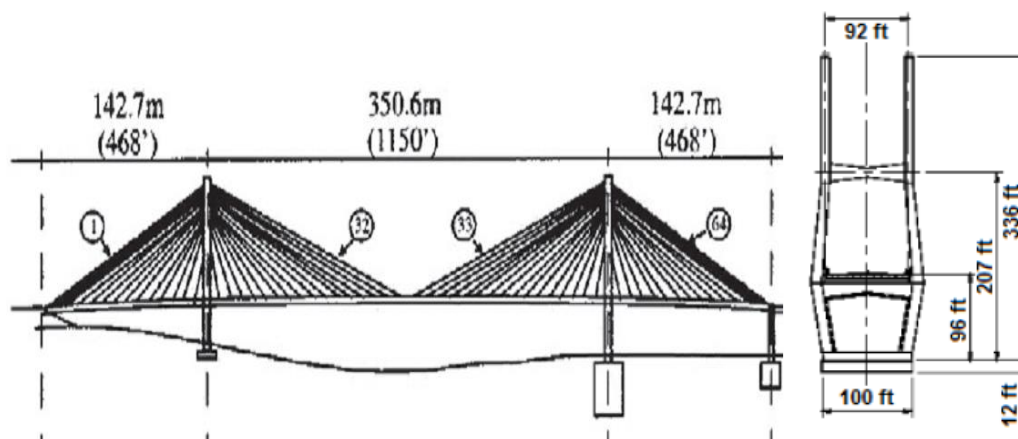
¹ Rolled-in-Cage

۲- مدل سازه‌ای

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 متر و ارتفاع برج ۱۵۰ متر می باشد که بر اساس پژوهش صورت گرفته توسط محمد اسماعیل و همکاران [۲۳] 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.



شکل ۱: نمایی از پل کابلی بیل امرسون در آمریکا [۲۰ و ۲۳]

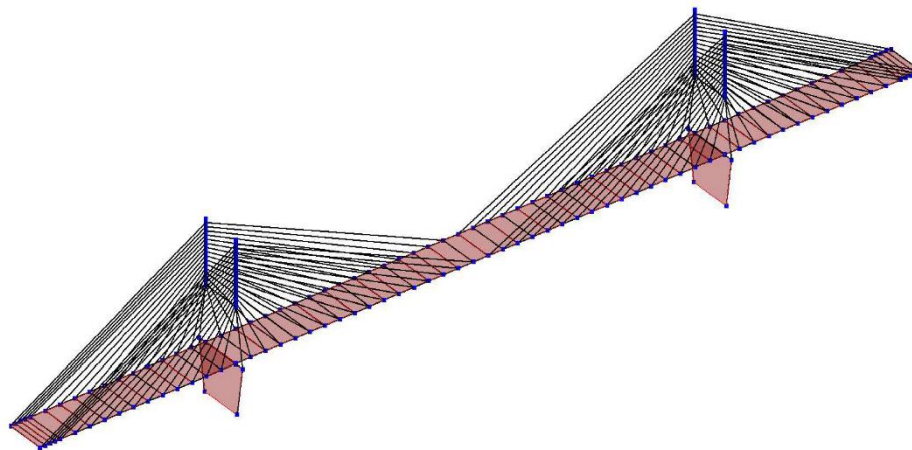


شکل ۲: مشخصات هندسی پل کابلی بیل امرسون [۲۰ و ۲۳]

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 بکارگرفته 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. المان های پایه های پل و عرشه با استفاده از المان های تیر-ستون نیرویی^۲ مدلسازی شده اند. ۱۲۸ کابل مورد استفاده در پل با استفاده از المان های خرابایی با رفتار کششی و پیش تنیدگی مدلسازی شده اند. مشخصات مربوط به کابلها در جدول ۱ ارائه شده است. لازم به توضیح 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 مدلسازی شده اند. اتصال پایه و عرشه ی پل به انتهای کابل ها در هر طرف آن با استفاده از المان های رابط صلب مدلسازی شده اند. در ادامه و در شکل ۳ مدل پل

² Force BeamColumn element

کابلی مورد بررسی نمایش داده شده است. در جدول ۲ فرکانس و دوره تناوب سازه در ۹ مود اول ارتعاش در حالت‌های مورد بررسی در این مقاله شامل حالت بدون نقص اولیه، حالت نقص اولیه در کابل میانی (کابل ۳۲) و همچنین حالت نقص اولیه در کابل میانی و کابل مجاور آن ارائه شده است.



شکل ۳: مدل پل کابلی بیل امرسون در نرم افزار اپنسیس [۲۰]

جدول ۱: مشخصات مربوط به کابل های پل بیل امرسون [۲۰ و ۲۵]

شماره کابل	طول (m)	قطر بیرونی (m)	مدول یانگ (GPa)	کشش کابل (KN)	چگالی (Kg/m^3)	وزن واحد طول (KN/m)
۱	۱۵۷,۴۷	۰,۲۷	۱۵,۵۸	۴۵۳۷,۲۰	۲۵۹۳,۶۰	۱,۴۹
۲	۱۵۳,۴۵	۰,۲۷	۱۵,۵۸	۴۷۵۸,۸۰	۲۵۹۳,۶۰	۱,۴۹
۳	۱۴۹,۴۵	۰,۲۷	۱۵,۰۲	۴۵۳۷,۲۰	۲۵۴۴,۰۰	۱,۴۶
۴	۱۴۵,۴۵	۰,۲۲	۱۹,۰۷	۴۳۵۹,۲۰	۲۷۶۳,۲۰	۱,۰۲
۵	۱۴۱,۵۸	۰,۲۲	۱۸,۰۶	۴۱۶۲,۹۰	۲۷۲۸,۰۰	۱,۰۱
۶	۱۳۱,۴۶	۰,۲۲	۱۷,۳۸	۴۰۱۰,۷۰	۲۶۸۸,۰۰	۰,۹۹
۷	۱۲۱,۴۵	۰,۲۲	۱۶,۷۱	۳۸۰۶,۹۰	۲۶۸۸,۰۰	۰,۹۹
۸	۱۱۱,۵۷	۰,۲۲	۱۶,۷۱	۳۶۸۱,۹۰	۲۶۸۸,۰۰	۰,۹۹
۹	۱۰۱,۹۰	۰,۱۸	۲۴,۵۶	۳۲۷۲,۱۰	۲۸۸۹,۶۰	۰,۷۳
۱۰	۹۲,۴۵	۰,۱۸	۲۳,۷۳	۲۹۹۲,۲۰	۲۸۳۲,۰۰	۰,۷۲
۱۱	۸۳,۳۰	۰,۱۸	۲۲,۹۰	۲۸۳۱,۹۰	۲۷۷۴,۴۰	۰,۷۰
۱۲	۷۴,۳۳	۰,۱۸	۲۲,۰۸	۲۶۳۰,۸۰	۲۷۱۶,۸۰	۰,۶۹
۱۳	۶۵,۹۷	۰,۱۷	۱۹,۲۲	۲۴۹۷,۸۰	۲۷۵۰,۴۰	۰,۶۰
۱۴	۵۸,۰۴	۰,۱۷	۱۷,۰۰	۲۰۶۰,۸۰	۲۶۸۳,۲۰	۰,۵۸
۱۵	۵۱,۵۸	۰,۱۷	۱۵,۹۰	۱۸۲۰,۹۰	۲۶۱۶,۰۰	۰,۵۷
۱۶	۴۵,۰۵	۰,۱۷	۱۵,۳۴	۱۶۹۱,۹۰	۲۶۱۶,۰۰	۰,۵۷

