

Development of the seismic fragility curve of the bridge Pier after Vehicle Collision

Ammar Kor¹, HamidReza Tavakoli^{2*}, Sepideh Rahimi¹ and Mohammad HoseinZadeh¹

1- ¹Department of Civil Engineering, Nour Branch Islamic Azad University, Nour, Iran

2- Associate Professor, Department of Civil Engineering. Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

ABSTRACT

The possibility of an accident or collision with bridges on a daily basis is not far from expected, and in many cases, it was observed that after the collision with the foundations of the bridge, the necessary investigations were carried out to evaluate and improve the seismicity of such bridges. It cannot and may collapse suddenly under the influence of an earthquake with a certain intensity. In this research, an overpass sample has been implemented, investigated and evaluated. First, a truck at variable speeds of 80, 100, and 120 km/h along with a selected bridge sample to extract force-time diagram in LS-DYNA simulation software, and then the bridge under study in OPENSEES modeling software and force-time diagram along with 19 earthquake records were applied to it. After the incremental dynamic analysis (IDA) in a non-linear way, the fragility curves resulting from the analysis were drawn and the probability of passing through different limit states was calculated. It was found that the effect of the impact causes permanent deformations in the foundations of the bridge, and this increases the process of destruction of the foundations after applying the acceleration of the earthquake at a speed of 80 km, but at speeds of 100 and 120 km, the increasing trend has had a significant difference compared to the non-impact state and it can be said that speed change plays a significant role in increasing failure. The results show that the probability of passing 50% of the full surface in non-collision modes, collisions with speeds of 80, 100 and 120 have occurred at maximum accelerations of 1.6, 1.5, 1.2 and 1 times the acceleration of gravity

ARTICLE INFO

Receive Date: 12 November 2024

Revise Date: 04 December 2024

Accept Date: 07 December 2024

Keywords:

Collision, earthquake accelerometer, IDA analysis, fragility curve, vulnerability, bridge

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: [10.22065/jsce.2024.488094.3569](https://doi.org/10.22065/jsce.2024.488094.3569)

*Corresponding author:

Email address: Tavakoli@nit.ac.ir

گسترش منحنی شکنندگی لرزه‌ای ستون پل پس از آسیب ناشی از برخورد وسیله نقلیه

عمار گُر^۱، حمیدرضا توکلی^{۲*}، سپیده رحیمی^۳، محمد حسین زاده^۴

۱- دانشجوی دکتری سازه، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نور، نور، ایران

۲- استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران

۳- دانشیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نور، نور، ایران

۴- استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نور، نور، ایران

چکیده

احتمال وجود یک سانحه یا برخورد به طور روزمره با پل‌ها دور از انتظار نیست، همچنین در موارد بسیاری مشاهده گردید پس از سانحه برخورد با پایه‌های پل، بررسی‌های لازم جهت ارزیابی و بهسازی لرزه‌ای این‌گونه پل‌ها انجام نمی‌شود و ممکن است تحت تاثیر یک زلزله با شدت مشخص دچار فروریزش ناگهانی شود. در این پژوهش سعی شده یک نمونه پل روگذر اجرا شده، مورد بررسی و ارزیابی قرار گیرد. در ابتدا یک کامیون در سرعت‌های متغیر ۸۰، ۱۰۰ و ۱۲۰ کیلومتر بر ساعت به همراه نمونه پل انتخابی جهت استخراج نمودار نیرو-زمان در نرم افزار LS-DYNA شبیه‌سازی و سپس پل مورد مطالعه در نرم افزار OpenSees مدل‌سازی و نمودار نیرو-زمان همراه با ۱۹ رکورد زلزله به آن اعمال گردید. پس از تحلیل دینامیکی افزاینده (IDA) بصورت غیر خطی، منحنی‌های شکنندگی حاصل از تحلیل، ترسیم و احتمال فراگذشت از حالت‌های حدی مختلف محاسبه شد. مشخص شد اثر ضربه باعث ایجاد تغییر شکل‌های ماندگار در پایه‌های پل می‌شود و این امر روند تخریب پایه‌ها، پس از اعمال شتاب زلزله را در سرعت ۸۰ کیلومتر افزایش داده ولی در سرعت‌های ۱۰۰ و ۱۲۰ کیلومتر روند افزایشی قابل توجه‌ای نسبت به حالت بدون ضربه داشته است و می‌توان گفت تغییر سرعت در افزایش خرابی، نقش بسزایی دارد. نتایج نشان می‌دهد احتمال فراگذشت ۵۰٪ از سطح کامل در حالت‌های بدون برخورد، برخورد با سرعت‌های ۸۰، ۱۰۰ و ۱۲۰ در بیشینه شتاب‌های ۱.۶، ۱.۵، ۱.۲ و ۱ برابر شتاب ثقل رخ داده است که بیانگر کاهش توان سازه در برابر شدت اعمالی زلزله پس از برخورد با سرعت‌های بیشتر است.

کلمات کلیدی: برخورد، شتابنگاشت زلزله، تحلیل IDA، منحنی شکنندگی، آسیب پذیری، پل

شناسه دیجیتال:	سابقه مقاله:				
	دریافت	بازنگری	پذیرش	انتشار آنلاین	چاپ
doi: https://doi.org/10.22065/jsce.2024.488094.3569	۱۴۰۳/۰۸/۲۲	۱۴۰۳/۰۹/۱۴	۱۴۰۳/۰۹/۱۷	۱۴۰۳/۰۹/۱۷	۱۴۰۴/۰۱/۳۱
	*نویسنده مسئول:		حمیدرضا توکلی		
	پست الکترونیکی:		Tavakoli@nit.ac.ir		

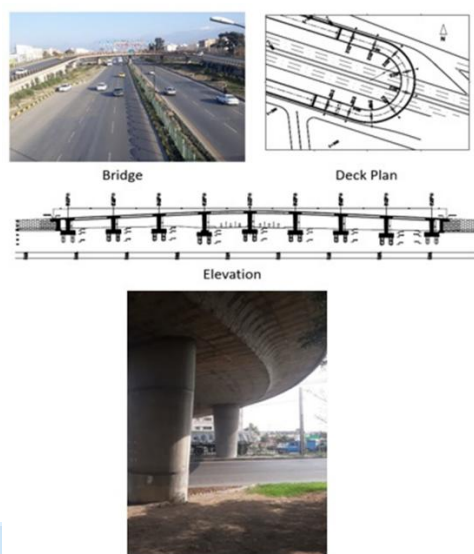
۱- مقدمه

در دهه‌های اخیر، تعدادی از تصادفات برخورد وسیله نقلیه با سازه‌های پل در رسانه‌ها بیان شده است برخوردهای حاصل از وسایل نقلیه با سرعت بالا ممکن است باعث خرابی زیر ساخت‌ها، هزینه اضافی زندگی بشر و فلج شدن سیستم‌های حمل و نقل در مناطق شهری شود. بنابراین، درک و در نظر گرفتن پاسخ ستون‌های بتن مسلح پایه‌های بتن مسلح پل تحت برخورد خودرو در طراحی بسیار مهم است. برخورد وسایل نقلیه با پایه‌های بتن مسلح پل به عنوان یک واقعه بارگذاری شدید تلقی می‌شود که علی‌رغم نادر بودن، ممکن است منجر به عواقب مخرب شود، بر این اساس، ممکن است خرابی کامل یا جزئی پل رخ دهد. در طی چند دهه گذشته، سهم زیادی برای ارزیابی رفتار لرزه‌ای و آسیب پذیری پل‌ها در شرایط تأثیر وسایل نقلیه ارائه شده است. همچنین تحریکاتی که باعث آن زلزله است ممکن است به میزان قابل توجهی حتی در فاصله کم مکانی، به اندازه طول برخی سازه‌ها در شبکه حمل و نقل، دچار تغییراتی شوند [۱]. با هدف اطمینان از ایمنی پایه‌های پل در برابر زلزله، پایه‌های پل موجود به گونه‌ای مشخص شده است که مطابق با سطح خطر لرزه‌ای داده شده با رعایت مقررات لرزه‌ای طراحی شوند. همچنین به جز برای تحمل بارهای لرزه‌ای، پایه‌های پل نیز احتمالاً در طول چرخه عمر خود تحت بارهای ضربه‌ای خودرو قرار می‌گیرند. لی و همکارانش به بررسی اثر برخورد خودرو به ستون پل پرداختند و بوث و همکارانش و چن و شیائو بیش از بیست حادثه تصادف خودرو در پایه‌های پل بتنی مسلح گزارش کرده‌اند [۲ و ۳]. بخش زیادی از تحقیقات انجام شده در مورد برخورد و مرتبط با رفتار سازه است و بخش کمی از این پژوهش‌ها به بررسی تأثیر اثرات زلزله بر سازه با برخورد خودرو است. بنابراین، مطالعه همبستگی بین ظرفیت لرزه‌ای و مقاومت ضربه‌ای، همچنین رویکرد ارزیابی آسیب مربوطه از جنبه‌های مختلف بسیار مهم است [۴]. نکته‌ی دیگری که قابل بیان است این است که استانداردها به صورت مجزا تحقیقاتی را در زمینه‌ی طراحی سازه در این دو اثر انجام داده‌اند ولی اثرات توأم این دو پدیده می‌تواند رفتاری غیر مشابه از آنچه در آیین نامه‌ها وجود دارد را به نمایش بگذارد [۵]. اگرچه شبیه سازی‌های دقیق مدل المان محدود با ارائه پیش‌بینی‌های دقیق از پاسخ ستون‌ها ثابت شده، اما می‌توان با بررسی بیشتر اثر برخورد خودرو و رویکرد لرزه‌ای در این شبیه‌سازی‌ها تخمین دقیق‌تری از وضعیت سازه‌های موجود بدست آورد [۶]. تمرکز اصلی در این پژوهش بر روی معیارهایی مانند منحنی شکنندگی برای توصیف عملکرد و آسیب‌پذیری پل‌های بزرگراه تحت برخورد خودرو و اثرات زلزله‌های احتمالی در حوزه نزدیک گسل می‌باشد. بعد از زلزله کالیفرنیا (۱۹۶۶) و زلزله سانفرناندو بود که کلمه‌ی نزدیک گسل توسط بولت بیان گردید اما حساسیت این موضوع در طراحی سازه‌ها به خوبی درک و بیان نشده بود تا اینکه زلزله‌هایی به وقوع پیوست که سازه‌های نزدیک گسل کامل خراب شده بود [۷]. نیلسون و دزروچز و پاجت و رامانتان، منحنی‌های شکنندگی را برای پل‌های مقاوم‌سازی شده در مرکز و جنوب شرقی ایالات متحده توسعه دادند [۸-۱۱]. در این پژوهش در ابتدا پل بتنی در نرم افزار LS-DYNA مدل‌سازی و خودرو به سازه اصابت کرده و نیروی برخورد استخراج می‌گردد، سپس شتاب‌نگاشت‌های زلزله بر اساس نگاشت‌های زمین لرزه به کمک نرم افزار OpenSees به پل اعمال گردیدند. پاسخ لرزه‌ای پایه پل، تحت تحریک ۱۹ رکورد زلزله و با استفاده از تحلیل دینامیکی فزاینده (IDA^۱) به دست آمد. سپس با استفاده از مقادیر دریافت ارائه شده بر اساس چهار حالت خرابی کم، متوسط، شدید و کامل، منحنی‌های شکنندگی ستون پل به دست آمده و به کمک این دسته منحنی‌ها احتمال وقوع هر یک از چهار حالت خرابی ذکر شده تعریف گردیدند. در ادامه، به منظور بررسی بهتر رفتار پل و احتمال خرابی، مقادیر پاسخ سازه در همه زلزله‌ها ارزیابی شده و منحنی شکنندگی که ماحصل میانگین پاسخ همه زلزله‌ها در حالت‌های خرابی کم، متوسط، زیاد و کامل ترسیم شده است.