جدول ۲: فرکانس و دوره تناوب سازه در ۹ مود ارتعاش در حالت‌های مورد بررسی

شماره مود	سازه بدون نقص اولیه		سازه با نقص اولیه در کابل ۳۲		سازه با نقص اولیه در کابل ۳۲ و کابل مجاور آن	
	فرکانس (هرتز)	پریود (ثانیه)	فرکانس (هرتز)	پریود (ثانیه)	فرکانس (هرتز)	پریود (ثانیه)
۱	۰.۲۶۰۳	۳.۸۴۱۵	۰.۲۴۱۰	۴.۱۵۰۲	۰.۲۳۰۶	۴.۳۳۵۸
۲	۰.۳۳۴۵	۲.۹۸۹۶	۰.۳۳۵۸	۲.۹۷۸۰	۰.۳۲۱۲	۳.۱۱۳۷
۳	۰.۴۴۲۷	۲.۲۵۸۹	۰.۴۳۷۴	۲.۲۸۶۰	۰.۴۳۷۲	۲.۲۸۷۴
۴	۰.۴۷۱۷	۲.۱۱۹۹	۰.۴۷۳۷	۲.۱۱۰۹	۰.۴۵۲۳	۲.۲۱۰۸
۵	۰.۴۹۸۵	۲.۰۰۵۹	۰.۵۰۱۲	۱.۹۹۵۲	۰.۴۹۵۳	۲.۰۱۹۱
۶	۰.۵۲۳۰	۱.۹۱۲۲	۰.۵۳۱۰	۱.۸۸۳۴	۰.۵۳۰۵	۱.۸۸۴۹
۷	۰.۵۵۱۴	۱.۸۱۳۷	۰.۵۵۶۰	۱.۷۹۸۷	۰.۵۴۷۹	۱.۸۲۵۱
۸	۰.۵۷۴۵	۱.۷۴۰۷	۰.۵۷۷۳	۱.۷۳۲۱	۰.۵۷۷۲	۱.۷۳۲۶
۹	۰.۶۱۴۴	۱.۶۲۷۷	۰.۶۱۴۸	۱.۶۲۶۵	۰.۶۱۴۹	۱.۶۲۶۳

۳- مدلسازی جداساز لرزه ای غلطکی درون قفس

جداساز غلطکی درون قفس در شکل ۴ 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 هیستریزس 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 انحنای داخلی صفحات اتکایی بالا و پایین در طول حرکت، جداسازی را با کمترین نوسان عمودی ایجاد می نماید [۲۰].



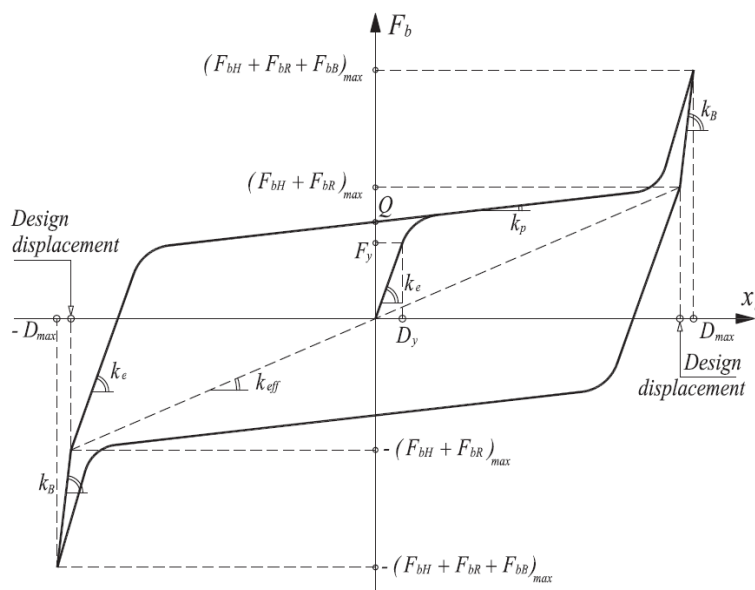
شکل ۴: جداساز لرزه غلطکی درون قفس [۲۰ و ۲۳]

سیستم جداساز غلطکی درون قفس دارای سه مشخصه اساسی است: (۱) مکانیسم خود نگهدار در ارتعاش های شدید که با استفاده از سپر فنری 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). 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 موجب بهبود عملکرد آن شود (۲) مکانیسم خطی مرکزگرای مبتنی بر نیروی محوری جداساز که مانع از ایجاد جابجایی های ماندگار در برابر بارهای دینامیکی می گردد. (۳) مقاومت کششی یا میرایی ناشی از سپر که با توجه به هندسه و نوع مصالح میراگر بکارگرفته شده درون جداساز و

حلقه های دور قفس ایجاد می گردد. در حالت کلی ترکیب سه مشخصه ی جداساز غلطکی درون قفس موجب بهبود عملکرد جداساز و افزایش مقاومت و جذب انرژی آن در مقایسه با دیگر جداساز های معمول می گردد. مدلسازی عددی جداساز لرزه ای غلطکی درون قفس بر اساس همین سه بخش صورت می پذیرد. رابطه ی عددی رفتار جداساز غلطکی درون قفس طبق رابطه ی ۱ بیان می گردد.

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

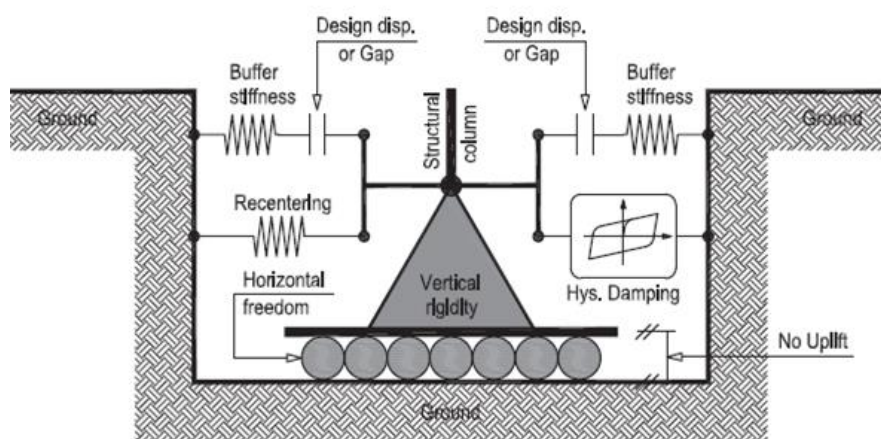
در این رابطه F_b نیروی کلی عکس العمل جداساز غلطکی درون قفس، F_{bH} مولفه ی هیستریزس جداساز، F_{bR} مولفه ی نیروی مرکزگرای غلطک، F_{bB} مولفه ی کششی ذخیره یا خودنگهدار، X_b جابجایی پایه و X_{des} جابجایی حد طراحی جداساز می باشند. نمودار عملکردی هیستریزس نیرو-جابجایی جداساز غلطکی درون قفس در شکل ۵ نمایش داده شده است. مشخصات جداساز در جدول ۳ ارائه شده است. به منظور مدلسازی سه مشخصه ی جداساز به طور هم زمان در نرم افزار اپنسیس از ماده ی موازی^۳ به منظور ترکیب سه مشخصه ی جداساز استفاده شده است. مشخصه ی هیستریزس جداساز غلطکی درون قفس با استفاده از مدل ماده ی هیستریک بوس-ون^۴ مدلسازی شده است. در این مدل پارامتر های بی بعد کنترل شکل منحنی هیستریزس رابطه برابر با $A=1$ و $\beta=\gamma=0.5$ در نظر گرفته شده است. مکانیسم خطی مرکزگرای مبتنی بر نیروی محوری جداساز براساس ماده ی الاستیک ساده با سختی ثابت K_R مدلسازی می گردد. همچنین مقاومت کششی سپر یا ذخیره ی خودنگهدار که با توجه به هندسه و نوع مصالح میراگر ایجاد می گردد با استفاده از ماده ی کششی دارای درز کرنش یا جابجایی با سختی K_B و درز جابجایی X_{des} مدلسازی می گردد. در ادامه در شکل ۶ تصویر شماتیک ترکیب موازی سه ماده ی بکارگرفته شده به منظور مدلسازی مشخصه های جداساز به نمایش در آمده است.



شکل ۵: منحنی هیستریزس جداساز لرزه ای غلطکی درون قفس بر اساس سه مشخصه عملکردی [۲۰ و ۲۳]

³ Parallel uniaxial material

⁴ Bouc-Wen hysteretic material



شکل ۶: تصویر شماتیک ترکیب موازی سه ماده ی بکارگرفته شده به منظور مدلسازی مشخصه های جداساز [۲۰ و ۲۳]

جدول ۳: پارامتر های جداساز لرزه ای غلطکی درون قفس [۲۰ و ۲۳]

پارامتر های مدلسازی جداساز RNC	(kN, mm, s)
سختی ذخیره یا بافر، kB	۴,۹۰۳۳
جابجایی طراحی، Gap	۳۰۰
سختی مکانیسم مرکز گرا، kR	۸,۵۸۰۸
صلبیت قائم	نامحدود
سختی هیترزیس، k	۳,۴۳۲۳
نیروی نظیر تسلیم مکانیسم هیترزیس	۴۹,۰۳۳۳
نسبت سختی تسلیم مکانیسم هیترزیس	۰,۰۵

۴- احتمال خرابی و قابلیت اطمینان

مونت کارلو روشی است که به منظور تقریب زدن امید ریاضی با استفاده از توزیع نمونه‌ای از متغیرهای تصادفی شبیه سازی شده، مورد استفاده قرار می‌گیرد. این روش تقریباً در تمامی رشته‌های مهندسی برای ارزیابی میزان احتمال خرابی انواع فرآیندها و سازه‌ها کاربرد دارد. روش شبیه‌سازی مونت کارلو بر پایه تولید یکسری نمونه‌های تصادفی برای هر متغیر بر اساس تابع چگالی احتمال آن و قرار دادن نمونه‌های هر متغیر در کنار هم استوار است. احتمال خرابی یک سیستم با استفاده از این روش، با تقسیم تعداد نقاطی که در ناحیه خرابی قرار می‌گیرند بر تعداد تمامی نمونه‌های شبیه‌سازی شده، به دست می‌آید. علاوه بر این شاخص‌های قابلیت اطمینان بر مبنای احتمال خرابی مونت کارلو به وسیله‌ی تابع توزیع تجمعی استاندارد نرمال مطابق رابطه‌ی ۲ بدست می‌آید. در این رابطه ϕ برابر تابع توزیع تجمعی استاندارد نرمال است [۲۶].

$$\beta = -\phi^{-1}(\text{Probability of Failure})$$

(۲)

در ادامه به منظور ارزیابی لرزه ای پل کابلی، رکوردهای مصنوعی بر اساس مدل کانای-تاجیمی ساخته و تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی تحت رکوردهای مذکور انجام شده است. براساس مطالعات کانای با توجه به محتوای فرکانسی رکوردهای مختلف، تابع چگالی طیفی زمین لرزه با فرکانس غالب مشخص مطابق رابطه ۳ تعریف می شود [۲۷].

$$S(\omega) = \frac{[1 + 4\xi_g^2(\omega/\omega_g)^2]}{[1 - (\omega/\omega_g)^2]^2 + 4\xi_g^2(\omega/\omega_g)^2} S_0 \quad (۳)$$

در این رابطه ω_g فرکانس غالب، S_0 شدت ثابت لرزه سنگ بستر می باشد. این مقادیر نیازمند تخمین براساس رکورد لرزه ای ثابت شده در سایتی مشخص می باشد. به منظور حذف این وابستگی به لرزه ثبت شده اولیه، مدل اصلاح شده مستقل از ساختگاه پیشنهاد شده است. این مدل مطابق روابط زیر بدست می آید [۲۸].

$$\ddot{X}_f + 2\xi_g(t)\omega_g(t)\dot{X}_f + \omega_g^2(t)X_f = n(t) \quad (۴)$$

$$\ddot{X}_g = -(2\xi_g(t)\omega_g(t)\dot{X}_f + \omega_g^2(t)X_f)e(t) \quad (۵)$$