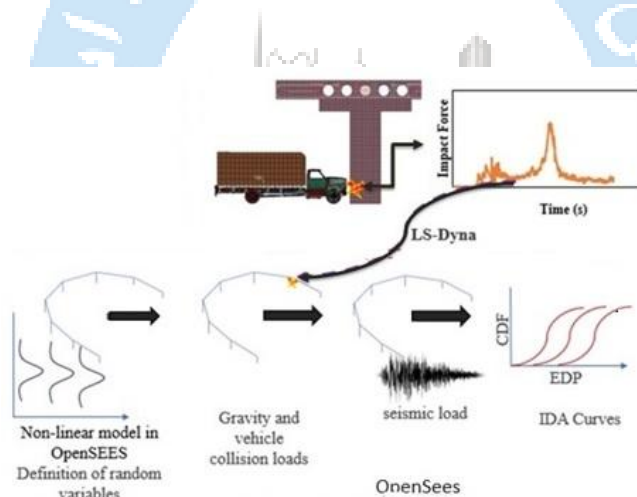
۲- معرفی مدل سازه‌ای

در این پژوهش یک نمونه پل واقع در شهرستان گرگان با طول ۵۰۰ متر است انتخاب گردید. مشخصات مصالح به کار رفته در المان‌های پل شامل مقاومت فشاری بتن، مقاومت تسلیم فولاد و مدول الاستیسیته آرماتور به ترتیب ۲۵ مگاپاسکال، ۴۰۰ مگاپاسکال و ۲۰۰ تن بر متر است. همچنین فرض بر این است که سازه در پهنه‌ای با لرزه خیزی بالا با درجه خاک III و استاندارد AASHTO، آئین نامه طراحی

مقاوم در برابر لرزه پل‌های راه و راه آهن و بارهای استاندارد برای پل برای طراحی سازه استفاده شده است. در شکل ۱ نمای مقطع پل و در شکل ۲ نمایی از تحلیل شماتیک مشاهده می‌گردد.



شکل ۱: نمای پل در نرم افزار و واقعیت

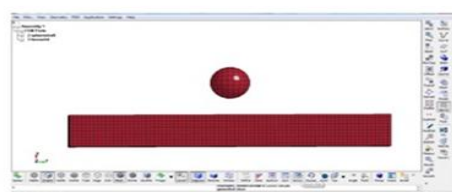
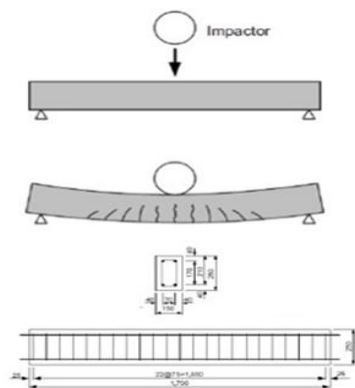


شکل ۲: نمایی از تحلیل شماتیک

۳- صحت سنجی

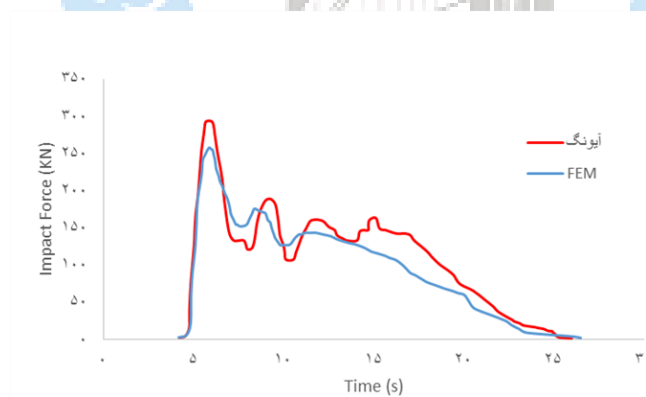
یکی از جنبه‌های مهم مدل سازی المان محدود اعتبارسنجی با نتایج آزمایشگاهی یا پدیده فیزیکی برای اطمینان از کفایت مدل - های انتخاب شده مواد، شرایط مرزی و الگوریتم‌های تماسی برای مدل برخورد وسیله نقلیه به ستون است. در اولین گام هر مدل سازی صحت سنجی نتایج مدل سازی با نتایج تحقیقات تائید شده گذشته است. صحت سنجی در این پژوهش از دو فاز تشکیل شده است. فاز اول مربوط به اعتبارسنجی اثر ضربه و فاز دوم مربوط به صحت روش مدل سازی تحت بارهای جانبی است. برای این منظور ابتدا با استفاده از روش مدل سازی در نرم افزار LS-DYNA سعی شده است تا نحوه برخورد به خوبی مدل سازی شود. برای این منظور از مدل آیونگ و همکاران استفاده شده است [12]. شکل ۳ نمای شماتیک اثر برخورد به تیر را نشان می‌دهد. آنها یک تیر ساده بتن آرمه با مقطع مستطیلی

را در معرض بار ضربه قرار داده و نیروی وارده در اثر اعمال ضربه و اثرات آن را بررسی کردند و منحنی‌های نیرو - زمان آن بررسی و ارائه شده است که نتایج نشان می‌دهد روند مدل‌سازی در فاز ضربه یک روند مناسب است. [۱۲]



شکل ۳: نمای شماتیک اثر برخورد به تیر

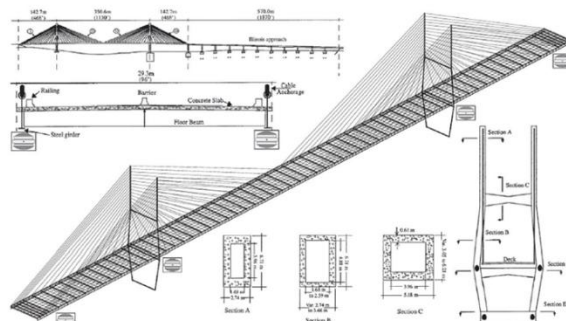
برای مقایسه، نیروی ضربه به عنوان معیار مقایسه استفاده شده است. همان‌طور که در شکل ۴ مشخص است نتایج نرم افزار مطابقت خوبی با نتایج آیونگ و همکاران دارد.



شکل ۴: نتایج شبیه‌سازی شده عددی و آزمایشگاهی.