در این روابط X_f پاسخ فیلتر شده، $\omega_g(t)$ فرکانس وابسته به زمان زمین لرزه، $\xi_g(t)$ ضریب میرایی موثر زمین، \ddot{X}_g شتاب خروجی زمین لرزه، $e(t)$ تابع دامنه و $n(t)$ نویز گاوسی است. در ادامه مدل اصلاح شده مطابق روابط زیر بیان می گردد. در این روابط σ انحراف از معیار لرزه می باشد

$$S_{xx}^{KT}(\omega) = \frac{\omega_g^4 + (2\xi_g\omega_g\omega)^2}{(\omega_g^2 - \omega^2)^2 + (2\xi_g\omega_g\omega)^2} S_0 \quad (۶)$$

$$S_0 = \sigma_g^2 \frac{2\xi_g}{\pi\omega_g(4\xi_g^2 + 1)} \quad (۷)$$

تابع دامنه زمانی طبق رابطه ۸ محاسبه می گردد.

$$E(t) = a \left(\frac{t}{t_n}\right)^b \exp\left(\frac{-c \cdot t}{t_n}\right) \quad (۸)$$

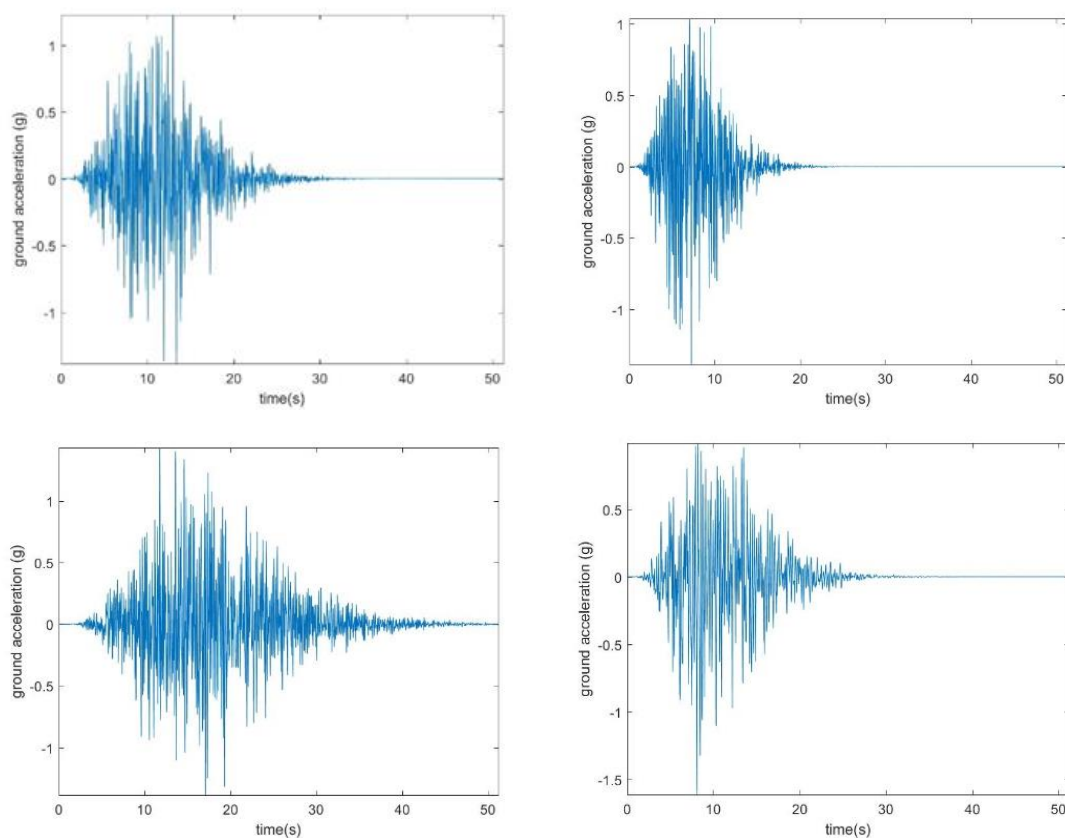
$$b = -\frac{\varepsilon_t \cdot \ln\mu}{1 + \varepsilon_t \cdot (\ln\mu - 1)} \quad (۹)$$

$$c = -\frac{b}{\varepsilon_t} \quad (۱۰)$$

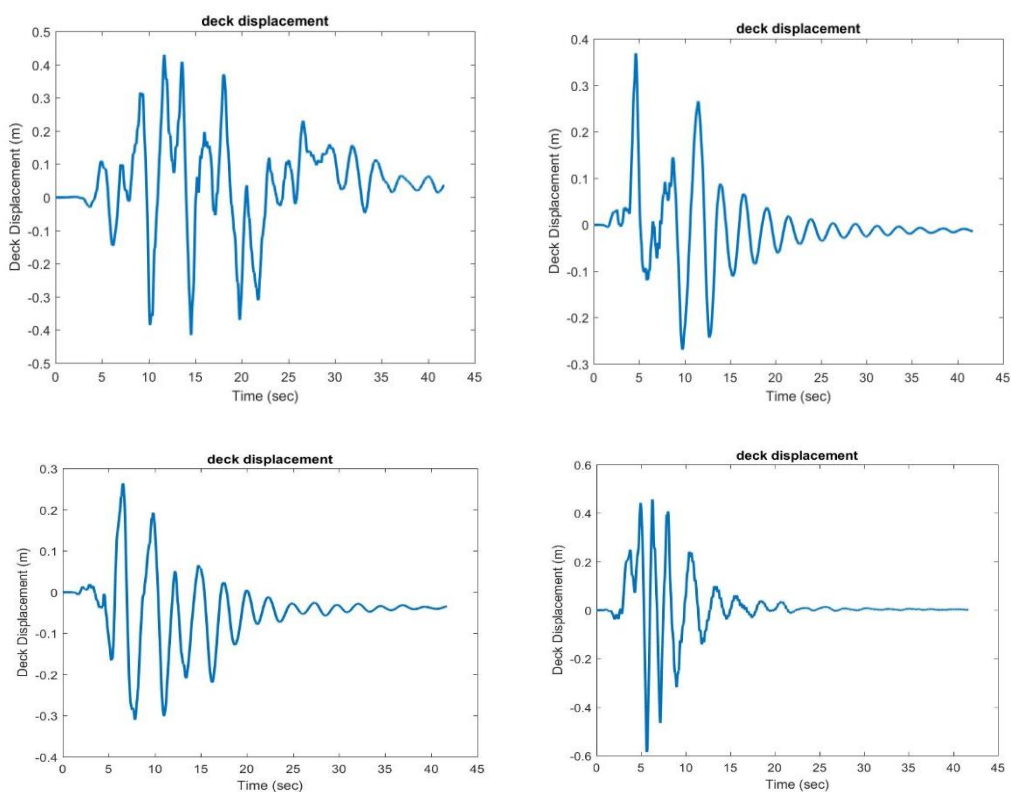
$$a = \left(\frac{e}{\varepsilon_t}\right)^2 \quad (۱۱)$$

در این روابط t_n مدت زمان اصلی زمین لرزه، ε_t نسبت زمانی است که رکورد به بیشینه شتاب می رسد، μ مقدار در ۹۰ درصد دوره زمانی است. در ادامه با در نظر گرفتن $\sigma = 0.9$ ، $\xi_g = 0.3$ ، $\varepsilon_t = 0.4$ ، $\mu = 0.05$ و همچنین توزیع نرمال برای فرکانس غالب و مدت زمان زلزله اصلی داده های تصادفی به منظور تولید رکوردهای لرزه ای بدست آمده است. در ادامه برخی از رکوردهای تولید شده در شکل ۷ نمایش داده شده است.

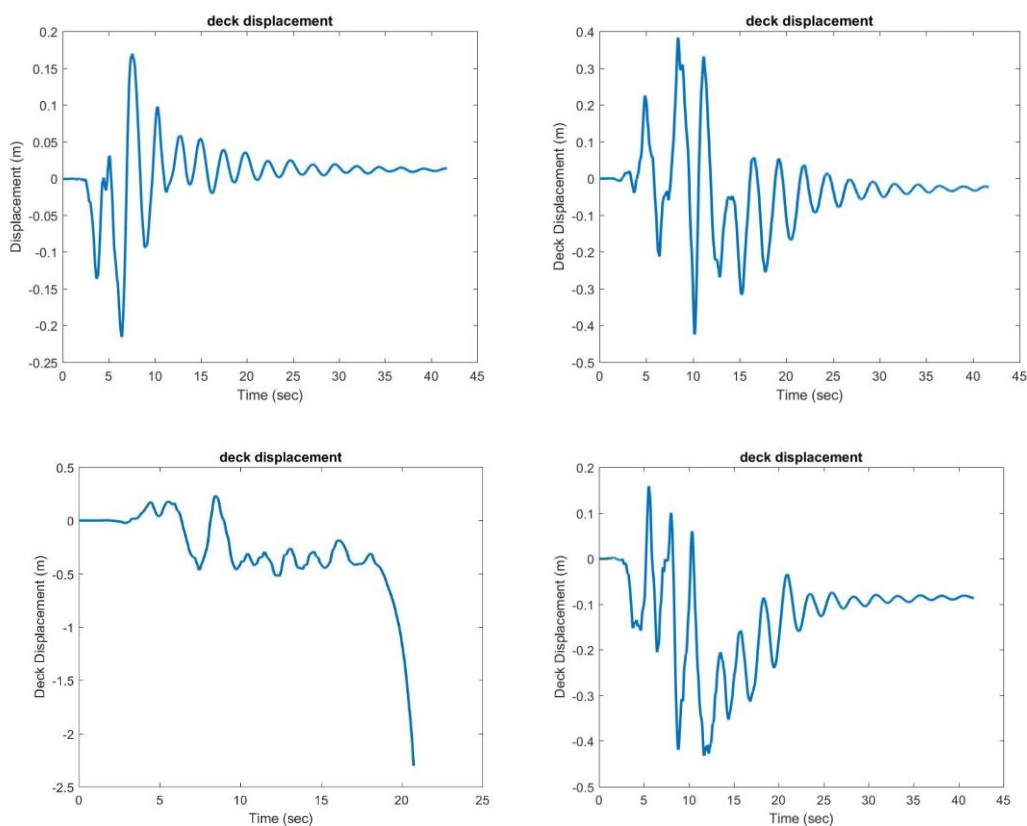
مراحل تولید رکورد لرزه برای ۲۰۰۰ بار تکرار شده و هر بار تحت لرزه بدست آمده تحلیل تاریخیچه زمانی پل کابلی بیل امرسون صورت پذیرفته است. با توجه به اطلاعات ساختگاه، خاک نوع II با سرعت موج برشی بین ۳۷۵ تا ۷۵۰ متر بر ثانیه با میانگین فرکانس ۵ هرتز به منظور تولید داده‌های تصادفی لرزه مورد استفاده قرار گرفته است. همچنین پس از تولید رکوردهای مصنوعی، تمامی آنها بر طیف خاک نوع II مقیاس شده اند. در نهایت احتمال خرابی و قابلیت اطمینان پل کابلی بیل امرسون در حالت های پل کابلی جداسازی شده بدون نقص اولیه، جداسازی شده با نقص اولیه در کابل شماره ۳۲ در میانه دهانه وسط و پل کابلی جداسازی شده با نقص اولیه در کابل شماره ۳۲ و کابل مجاور آن محاسبه شده است. نمونه هایی از نمودارهای جابجایی عرشه با داده تصادفی به ترتیب برای مدل بدون نقص اولیه، مدل با نقص اولیه در کابل شماره ۳۲ و مدل با نقص اولیه در کابل مجاور آن در شکل های ۸ الی ۱۰ نمایش داده شده است. همانطور که در این شکل ها مشاهده می گردد، مدل بدون نقص اولیه دارای ارتعاش مناسب تحت رکوردهای لرزه ای است و خرابی در پل بصورت بروز تغییر شکل های ماندگار در انتهای ارتعاش ایجاد می گردد. با اعمال نقص اولیه در کابل ۳۲ مدل تحت برخی رکوردها شاهد افزایش جابجایی عرشه بیشتر از جابجایی طرح (۰/۵ متر) می باشد و با معیار قرار دادن این پارامتر می توان بیان داشت که سازه خرابی را تجربه می کند. از طرفی با اعمال نقص اولیه در کابل ۳۲ و علاوه بر آن در کابل مجاور موجب می گردد تعداد مدل های دارای خرابی بیشتر شده و در نتیجه احتمال خرابی که با تعداد مدل های دارای توسعه خرابی نسبت مستقیم دارد افزایش یابد.