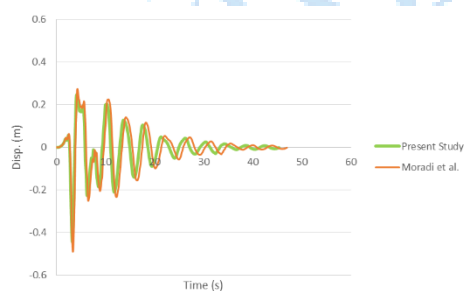
در احداث پل‌ها از مصالح بسیار استوار استفاده می‌شود. امروزه رایج‌ترین این مصالح بتن مسلح و فولاد است. استفاده از بتن مسلح در احداث پل‌ها بسیار رایج می‌باشد. مخلوط دو نوع مصالح با ویژگی‌های متفاوت، منجر به پیچیده شدن آنالیز سازه‌های بتنی نسبت به سازه‌های فولادی می‌شود. با استفاده از اجزای محدود، می‌توان سازه‌های بتنی را با دقت بهتری مدل‌سازی کرد. باتوجه به مهم بودن بررسی رفتار پل‌های بزرگراهی ناشی از زلزله، در این پژوهش، برای مدل‌سازی پل‌های بزرگراهی از نرم افزار OpenSees استفاده شده است. این نرم افزار محصول مرکز تحقیقات مهندسی زلزله اقیانوس آرام در دانشگاه برکلی است و قابل دریافت از سایت این دانشگاه است. جهت

انجام اعتبار سنجی یک پل، از تحقیق مرادی و همکاران [۱۳] استفاده شده است آنها پل بیل امر سون را مدل سازی و در معرض بار لرزه ای قرار داده و حساسیت شاخص های مختلف را بررسی کردند. مشخصات این پل در مرجع ارائه شده است. مشخصات و مدل عددی ایجاد شده جهت صحت سنجی در شکل ۵ ارائه شده است



شکل ۵: مشخصات و مدل عددی ایجاد شده پل بیل امرسون [۱۳].

پس از مدل سازی این پل رکورد زلزله سنفراندو به سازه اعمال و جابجایی افقی عرشه استخراج شده است. در شکل ۶ نتایج تحلیل ارائه شده است که نشان می دهد روند مدل سازی بر اساس صحت سنجی های انجام شده روند درست و مناسبی بوده است:



شکل ۶: مقایسه نتایج مدل عددی ایجاد شده جهت اعتبار سنجی با مدل عددی مرادی و همکاران

تجزیه و تحلیل سه بعدی کل ساختار پل در نرم افزار OpenSees برای ارزیابی عملکرد پل انتخاب شده است زیرا در صورت مدل سازی پل در حالت دو بعدی، تعامل بین بخش های مختلف پل به درستی در نظر گرفته نمی شد که منجر به خطاهای متعدد در محاسبه پاسخ اجزای تجزیه و تحلیل می شود. در جدول ۱ مشخصات مربوط به نحوه مدل سازی مصالح و المان پل مورد بررسی ارائه شده است.

رفتار بتن محصور نشده با استفاده از مصالح Concrete01 مدل شده است که این مصالح از سختی کاهش یافته خطی در بارگذاری و بار برداری و تنش پسماند برای بتن استفاده می کند و همچنین برای مدل کردن بتن محصور شده که شیوه مدل کردن آن با بتن محصور نشده متفاوت است و بر اساس پژوهش های گذشته محققان که نشان داده اند مسلح شدن بتن باعث افزایش مقاومت و شکل پذیری بتن در فشار می شود، همچنین در نرم افزار OPENSEES از مصالح Concrete 04 استفاده شده است. مقاومت مورد انتظار مصالح و همچنین روابط تنش و کرنش مصالح باید به طور دقیق محاسبه و مورد استفاده قرار گیرد تا رفتار پل به درستی به دست بیاید [۱۴]. برای مدل سازی از روش پلاستیسیته گسترده استفاده شده است. در ابتدا متریال تک محوره با استفاده از کد uniaxialMaterial در کتابخانه نرم افزار آپنسیس تعریف و پس از آن با استفاده از دستور section Fiber یک مقطع بتن آرمه ایجاد شد. در نهایت با استفاده از المان غیر خطی forceBeamColumn المان های غیر خطی برای اجزای مختلف پل مورد مطالعه ایجاد شده است. لازم به ذکر است برای در نظر گرفتن اثرات تغییر مکان ثانویه و تغییر شکل های بزرگ از محور محلی Corotational استفاده شده است. اطلاعات کلی مدل سازی در جدول ۱ ارائه شده است. همچنین زمان تناوب پیوند مود اول: ۱.۰۵۷ مود دوم: ۰.۹۷ و مود سوم ۰.۸۶ ثانیه محاسبه شده است. برای محاسبه میرایی از میرایی رایلی ۰.۵٪ استفاده شده است و ضرایب سختی و جرم بر اساس کدهای نوشته شده در نرم افزار محاسبه و اعمال گردیده است. همچنین در محل درزهای میانی و همچنین کوله ها (کوله های نشیمن دار مدنظر است)، المان های صفر طولی مربوط به تکیه گاه های الاستومتری و المان های ضربه بین قاب های مجاور و همچنین بین کوله و عرشه (در نقاط انتهایی عرشه) بصورت موازی به یکدیگر متصل شده و با المان های صلب عرشه در امتداد عرضی اتصال می یابند. به منظور رسیدن به رفتار معقولی از سیستم کوله، این مجموعه المان ها به فنرهای خاک شمع بصورت سری بسته می شوند. باتوجه به اینکه کلاس پل های رو سازه و قاب های ستون ها بصورت یکپارچه طراحی می شوند، برای اتصال قسمت بالایی ستون به المان های عرضی عرشه از یک سری اتصال دهنده های صلب استفاده می شود. در این تحقیق، تیر های طولی عرشه و تیرهای سرستون با استفاده از المان غیرخطی (dispBeamColumn) و با تخصیص یک مقطع الاستیک مدل سازی شده اند. برای در نظر گرفتن اثر صلبیت اتصال ستون ها به تیرهای سرستون، انتهای فوقانی ستون ها به اندازه فاصله مرکز سطح سرستون تا انتهای فوقانی ستون که به میزان ۰ / ۶۲۵ متر می باشد، صلب در نظر گرفته شده است.

جدول ۱: اطلاعات کلی مدل سازی در نرم افزار OPENSEES

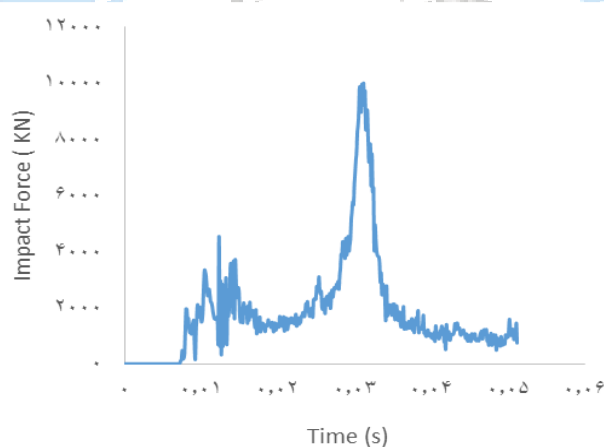
uniaxialMaterial	نوع مقطع
section Fiber	
forceBeamColumn	المان غیر خطی
Corotational	اثرات تغییر مکان ثانویه و تغییر شکل های بزرگ
Concrete01	رفتار بتن محصور نشده
Concrete04	رفتار بتن محصور شده
steel02	آرماتور

۴- معرفی بار ضربه

۴-۱- مدل سازی در نرم افزار LS-DYNA و خروجی نیرو-زمان

در این پژوهش از کامیون F800 هشت تنی که توسط مرکز تحقیقات حمل و نقل ملی (NCAC²) ارائه شده مورد استفاده قرار گرفته است. این وسیله نقلیه بر روی یک سازه کلی طولی اصلی ساخته شده است که به عنوان شاسی آن عمل می کند. مشخصات شاسی در دفترچه راهنمای خدمات به عنوان فولاد کم آلیاژی با مقاومت بالا با نقطه تسلیم ۳۵۰ مگاپاسکال مشخص شده است. تنش تسلیم فولاد تشکیل دهنده سطح کامیون ۱۵۵Mpa و سایر اجزا ۲۷۰Mpa است. چگالی جرم و مدول الاستیک فولاد مورد استفاده در مدل به