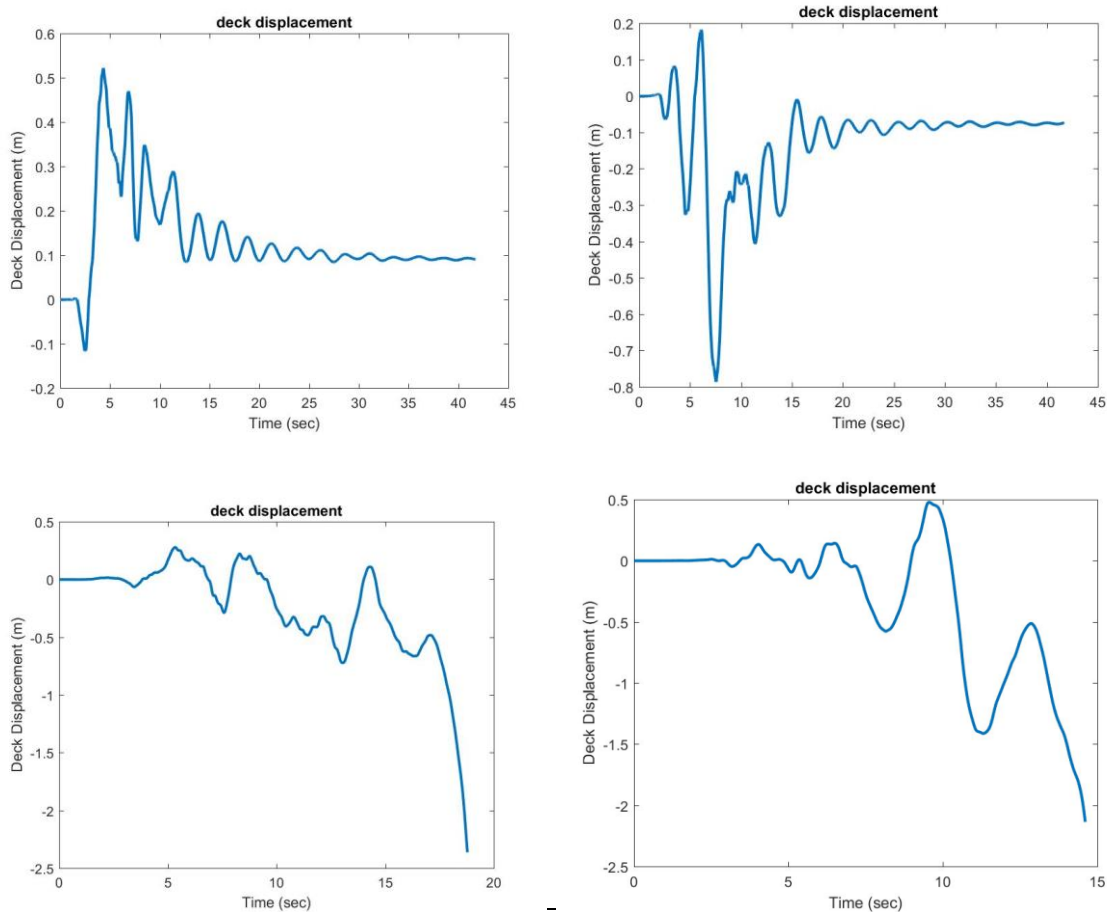
شکل ۷: شتاب نگاشت های مصنوعی تولید شده با داده های تصادفی



شکل ۸: جایجایی عرشه پل کابلی جداسازی شده بدون نقص اولیه تحت رکوردهای مصنوعی



شکل ۹: جایجایی عرشه پل کابلی جداسازی شده با نقص اولیه در کابل ۳۲ تحت رکوردهای مصنوعی



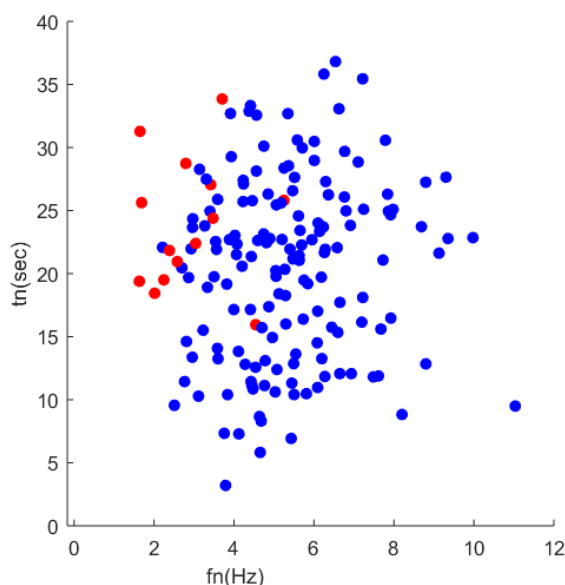
شکل ۱۰: جابجایی عرشه پل کابلی جداسازی شده با نقص اولیه در کابل ۳۲ و کابل مجاور آن تحت رکوردهای مصنوعی

احتمال خرابی پل کابلی بیل امرسون تحت رکوردهای لرزه ای مصنوعی تولید شده بر اساس داده‌های تصادفی در حالت های پل کابلی بدون نقص اولیه، پل کابلی با وجود نقص اولیه در کابل میانه در دهانه وسط (کابل ۳۲) و همچنین پل کابلی با وجود نقص اولیه در کابل ۳۲ و کابل مجاور آن بررسی شد. احتمال خرابی پل کابلی جداسازی شده با استفاده از روش مونت کارلو به وسیله تعداد مختلف نمونه های تولید شده محاسبه شد و براساس تابع توزیع تجمعی استاندارد نرمال، شاخص قابلیت اطمینان تحت هر حالت محاسبه شد که در جدول ۴ ارائه شده است.

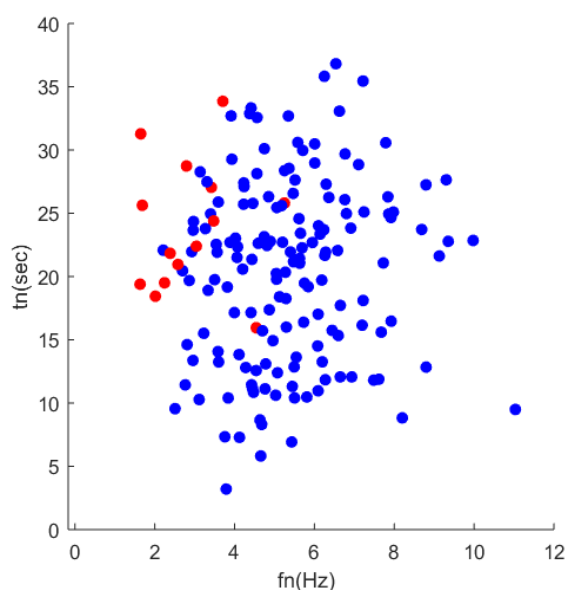
جدول ۴: احتمال خرابی و شاخص قابلیت اطمینان برای حالات مختلف با استفاده از روش مونت کارلو و براساس داده های تصادفی تولید شتابنگاشت های مصنوعی

مدل	Pf	β
پل کابلی جداسازی شده بدون نقص اولیه	0.0099	2.3263
پل کابلی جداسازی شده با نقص اولیه در کابل ۳۲	0.0281	1.9110
پل کابلی جداسازی شده با نقص اولیه در کابل ۳۲ و کابل مجاور آن	0.0878	1.3532