ترتیب $7.85 \text{ kN/m}^2/g$ و 20.5 GPa است. فرض بر این است که 2.8 تن جرم بر روی کامیون بارگیری می شود که منجر به جرم کلی 8 تن می شود. جدول ۲ اطلاعات کلی مدل سازی المان محدود کامیون را نشان می دهد [۱۵ و ۱۶]. باتوجه به جاده های موجود برای استفاده از دستور العمل های آزمایش تصادف برای بزرگراه ها ۶ حالت وجود دارد، حالت اول برای جاده های کوچک با سرعت و ترافیک کم، حالت ۲ برای سازه های موجود در جاده های شلوغ و حالت ۳ برای سازه هایی که در جاده های مهم پرسرعت قرار دارند تعریف می شود. برای حالت های ۴ تا ۶ سازه هایی هستند که در مناطقی که دارای ترافیک سنگین هستند مورد استفاده قرار می گیرند. یک مطالعه انجام شده توسط آگراول و چن نشان داد که ۹۵٪ از برخورد وسایل نقلیه با پل ها شامل کامیون های سنگین می باشند که این نیازمند یک سطح آزمایش حداقل ۴ است که شامل یک کامیون با وزن حداقل ۵.۵ تن و سرعت ضربه ی 80 کیلومتر در ساعت است [12]. در این پژوهش از سرعت ضربه 80 کیلومتر در ساعت برای مطابقت با الزامات کد (NCAC) استفاده شده است در حالی که همچنین سرعت 100 و 120 کیلومتر در ساعت برای مشاهده اثرات سرعت ضربه های مختلف در پاسخ ستون انتخاب شده است. در این پژوهش تجزیه و تحلیل ضربه یک پل بتنی با استفاده از بسته نرم افزاری شبیه سازی المان محدود LS-DYNA انجام شده است که تحلیل دینامیکی گذرا غیر خطی را انجام می دهد. پایه بتن مسلح در این نرم افزار با MAT_CSCM_CONCRETE مدل سازی شده است. همچنین میلگردهای داخل بتن با استفاده از CONSTRAINED_LAGRANGE_IN_SOLID مدل سازی می شوند. شرایط تماس بین سازه و خودرو با CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE تعریف شده است. جدول ۳ اطلاعات کلی مدلسازی پل را در نرم افزار LS-DYNA نشان می دهد. شکل ۷ نمودار نیرو- زمان برخورد کامیون F800 با سرعت 100 کیلومتر بر ساعت به ستون پل را نشان می دهد که بعد از استخراج این نیرو آن را در O اعمال و سپس پاسخ لرزه ای پل تحت ۱۹ رکورد زلزله با انجام تحلیل دینامیکی غیر خطی افزایشی با نرم افزار OpenSees با استفاده از متغیرهای تصادفی به دست می آید. طریقه ی اعمال بار بدین گونه است که در ابتدا بار ضربه به سازه ی پل توسط منحنی نیرو- زمان از نرم افزار LS-dyna استخراج شده و به شبیه ساز اپنسیس اعمال شده، و چند ثانیه پس از اعمال ضربه که سازه به تعادل مجدد رسید، بار لرزه ای زلزله به آن اعمال گردید.



شکل ۷: نمودار نیرو- زمان برخورد کامیون F800 با سرعت 100 کیلومتر بر ساعت.

جدول ۲: اطلاعات کلی مدل کامیون [۱۶]

مدل المان محدود استفاده شده در آنالیز برخورد		
۱۹۴۷۹	shell	تعداد المان ها
۱۲۴۸	solid	
۱۲۴	beam	
۸۰۳۵		وزن وسیله نقلیه (kgf)

۲۰۵	مدول الاستیسیته (GPa)
۲۴۰۰×۳۲۰۰×۸۵۰۰	ابعاد وسیله نقلیه [B×H×L,mm]

جدول ۳: اطلاعات کلی مدل سازی المان محدود پل [۱۶]

کلمات کلیدی برای مدل سازی FE		
MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY (024)	فولاد	مواد به کار رفته
MAT_CSCM_CONCRETE (159)	بتن	رفته
MAT_RIGID (020)	سطح زمین	
CONSTRAINED_LAGRANGE_IN_SOLID	فولاد در بتن	قید
CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE	وسیله نقلیه	تماس
CONTACT_TIED_NODES_TO_SURFACE	سازه	

توضیح MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY در نرم افزار بدین گونه است که یک مصالح الاستوپلاستیک است که می تواند منحنی کرنش مورد نظر و وابستگی نرخ کرنش مورد نظر را در برابر مقدار تنش مورد نظر تعریف کند و MAT_CSCM_CONCRETE (159) یک مدل برای مصالح پوسته ای پیوسته است و برای عناصری به شکل جامد می توان از این کیبورد در نرم افزار LS-DYNA استفاده کرد. همچنین CONSTRAINED_LAGRANGE_IN_SOLID برای یکپارچه کردن مصالح جامد در مصالح سیال و روان استفاده می شود. برای تماس ۲ سطح از CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE استفاده می شود که برای حالت تماس دو عضو که به یکدیگر وابسته نیستند استفاده می شود. در مورد اتصال سازه از CONTACT_TIED_NODES_TO_SURFACE استفاده می شود که بین نیروهای انتقالی و دورانی ارتباطی بوجود نمی آورد.

۵- معرفی بارهای لرزه ای

از مهم‌ترین عامل در تحلیل دینامیکی فزاینده، تعیین شتاب‌نگاشت‌های وارد بر پل می‌باشد زیرا نتیجه‌های بدست آمده از تحلیل، همگی بیانگر اثر زلزله وارد بر سازه می‌باشد. انتخاب نوع شتاب‌نگاشت‌ها یک موضوع آزاد نمی‌باشد، زیرا این موضوع باید به گونه‌ای باشد که بازگوکننده‌ی تمامی حالت‌های رفتار سازه شامل الاستیک، پلاستیک و کامل باشد. نکته‌ی حائز اهمیت‌ی که می‌بایست به آن توجه داشت، تعداد کافی بودن شتاب‌نگاشت‌ها است، به این علت که تعداد اندک آنها نمی‌تواند بازگوکننده‌ی پاسخ کاملی از سازه پل باشد و همچنین تعداد زیاد شتاب‌نگاشت‌های انتخابی موجب خواهد شد که زمان زیادی وقت ببرد. باتوجه‌به توصیه کورنل تعداد 10 تا 20 شتاب‌نگاشت زلزله دقت قابل قبولی در برآورد تقاضای لرزه‌ای می‌دهند [17]. در این پژوهش از چندین شتاب‌نگاشت که معمولاً فاصله‌ای کمتر از 30 کیلومتر تا مرکز زلزله دارند از بانک اطلاعاتی PEER انتخاب شد [18] که اکثراً توسط استاندارد FEMA P695 معرفی شده است استفاده شده است. انطباق نوع خاک، حوزه نزدیک بودن، دارای حداقل یک پالس بودن، فاصله کانونی کمتر از 30 کیلومتر و زمان موثر رکورد مهم‌ترین ویژگی‌هایی بوده که در انتخاب رکورد نقش داشته است. پس از انتخاب رکوردهای زلزله، آنها به صورت افزایشی و با گام‌های 0/1 مقیاس شدند که پس از اعمال ضربه به سازه تحت سرعت‌های مختلف و به تعادل رسیدن مجدد، به سازه اعمال می‌شود تا شکست کامل رخ دهد. لازم بذکر است در شبیه‌سازی انجام شده از نمودار نیرو-زمان استخراج شده از نرم افزار LS_DYNA برای اعمال ضربه به سازه پل استفاده شده است. رکوردها در دو جهت به سازه اعمال شده است. هر رکورد معرفی شده در جدول 4 دارای سه مولفه است: دو مولفه افقی و یک مولفه قائم. دو مولفه افقی هر رکورد در نرم افزار تعریف و سپس به سازه اعمال شده است.

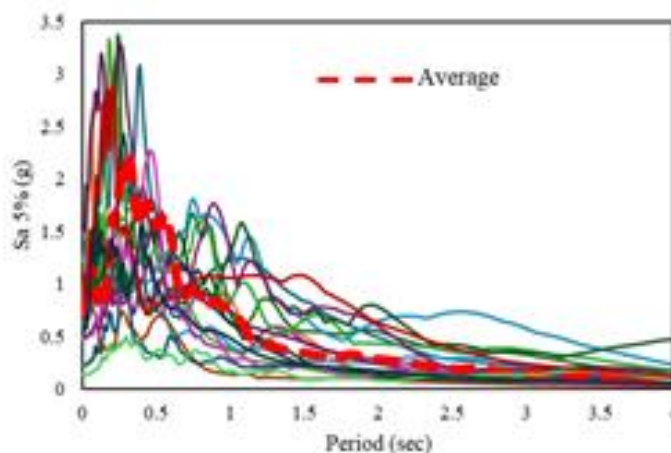
مشخصات این زلزله‌ها در جدول 4 نشان داده شده است. در این پژوهش برای اینکه تاثیر بار زلزله کامل بررسی شود هر یک از زلزله‌ها به صورت دینامیکی افزایشی در تحلیل انتخاب شده اند [19]. در شکل 8 طیف رکوردهای مورد استفاده شده نشان داده شده است:

جدول 4: شتاب‌نگاشت‌های انتخاب شده

ردیف	نام زلزله	ایستگاه	PGA(g)	PGV(cm/s)	Mw	فاصله از مرکز (km)
1	Chi-Chi, Taiwan	TCU084	1/16	115/1	7/6	8/9
2	Chi-Chi, Taiwan	TCU065	0/789	127/7	7/6	26/7
3	Cape Mendocino	Cape Mendocino	1/43	119/5	7	10/4
4	Coalinga-05	Oil City	0/841	41/2	5/8	4/6
5	Imperial Valley-06	Elcentro#5	0/528	91/5	6/5	27/8
6	Imperial Valley-06	Elcentro#8	0/602	48/6	6/5	28/1
7	Kocaeli, Turkey	Izmit	0/22	28/9	7/5	5/3
8	Loma Prieta	BRAN	0/64	55/9	6/9	9
9	Morgan Hill	Coyote Lake Dam	1/3	62	6/2	6.24
10	Nahanni	Site 2	0/45	37/4	8.6	6/5
11	Northridge	Sylmar-Converter Station	0/897	130/3	6/7	13/3
12	Northridge	Sylmar-Olive View	0/843	122/7	6/7	16/8
13	San Fernando	Pacoima Dam	1/24	116/5	6/6	11/9
14	Nigata	NIGH11	0/59	58/1	6/63	8/9

۱۵	Kobe	Nishi-Akashi	۰/۴۸	۴۶/۸	۶/۹	۷/۶
۱۶	Gazi, USSR	Karakyr	۰/۷۱	۷۱/۲	۶/۸	۱۲/۸
۱۷	Bam	Bam	۰/۸	۱۲۴/۱	۶/۶	۱۵
۱۸	Tabas	Tabas	۰/۸۵	۲۴	۷/۳۵	۸
۱۹	Manjil	Abhar	۰/۵۱	۱۰/۶	۷/۳۷	۱۵





شکل ۸: طیف رکورد های مورد استفاده

۶- ترسیم منحنی های شکنندگی پل مورد مطالعه:

منحنی های شکنندگی رویکردی مؤثر به منظور مقایسه دقیق رفتار لرزه ای سازه در زلزله و در نظر گرفتن آسیب پذیری اجزای سازه می باشد. منحنی شکنندگی احتمال افزایش میزان تقاضای لرزه ای سازه نسبت به ظرفیت آن در یک مقدار معلوم از شدت زلزله را مشخص می کند. در حالت کلی منحنی شکنندگی به صورت رابطه ۱ تعریف می شود:

$$Fragility = P[EDP > AC|IM] \quad (1)$$

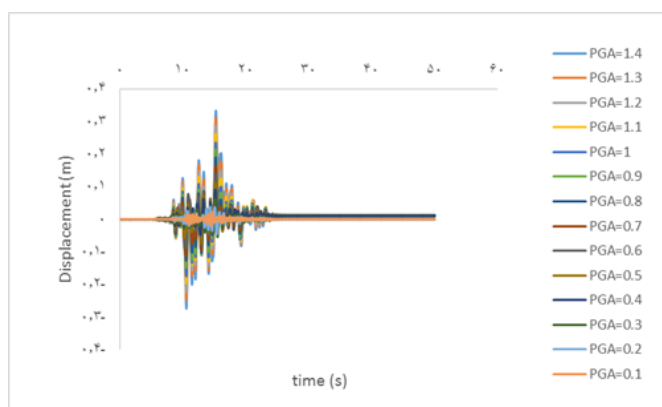
که در آن IM شدت زلزله است، که معمولاً برابر شتاب حداکثر زمین (PGA)، شتاب طیفی (Sa) و یا جابجائی طیفی (Sd) فرض می شود، EDP پارامتر تقاضای مهندسی است، که از خروجی تحلیل بدست می آید و AC شرایط قابل قبول مربوط به حالت حدی مفروض است [۲۰]. در این تحقیق از ۱۹ رکورد لرزه ای استفاده شده است. هر یک از این رکوردها از شتاب طیفی 0.1g با گام های 0.1g تا جایی مقیاس شده اند که سازه از مرز ناپایداری عبور کند. معیار بیشینه دررفت 0.1 برای ناپایداری سازه در نظر گرفته شده است [۲۰، ۲۱]. پس از انجام تحلیل IDA منحنی های IDA ترسیم و سپس با در نظر گرفتن مقدار مشخصی از دررفت برای هر سطح عملکرد، منحنی های شکنندگی محاسبه و ارائه شده است.

۷- بررسی پاسخ دینامیکی تحت یک شتابنگاشت

۷-۱- تاریخچه جابجایی پایه پل

جابجایی پایه یکی از پاسخ های با اهمیت سازه می باشد. پس از زلزله، به دلیل رفتار غیرخطی در سازه و در نتیجه ی تشکیل مفصل پلاستیک و رسیدن اعضا به بیشترین مقاومت خود و نرم شدن سازه، جابجایی های آن آسان تر انجام می گیرد. این تغییر مکان های ماندگار باعث می شوند محور قائم پاسخ در آخر زلزله روی عدد صفر قرار نگیرد و پس از زلزله ی بعدی که ممکن است با شدت بالا باشد، گاهی ممکن است به میزان تغییر شکل های حاصل از زلزله ها جمع شود. در این پژوهش باتوجه به تحلیل IDA یک زلزله را به عنوان نمونه مقدار جابجایی پایه پل مورد بررسی قرار گرفته است. شکل ۹ نمونه ای از مقدار جابجایی در اثر برخورد خودرو و یک شتابنگاشت وارد شده به پل و جدول ۵ مقدار جابجایی در اثر برخورد خودرو در سرعت های مختلف در یک شتابنگاشت را نشان می دهد. همان طور که در

جدول مشاهده می گردد با افزایش بیشینه شتاب زلزله مقدار جابجایی ستون افزایش می یابد و با افزایش سرعت نیز مقدار جابجایی در هر شتاب زلزله بیشتر می شود.

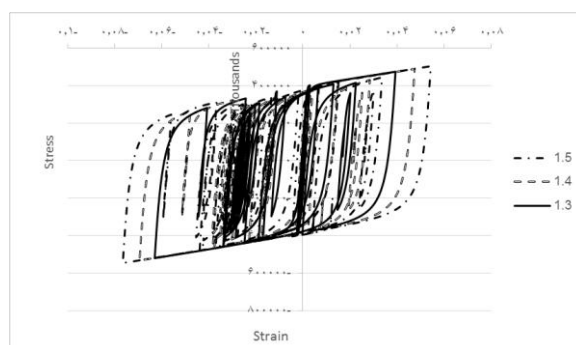


شکل ۹: نمونه ای از مقدار جابجایی در اثر برخورد خودرو و یک شتابنگاشت وارد شده به پل

جدول ۵: مقدار جابجایی در اثر برخورد خودرو در سرعت های مختلف در یک شتابنگاشت

شتاب زلزله	۰/۱	۰/۲	۰/۳	۰/۴	۰/۵	۰/۶	۰/۷	۰/۸	۰/۹	۰/۱	۰/۱۱	۰/۱۲	۰/۱۳	۰/۱۴
جابجایی در حالت بدون ضربه خودرو	۰.۰۰۷	۰.۰۲	۰.۰۲۷	۰.۰۷	۰.۱۱	۰.۱۶	۰.۲	۰.۲۵	۰.۳۱	۰.۳۳	۰.۳۸	۰.۳۸	۰.۳۴	۰.۳۲
جابجایی در سرعت ۸۰ کیلومتر بر ساعت	۰.۰۰۹	۰.۰۲۵	۰.۰۴	۰.۰۸	۰.۱۲	۰.۱۵	۰.۲۱	۰.۲۶	۰.۳۱	۰.۳۴	۰.۳۸	۰.۳۴	۰.۳۱	۰.۳۶
جابجایی در سرعت ۱۰۰ کیلومتر بر ساعت	۰.۰۱	۰.۰۲۷	۰.۰۴۳	۰.۰۸۸	۰.۱۲	۰.۱۶۴	۰.۲۲	۰.۲۷	۰.۳۲	۰.۳۶	۰.۳۴	۰.۳	۰.۳۳	۰.۴۲
جابجایی در سرعت ۱۲۰ کیلومتر بر ساعت	۰.۰۱۲	۰.۰۲۸	۰.۰۵۱	۰.۰۹	۰.۱۲	۰.۱۸	۰.۲۴	۰.۲۹	۰.۳۱	۰.۳۲	۰.۳	۰.۲۸	۰.۳۷	۰.۴۵

در شکل ۱۰ نمودار هسترزیس مربوط به آرماتور طولی نزدیک به هسته بتن نشان داده شده است و مشاهده می گردد که با افزایش شتاب زلزله مقدار تنش و کرنش افزایش می یابد.

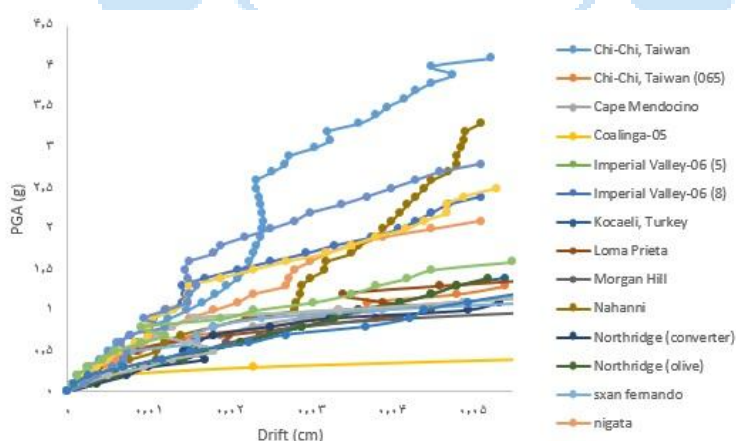


شکل ۱۰: نمودار هسترزیس مربوط به آرماتور طولی نزدیک به هسته بتن

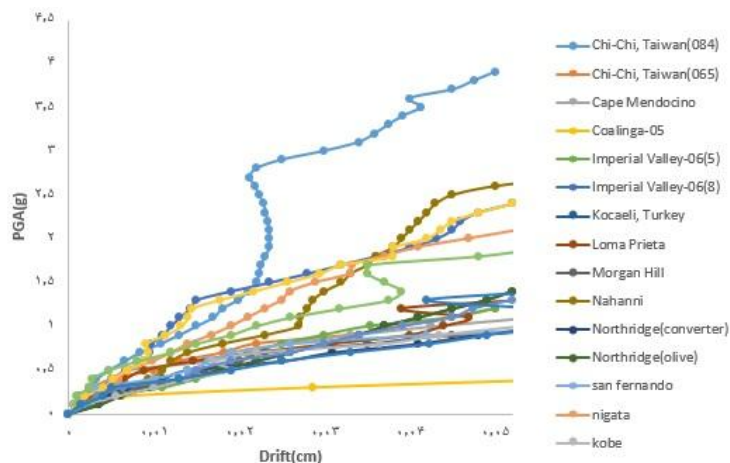
۸- تحلیل خرابی سازه پل با استفاده از تحلیل دینامیکی افزایشی (IDA)