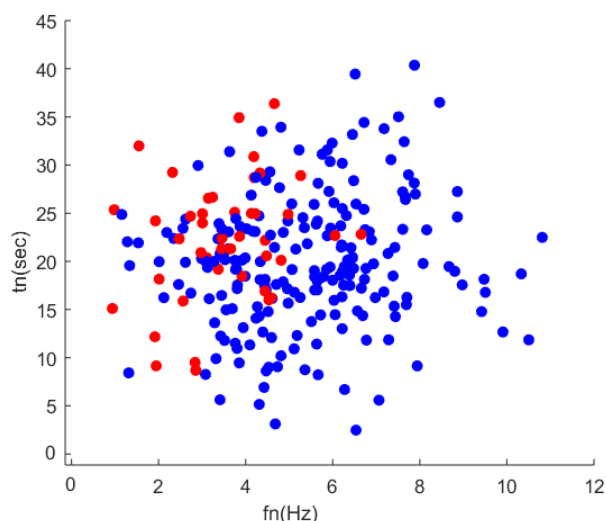
با توجه به جدول ۳ احتمال خرابی پل کابلی مورد بررسی در حالت جداسازی شده بدون نقص اولیه حدود ۱ درصد می باشد که دارای شاخص قابلیت اطمینان مناسب ۲/۳۲۶۳ است. این بدان معناست که پل کابلی مدلسازی شده در شرایط جداسازی با جداساز غلطکی درون قفس و بدون نقص اولیه در برابر وقایع لرزه ای مورد انتظار عملکرد مناسبی نشان خواهد داد. این در حالیست که حتی در شرایط بروز نقص اولیه در یک کابل (کابل شماره ۳۲ در دهانه وسط) احتمال خرابی ۲/۸۱ درصد و شاخص قابلیت اطمینان سازه ۱/۹۱۱ و قابل توجه می باشد. اما در نهایت در شرایطی که نقص اولیه به کابل مجاور برسد احتمال خرابی حدود ۸/۸ درصد بوده و شاخص قابلیت اطمینان سازه به ۱/۳۵۳۲ کاهش خواهد یافت. لذا می بایست به منظور کسب اطمینان از عملکرد مناسب سازه در برابر لرزه های مورد انتظار از بروز نقص در کابل ها و در ادامه و مهم تر از آن از سرایت نقص به کابل مجاور جلوگیری به عمل آورد. در ادامه و در شکل های ۱۱ الی ۱۳ نمودارهای شبیه سازی شده به روش مونت کارلو برای شرایط مختلف پل کابلی مورد بررسی نمایش داده شده است. در این نمودارها نقاط آبی بیانگر نواحی سلامت سازه و نقاط قرمز نمایانگر نواحی توسعه نقص و خرابی سازه در مدلسازی دینامیکی تحت رکوردهای لرزه ای تولید شده می باشند. در این نمودارها محور افقی فرکانس غالب رکورد تولید شده و محور قائم مدت زمان معنی دار رکورد را نشان می دهند. همانطور که مشاهده می گردد غالب نمونه های خراب شده در مدل بدون نقص اولیه در بازه فرکانس غالب ۱ تا ۳ هرتز و مدت زمان ۱۵ تا ۲۵ ثانیه رخ داده اند، این در حالیست که غالب نمونه های خراب شده در مدل با نقص های اولیه در بازه فرکانس غالب ۲ تا ۶ هرتز و مدت زمان های ۱۵ تا ۳۰ ثانیه رخ داده اند.



شکل ۱۱: نتایج شبیه سازی مونت کارلو برای پل کابلی جداسازی شده بدون نقص اولیه تحت رکوردهای مصنوعی



شکل ۱۲: نتایج شبیه سازی مونت کارلو برای پل کابلی جداسازی شده با نقص اولیه در کابل ۳۲ تحت رکوردهای مصنوعی



شکل ۱۳: نتایج شبیه سازی مونت کارلو برای پل کابلی جداسازی شده با نقص اولیه در کابل ۳۲ و کابل مجاور آن تحت رکوردهای مصنوعی

۵- بحث و نتیجه گیری

در این مطالعه عملکرد جداساز لرزه ای غلطکی درون قفس در برابر خرابی پیشرونده در پل های کابلی در برابر زلزله بررسی شد. به همین منظور پل کابلی بیل امرسون با سه دهانه و به طول ۶۵۰ متر انتخاب و جداساز های لرزه ای غلطکی درون قفس مناسب برای آن در زیر عرشه در دو انتهای آن و در محل اتصال به پایه ها تعبیه شدند. به منظور ارزیابی احتمال خرابی و قابلیت اطمینان پل کابلی در برابر بروز نقص اولیه و تحت رکوردهای لرزه ای، تحلیل مونت کارلو مورد استفاده قرار گرفت. بدین منظور رکوردهای مصنوعی برای توزیع مناسبی از داده های تصادفی محتوای فرکانسی و مدت زمان لرزه، بر اساس مدل تابع چگالی طیفی زمین لرزه با فرکانس غالب کانای-تاجیمی تولید شد. تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی تحت رکوردهای مذکور برای ۲۰۰۰ نمونه تصادفی و مطابق با روش مونت کارلو در قالب مدلسازی در نرم افزار متلب و تحلیل در نرم افزار اپنسیس انجام شد. نتایج نشان می‌دهد:

- ✓ در مدل بدون نقص اولیه دارای ارتعاش مناسب تحت رکوردهای لرزه‌ای است و خرابی در پل بصورت بروز تغییر شکل های ماندگار در انتهای ارتعاش ایجاد می گردد. که بیانگر عملکرد مناسب جداساز غلطکی درون قفس تحت بارهای پیش بینی شده می باشد. احتمال خرابی پل کابلی مورد بررسی در حالت جداسازی شده بدون نقص اولیه حدود ۱ درصد می باشد که دارای شاخص قابلیت اطمینان مناسب ۲/۳۲۶۳ است.
- ✓ با اعمال نقص اولیه در کابل میانی دهانه وسط مدل تحت برخی رکوردها توسعه نقص و خرابی را تجربه می کند. در این شرایط احتمال خرابی ۲/۸۱ درصد و شاخص قابلیت اطمینان سازه ۱/۹۱۱ و قابل توجه می باشد.
- ✓ در شرایطی که دو کابل مجاور در دهانه وسط دچار نقص باشند، تعداد مدل های دارای خرابی در تحلیل مونت کارلو بیشتر شده و در نتیجه احتمال خرابی افزایش یابد. در این شرایط احتمال خرابی حدود ۸/۸ درصد بوده و شاخص قابلیت اطمینان سازه به ۱/۳۵۳۲ کاهش خواهد یافت.
- ✓ به منظور کسب اطمینان از عملکرد مناسب پل کابلی جداسازی شده در برابر لرزه های مورد انتظار از بروز نقص در کابل ها و در ادامه و مهم تر از آن از سرایت نقص به کابل مجاور جلوگیری به عمل آورد.
- ✓ در اکثر نمونه های خراب شده در مدل پل کابلی جداسازی شده بدون نقص اولیه در سازه، فرکانس غالب خرابی بین بازه ۱ تا ۳ هرتز و مدت زمان معنی دار در بازه ۱۵ تا ۲۵ ثانیه هستند.
- ✓ در اکثر نمونه های خراب شده در مدل پل کابلی جداسازی شده با نقص های اولیه در کابل های متصل کننده، فرکانس غالب خرابی بین بازه ۲ تا ۶ هرتز و مدت زمان معنی دار در بازه ۱۵ تا ۳۰ ثانیه می باشد.