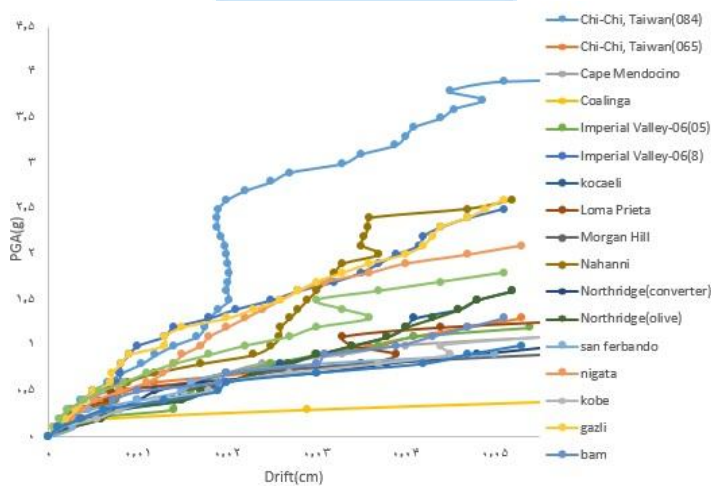
باتوجه به شبیه بودن روش تحلیل استاتیکی خطی و تحلیل استاتیکی غیرخطی، ذهنیت استفاده از روش تحلیل دینامیکی افزایشی IDA بوجود آمد، مفهوم این روش در سال ۱۹۷۷ توسط برترو ادامه پیدا کرد و بعد از آن بسیاری از محققین روی این مفهوم فعالیت نمودند که می‌توان به نام‌هایی چون لوکو و کرنل، بازورو و کرنل را اشاره کرد [۲۲]. امروزه این روش در دستورالعمل‌هایی نظیر؛ 40-ATC و FEMA-2000 نیز وارد شده است، که از طریق این روش ظرفیت فروریزش سازه تخمین زده می‌شود. با وقوع هر زلزله، علم مهندسی زلزله به یافته‌های جدیدی دست می‌یابد. به عنوان نمونه در زلزله ۱۹۸۹ لوما پریتا و ۱۹۹۴ نورتریج مشخص شد که ساختمان‌های طراحی شده برای سطح ایمنی جانی نمی‌توانند کامل مورد اعتماد باشند. در تحقیقات سعی بر این است که طراحی به نحوی باشد تا خسارت‌ها را به حداقل برسانند. برای این حالت روشی مورد نیاز است که تقاضای ورودی به سازه را تحت زلزله‌های احتمالی وارده بر سازه مشخص کند و چون اغلب یک سازه باید در سطوح مختلف زلزله عملکردهای متفاوتی داشته باشد، این تقاضا بهتر است براساس سطوح مختلف زلزله بدست آید و در نهایت سطحی از زلزله که باعث افزایش تقاضا از حد قابل قبول آن می‌شود، مشخص شود. روش‌های زیادی برای بدست آوردن این تقاضا وجود دارد که جدیدترین آن روش تحلیل دینامیکی افزایشی (IDA) می‌باشد که بعنوان یکی از روش‌های خوب جهت تخمین بهتر نیاز لرزه‌ای و ظرفیت سازه در مهندسی زلزله قرار دارد. در این روش کدهای لرزه‌ای مدرن در نظر گرفته شده استفاده می‌شوند، همچنین باتوجه به ماهیت دینامیکی بودن این روش، به طور حتم نتایج واقع بینانه تری نسبت به روش‌های استاتیکی غیر خطی را می‌توان شاهد بود. تحلیل دینامیکی افزایشی با انجام تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی از یک مدل لرزه‌ای تحت مجموعه‌ای از شتابنگاشت‌ها تعریف می‌شود. IDA یک روش تحلیل عددی است که عملکرد سازه را از نظر پارامتر تقاضای مهندسی (EDP^3) انتخاب شده به پارامتر ورودی حرکت زمین، مرتبط می‌سازد. تغییر مکان نسبی ستون‌های پایه (دریفت)، به عنوان پارامتر خرابی و بیشینه شتاب زمین لرزه به عنوان پارامتر شدت جنبش‌های زلزله، در تحلیل دینامیکی در نظر گرفته می‌شود [۲۳]. آنگاه تحلیل دینامیکی غیرخطی در PGA^4 در هر گام زمانی از $0.1g$ تا گسیختگی کامل با گام‌های یکنواخت 0.1 افزایش یافته و در پایان منحنی پاسخ سازه در برابر پارامتر شدت لرزه‌ای رسم می‌شود. رفتار ستون پل تحت تحریک شتابنگاشت‌ها که بر پل اعمال شده، بررسی می‌شود و منحنی‌های دینامیکی افزایشی بر مبنای دریفت ستون پل رسم و مقادیر تغییر مکان‌های متناظر با حد تسلیم، آستانه فروریزش و ناپایداری پایه‌ها را می‌توان از روی این نمودارها مشخص نمود. برای نمونه در شکل‌های ۱۱ الی ۱۴ منحنی‌های IDA ستون پل در سرعت‌های مختلف ترسیم شده است. همانطور که مشاهده می‌گردد، در اغلب موارد منحنی‌های دینامیکی افزایشی سازه مورد مطالعه به گونه‌ای است که در ابتدا رفتار خطی داشته و پس از افزایش بیشینه شتاب، جابجایی منحنی افزایشنده به صورت غیر خطی درآمده است.



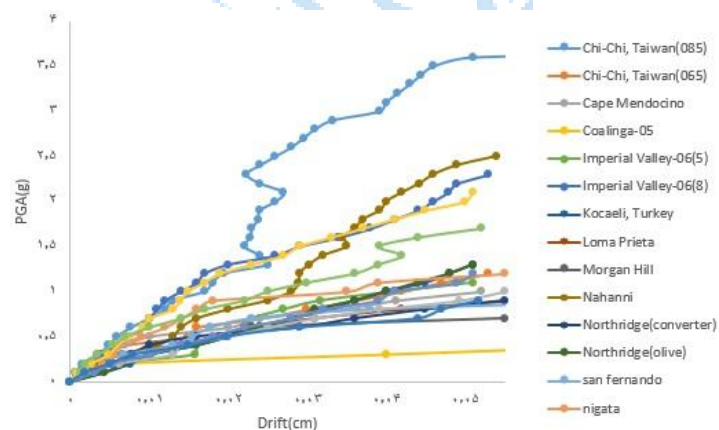
شکل ۱۱: منحنی IDA ستون پل بدون ضربه خودرو.



شکل ۱۲: منحنی IDA ستون پل، با سرعت ۸۰ کیلومتر بر ساعت.



شکل ۱۳: منحنی IDA ستون پل، با سرعت ۱۰۰ کیلومتر بر ساعت.



شکل ۱۴: منحنی IDA ستون پل، با سرعت ۱۲۰ کیلومتر بر ساعت.

۹- ترسیم منحنی های شکنندگی پل مورد مطالعه:

منحنی های شکنندگی رویکردی مؤثر به منظور مقایسه دقیق رفتار لرزه ای سازه در زلزله و در نظر گرفتن آسیب پذیری اجزای سازه می باشند. منحنی شکنندگی احتمال افزایش میزان تقاضای لرزه ای سازه نسبت به ظرفیت آن در یک مقدار معلوم از شدت زلزله را مشخص می کند.

برای تعیین منحنی شکنندگی، لازم است مقادیرهای مرزی هر یک از حالات خرابی تعیین شود. حالت های خرابی معمولاً به صورت کیفی، مشاهداتی و کمی می باشند. حالات خرابی بر اساس مقادیر مختلف معیارهای خرابی تعریف می گردد. معیار خرابی رابطه ای تحلیلی است که با توجه به تاریخچه بارگذاری (تقاضا) و ویژگی های سازه (ظرفیت)، معیاری برای بیان خرابی سازه ارائه می دهد. معیارهای خرابی ممکن است فقط مختص به المان سازه ای باشند و یا به کل سازه مرتبط باشند. مقادیر معیارهای خرابی از صفر، که نشان دهنده عدم خرابی است، تا یک که نشان دهنده خرابی کامل می باشد، متغیر است. برای مقادیر بین صفر تا یک لازم است برخی ویژگی های کمی و کیفی خرابی مورد نظر تعیین گردد. به عنوان مثال در سازه های بتنی این ویژگی ها ممکن است شامل انواع و مقادیر ترک خوردگی و اندازه ترک ها و یا کاهش مقاومت بتن باشند. تعیین یک رابطه بین معیار خرابی و سطح خرابی، از ارکان روش طراحی بر اساس عملکرد می باشد. پارامترهای مختلفی از رفتار سازه در برابر زلزله، به عنوان معیار خرابی سازه در نظر گرفته می شود. این پارامترها شامل تغییر شکل جانبی نسبی (دریافت)، شکل پذیری، ظرفیت جذب انرژی، مقاومت مصالح و غیره می باشند [۲۴]. به عنوان مثال مکی و استوژادینویچ معیار شکل پذیری تغییر مکانی و شکل پذیری انحنایی را برای دو نوع ستون بتنی به عنوان معیار خرابی پل تعریف نمودند [۲۵]. انشای در تحقیقی تغییر مکان بالای ستون و شکل پذیری تغییر مکانی و انحنایی را به عنوان معیارهای خرابی پل های ساخته شده پس از سال ۱۹۹۰ میلادی در نظر گرفت [۲۶]. بانرجی و شینوزوکا با در نظر گرفتن شکل پذیری دورانی و شکل پذیری انحنایی، ستون های پل تک ستونی، یک سری حدود خرابی تعریف نمودند [۲۷]. کیم و شینوزوکا و بالو و همکاران هم معیار شکل پذیری تغییر مکانی را برای ارزیابی لرزه ای دو نوع پل مقاوم سازی شده در نظر گرفته و چهار حالت خرابی تعریف کردند [۲۸ و ۲۹]. کالترن هم کرنش تسلیم فولاد و بتن را به عنوان ملاک خرابی پل ها در نظر گرفته است [۳۰ و ۳۱]. در این پژوهش منحنی های شکنندگی پل با استفاده از نتایج حاصل از منحنی های IDA در هر یک از رکوردهای زلزله انتخابی رسم می گردد. مطابق جدول ۶ از معیار دوتا و مندر برای رسم منحنی های شکنندگی استفاده می گردد [۳۲].

جدول ۶: مقادیر حدود خرابی منحنی های شکنندگی پل ها بر اساس معیارهای دوتا و مندر [۳۲].

تغییر مکان نسبی	توصیف حالت حدی خرابی پل	حالت خرابی
۰/۰۰۷	پوسته پوسته شدن بتن	کم
۰/۰۱۵	خسارت تکیه گاه	متوسط
۰/۰۲۵	خرابی اولیه ستون	زیاد
۰/۰۵	خرابی پایه ها	کامل

شرح تفصیلی هر یک از حالات خرابی عبارت است از:

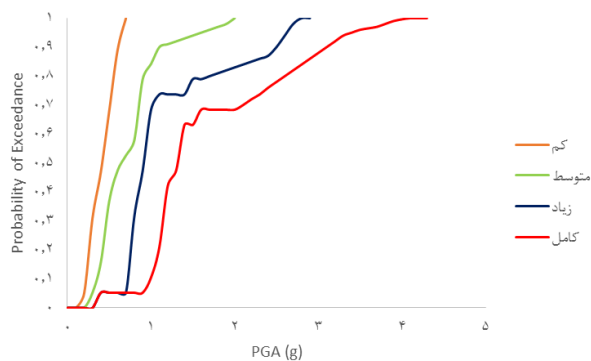
خسارت کم (Slight): در خرابی کم، آسیب ناچیزی به اجزای غیر سازه ای وارد شده است و اجزای سازه ای بدون آسیب هستند.

خسارت متوسط (Moderate): در خرابی متوسط، اجزای سازه ای آسیب جزئی دیده اند و اجزای غیر سازه ای، دارای آسیب زیاد هستند.

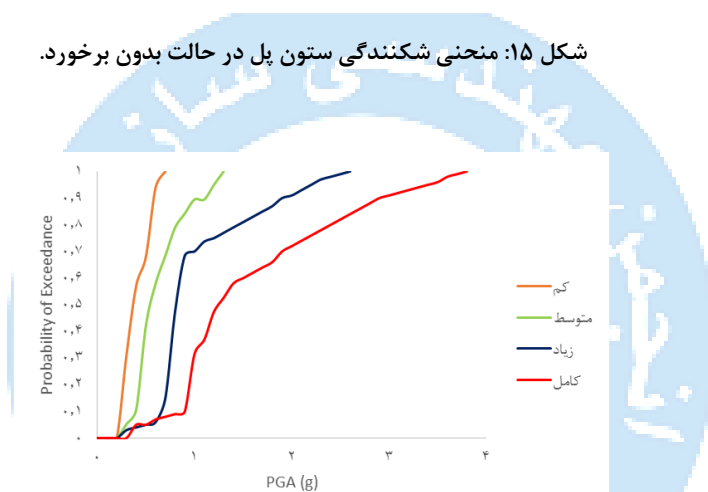
خسارت شدید (Extensive): در خرابی وسیع، خرابی اجزای سازه زیاد و اجزای غیر سازه ای کاملاً خراب شده اند.

خسارت کامل (Complete): در این حالت خرابی، سازه یا خراب شده و یا در آستانه خرابی است.

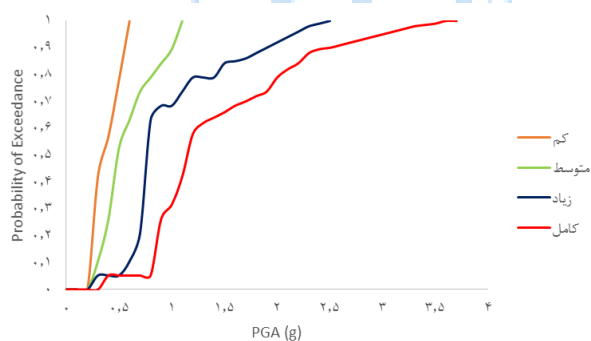
در ادامه، به منظور بررسی بهتر رفتار پل و احتمال خرابی، مقادیر پاسخ سازه در همه زلزله‌ها ارزیابی شده و منحنی شکنندگی که حاصل میانگین پاسخ همه زلزله‌ها در حالت‌های خرابی کم، متوسط، زیاد و کامل می‌باشد در شکل‌های ۱۵ الی ۱۸ ترسیم شده است.



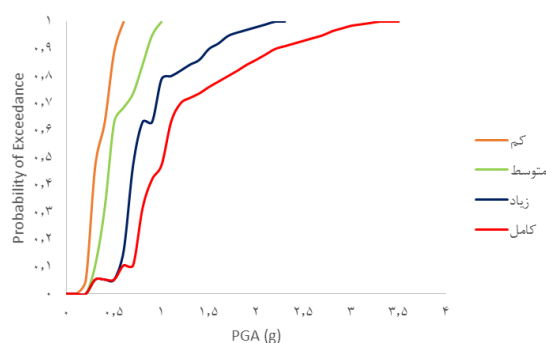
شکل ۱۵: منحنی شکنندگی ستون پل در حالت بدون برخورد.



شکل ۱۶: منحنی شکنندگی ستون پل در سرعت ۸۰ کیلومتر بر ساعت.



شکل ۱۷: منحنی شکنندگی ستون پل در سرعت ۱۰۰ کیلومتر بر ساعت.



شکل ۱۸: منحنی شکنندگی ستون پل در سرعت ۱۲۰ کیلومتر بر ساعت.

همانطور که در شکل‌ها مشاهده گردید خرابی در حالت حدی متوسط در سرعت‌های ۸۰، ۱۰۰ و ۱۲۰ کیلومتر بر ساعت به ترتیب در بیشینه شتاب‌های ۱/۳، ۱/۱ و ۱ حادث گردیده است و در مقایسه با حالت بدون اثر ضربه می‌توان نتیجه گرفت اثر ضربه در سرعت تخریب بیشتر تأثیر داشته است. در حالت عملکردی زیاد و مقایسه نتایج شکل‌ها در دو حالت بدون برخورد خودرو و برخورد خودرو در سرعت‌های ۸۰، ۱۰۰ و ۱۲۰ کیلومتر بر ساعت که خرابی پل در این سطح عملکرد متناسب با سرعت‌های مذکور به ترتیب در بیشینه شتاب‌های ۲/۶، ۲/۵ و ۲/۳ اتفاق افتاده است که به نحوی بیانگر تأثیر اثر ضربه ناشی از افزایش سرعت خودرو به پل می‌باشد و همچنین با بررسی دقیق می‌توان نتیجه گرفت، اثر ضربه در دو سرعت ۱۰۰ و ۱۲۰ کیلومتر بر ساعت در روند تخریب تأثیر بیشتری داشته است. در مقایسه با روند میزان درصد عبوری از سطح عملکردی کامل در سرعت‌های ۸۰، ۱۰۰ و ۱۲۰ کیلومتر بر ساعت با یکدیگر، مشاهده می‌شود مقدار بیشینه شتاب ثبت شده در این سه سرعت به ترتیب برابر با ۳/۷، ۳/۸ و ۳/۵ PGA است. در حالی که مقدار PGA ثبت شده در حالت خرابی کامل برای این سطح عملکردی در حالت بدون ضربه خودرو برابر ۴.۱ است که این موضوع نشان می‌دهد که اثر ضربه وارده به پل در افزایش سرعت تخریب پل تأثیر داشته است. همان‌طور که پیش‌از این بیان شده است، منحنی‌های شکنندگی احتمال فراگذشت را از سطوح مختلف عملکرد ارائه می‌دهند. همان‌طور که از شکل ۱۵ تا ۱۸ نشان داده شده است، اعمال نیروی ضربه ناشی از برخورد با سرعت‌های بالا باعث می‌شود تا احتمال فراگذشت افزایش یابد. به‌عنوان مثال احتمال فراگذشت از سطح آسیب کامل در حالت‌های بدون برخورد، با برخورد با سرعت‌های ۸۰، ۱۰۰ و ۱۲۰ در بیشینه شتاب ۱g به ترتیب برابر با ۵، ۱۰، ۲۵ و ۳۵٪ محاسبه شده است. این مقادیر در سطح متوسط و در بیشینه شتاب ۰.۵g به ترتیب برابر با ۳۰، ۴۲، ۵۱ و ۶۵٪ محاسبه شده است.