مراجع

- [1] Wibowo, H., and D. T. Lau. (2009). Seismic progressive collapse: qualitative point of view. Civil Engineering Dimension 11, no. 1.
- [2] GSA. (2003). Progressive collapse analysis and design guidelines for new federal office Buildings and major modernization projects. The U.S. General Services Administration.
- [3] Ismail, M., Rodellar, J., & Ikhouane, F. (2012). Seismic protection of low-to moderate-mass buildings using RNC isolator. Structural Control and Health Monitoring, 19(1), 22-42.
- [4] Cai, J. G., Xu, Y. X., Zhuang, L. P., Feng, J., & Zhang, J. (2012). Comparison of various procedures for progressive collapse analysis of cable-stayed bridges. Journal of Zhejiang University SCIENCE A, 13(5), 323-334
- [5] Han, S. H., Lee, W. S., & Bang, M. S. (2011). 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), 335.
- [6] Li, H., Li, S., Ou, J., & Li, H. (2014). Reliability assessment of cable-stayed bridges based on structural health monitoring techniques. Structure and Infrastructure Engineering, 8(9), 829-845.
- [7] Ding, Y., Li, A., Du, D., & Liu, T. (2010). Multi-scale damage analysis for a steel box girder of a long-span cable-stayed bridge. Structure and Infrastructure Engineering, 6(6), 725-739
- [8] Shrestha, B. (2015). Seismic response of long span cable-stayed bridge to near-fault vertical ground motions. KSCE Journal of Civil Engineering, 19(1), 180-187.
- [9] Das, R., Pandey, A. D., Mahesh, M. J., Saini, P., & Anvesh, S. (2016). Progressive Collapse of a Cable Stayed Bridge. Procedia Engineering, 144, 132-139.
- [10] Zhang, Y., Fang, Z., Jiang, R., Xiang, Y., Long, H., & Lu, J. (2020). Static performance of a long-span concrete cable-stayed bridge subjected to multiple-cable loss during construction. Journal of Bridge Engineering, 25(3), 04020002.
- [11] Shao, G., Jin, H., Jiang, R., & Xu, Y. (2021). Dynamic Response and Robustness Evaluation of Cable-Supported Arch Bridges Subjected to Cable Breaking. Shock and Vibration, V 2021, P 6689630.
- [12] Dyke, S. J., Caicedo, J. M., Turan, G., Bergman, L. A., & Hague, S. (2003). Phase I benchmark control problem for seismic response of cable-stayed bridges. Journal of Structural Engineering, 129(7), 857-872.
- [13] Boroumand, P. and M. Tehranzadeh, (2012), "Response Sensitivity of Base-Isolated Steel Buildings to Near-Fault Ground Motions". In The 15th World Conference on Earthquake Engineering, LISBOA.

- [14] Rezvani FH, Yousefi AM, Ronagh HR. Effect of span length on progressive collapse behaviour of steel moment resisting frames. In Structures 2015 Mar 25. Elsevier.
- [15] Talebinejad, I., Fischer, C., & Ansari, F. (2011). Numerical Evaluation of Vibration-Based Methods for Damage Assessment of Cable-Stayed Bridges. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 26(3), 239-251.
- [16] Li, H., Liu, J., & Ou, J. (2011). Seismic response control of a cable-stayed bridge using negative stiffness dampers. *Structural Control and Health Monitoring*, 18(3), 265-288
- [17] Pipinato, A., Pellegrino, C., Fregno, G., & Modena, C. (2012). Influence of fatigue on cable arrangement in cable-stayed bridges. *International Journal of Steel Structures*, 12(1), 107-123
- [18] Tavakoli, H. R., Naghavi, F., & Goltabar, A. R. (2015). Effect of base isolation systems on increasing the resistance of structures subjected to progressive collapse. *Earthquakes and Structures*, 9(3), 639-656.
- [19] Wei, B., Wang, P., Yang, M., & Jiang, L. (2016). Seismic Response of Rolling Isolation Systems with Concave Friction Distribution. *Journal of Earthquake Engineering*, 1-18.
- [20] Al-Anany, Y. M., & Tait, M. J. (2017). Fiber reinforced elastomeric isolators for the seismic isolation of bridges. *Composite Structures*, 160, 300-311.
- [21] Esmaeilnia Omran, M., & Hoseini Karani, A. (2021). Performance Assessment of the Roll-N-Cage (RNC) Isolators impacts on Progressive Collapse Behavior in Cable-Stayed Bridges. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 53(2), 639-658.
- [22] Ismail, M., Rodellar, J., Carusone, G., Domaneschi, M., & Martinelli, L. (2013). Characterization, modeling and assessment of Roll-N-Cage isolator using the cable-stayed bridge benchmark. *Acta Mechanica*, 224(3), 525-547
- [23] Ismail, M., Casas, J. R., & Rodellar, J. (2013). Near-fault isolation of cable-stayed bridges using RNC isolator. *Engineering structures*, 56, 327-342.
- [24] Ismail, M. (2015). "Inner pounding control of the RNC isolator and its impact on seismic isolation efficiency under near-fault earthquakes". *Engineering Structures*, 86, 99-121.
- [25] G. Chen, D. Yan, W. Wang, M. Zheng, L. Ge, and F. Liu (2007). Assessment of the Bill Emerson Memorial Cable-stayed Bridge Based on Seismic Instrumentation Data. University of Missouri-Rolla and Missouri Department of Transportation, Organizational Results Research Report. Report No. OR08-003.
- [26] Thoft-Cristensen, P. and M.J. Baker, *Structural reliability theory and its applications*. 2012: Springer Science & Business Media.
- [27] Rofooei, F., A. Mobarake, and G. Ahmadi, Generation of artificial earthquake records with a nonstationary Kanai-Tajimi model. *Engineering Structures*, 2001. 23(7): p. 827-837.
- [28] Guo, Y. and A. Kareem, System identification through nonstationary data using time-frequency blind source separation. *Journal of Sound and Vibration*, 2016. 371: p. 110-131.