۱۰- نتیجه گیری

باتوجه به رفتار پیچیده پلها در اثر زلزله در این پژوهش با مدل‌سازی پل بزرگراهی، مقادیر سرعت‌های مختلف به‌عنوان متغیر در نظر گرفته شده است و با انجام تحلیل دینامیکی غیرخطی افزایشی و رسم منحنی‌های شکنندگی به بررسی احتمال خرابی پل بتنی پرداخته شده است. باتوجه به منحنی‌های شکنندگی ارائه شده برای حالت‌های مختلف در نظر گرفته شده می‌توان به نتایج زیر اشاره کرد.

- ۱- در سطح عملکردی کم مطابق با مقایسه شکل‌ها در دو حالت ستون تحت اثر ضربه با اعمال شتاب زلزله و حالت بدون ضربه می‌توان نتیجه گرفت که در سه سرعت ۸۰، ۱۰۰ و ۱۲۰ کیلومتر بر ساعت احتمال خرابی و درصد عبوری از سطح عملکردی کم نسبت به حالت بدون ضربه افزایش کمی داشته است و اثر ضربه اولیه قبل از اعمال شتاب‌نگاشت‌های زلزله در روند سرعت بخشیدن به عبور از این سطح تأثیر کمی داشته است و همچنین با افزایش سرعت برخورد میزان درصد عبوری متناسب با افزایش PGA به صورت صعودی در حال تغییر است.

۲- همان طور که در شکل‌ها مشاهده گردید خرابی در حالت حدی متوسط در سرعت‌های ۸۰، ۱۰۰ و ۱۲۰ کیلومتر بر ساعت به ترتیب در بیشینه شتاب‌های ۱/۳، ۱/۱ و ۱ حادث گردیده است و در مقایسه با حالت بدون اثر ضربه می‌توان نتیجه گرفت اثر ضربه در سرعت تخریب بیشتر تاثیر داشته است. همچنین با بررسی دقیق تر می‌توان دریافت اثر ضربه در سرعت‌های ۱۰۰ و ۱۲۰ کیلومتر بر ساعت در تشدید خرابی در PGA برابر با ۰/۶ الی ۱ به صورت چشمگیری افزایش داشته است.

۳- در حالت عملکردی زیاد و مقایسه نتایج شکل‌ها در دو حالت بدون برخورد خودرو و برخورد خودرو در سرعت‌های ۸۰، ۱۰۰ و ۱۲۰ کیلومتر بر ساعت که خرابی پل در این سطح عملکرد متناسب با سرعت‌های مذکور به ترتیب در بیشینه شتاب‌های ۲/۶، ۲/۵ و ۲/۳ اتفاق افتاده است که به نحوی بیانگر تاثیر اثر ضربه ناشی از افزایش سرعت خودرو به پل می‌باشد و همچنین با بررسی دقیق می‌توان نتیجه گرفت، اثر ضربه در دو سرعت ۱۰۰ و ۱۲۰ کیلومتر بر ساعت در روند تخریب تاثیر بیشتری داشته است. به عنوان مثال در بیشینه شتاب برابر با ۱/۵، درصد عبوری در حالت بدون ضربه و سرعت ۸۰ کیلومتر بر ساعت برابر با ۰/۷۹ درصد می‌باشد، در صورتیکه این موضوع در سرعت ۱۰۰ کیلومتر بر ساعت برابر ۰/۸۴ درصد است و در سرعت ۱۲۰ کیلومتر بر ساعت برابر ۰/۹۵ درصد می‌باشد.

۴- در مقایسه با روند میزان درصد عبوری از سطح عملکردی کامل در سرعت‌های ۸۰، ۱۰۰ و ۱۲۰ کیلومتر بر ساعت با یکدیگر، مشاهده می‌شود مقدار بیشینه شتاب ثبت شده در این سه سرعت به ترتیب برابر با ۳/۷، ۳/۸ و ۳/۵ PGA می‌باشد. در حالیکه مقدار PGA ثبت شده در حالت خرابی کامل برای این سطح عملکردی در حالت بدون ضربه خودرو برابر ۴/۱ می‌باشد که این موضوع نشان می‌دهد که اثر ضربه وارده به پل در افزایش سرعت تخریب پل تاثیر داشته است و همچنین می‌توان با بررسی دقیق تر اطلاعات داده شده دریافت که در هر سه سرعت افزایش قابل توجهی در روند سرعت تخریب از PGA برابر ۱/۱ به بعد وجود دارد.

۵- باتوجه به بررسی به عمل آمده از چهار حالت عملکردی کم، متوسط، زیاد و کامل تحت اثر برخورد خودرو و عامل شتاب زلزله پس از برخورد در سرعت‌های متغیر با یکدیگر و همچنین بررسی مجدد آنها با حالت بدون برخورد خودرو می‌توان نتیجه گرفت در تمامی حالت‌های سطوح عملکردی اثر برخورد خودرو باعث افزایش سرعت تخریب در سازه پل می‌شود و این روند در سرعت‌های ۱۰۰ و ۱۲۰ کیلومتر بر ساعت از PGA مشخصی با شدت بیشتری افزایش داشته است.

۶- بررسی منحنی‌های شکنندگی و احتمال فراگذشت نشان می‌دهد که اعمال نیروی ضربه ناشی از برخورد با سرعت‌های بالا باعث می‌شود تا احتمال فراگذشت افزایش یابد. به عنوان مثال احتمال فراگذشت از سطح آسیب کامل در حالت‌های بدون برخورد، با برخورد با سرعت‌های ۸۰، ۱۰۰ و ۱۲۰ در بیشینه شتاب ۱ g به ترتیب برابر با ۵، ۱۰، ۲۵ و ۵۰٪ محاسبه شده است. این مقادیر در سطح متوسط و در بیشینه شتاب ۰.۵ g به ترتیب برابر با ۳۰، ۴۲، ۵۱ و ۶۵٪ محاسبه شده است. همچنین نتایج نشان می‌دهد احتمال فراگذشت ۵۰٪ از سطح کامل در حالت‌های بدون برخورد، برخورد با سرعت‌های ۸۰، ۱۰۰ و ۱۲۰ در بیشینه شتاب‌های ۰.۶، ۱.۵، ۱.۲ و ۱ برابر شتاب ثقل رخ داده است.

مراجع

- [1] Shayanfar, M., Abaslo, A., Pahlavan, H., Barkhurdari, M. (2018). " Probabilistic evaluation of the vulnerability of transportation network infrastructures with emphasis on direct and arched reinforced concrete box deck bridges under multiple excitations" *Transportation Engineering Quarterly*, 1(46), Issue 12
- [2] Buth CE, Williams WF, Brackin MS, Lord D, Geedipally SR, Abu-Odeh AY. (2010) "*Analysis of large truck collisions with bridge piers: phase 1*". Report of guidelines for designing bridge piers and abutments for vehicle collisions. Rep FHWA/TX-10/9- 4973-1. College Station, TX: Texas Transportation Inst.

- [3] R.W. Li , D.S. Cao , H. Wu, D.F. Wang (2021) " Collapse analysis and damage evaluation of typical simply supported double-pier RC bridge under truck collision " *Structures* 33 . 3222–3238.
- [4] R.W. Li, H. Wu, Q.T. Yang, D.F. Wang. (2020) " Vehicular impact resistance of seismic designed RC bridge piers" *Engineering Structures* 220, 111015.
- [5] H. Sharma, S. Hurlebaus, P. Gardoni, (2012). Performance-based response evaluation of reinforced concrete columns subject to vehicle impact. *International Journal of Impact Engineering* 43, 52-62.
- [6] S. Pourebrahim Abadi, B. Talaeitaba(2022), Seismic Assessment of Three Generations of Isfahan Bridges Using Fragility Curves, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 53(12) 5457-5482.
- [7] Bruce A. Bolt., (2004). "Seismic input motions for nonlinear structural analysis", *Journal of Earthquake Technology*, Paper No.448,.
- [8] Nielson, B., and DesRoches, R. (2007). Seismic Fragility Methodology for Highway Bridges Using a Component Level Approach. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 36 (6), 823-839.
- [9] Padgett, J. E., and DesRoches, R. (2008). Methodology for the Development of Fragility Curves for Retrofitted Bridges. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 37 (8), 1157-1174.
- [10] Roblee, C., Sahs, S., Mahan, M., Yashinsky, M., Setberg, H. and Maintenance, C.(2011). *Caltrans-Aligned Limit States Discussion*. (J. Dukes, K. Ramanathan, R. DesRoches, & J. Padgett, Interviewers).
- [11] Shiravand, M., Mahbobi, S., Omidian, P., (2017) " Study on seismic behaviour of integral concrete bridges with different skew angles through fragility curves" *Journal of Structural Engineering*. ASCE, 4(4), 155-174.
- [12] Steven Auyeung, Alice Alipour, Dikshant Saini, (2019) " Performance-based design of bridge piers under vehicle collision " *Engineering Structures* 191, 752–765.
- [13] Tavakoli, H. and M. Moradi(2021), Sensitivity Analysis of Response of a Cable Bridge with Base Isolation to Material Variation under Near Earthquake *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 52(12): p. 3145-3160.
- [14] Ghanbari, F., Naseri, A., Pahlavan, H., (2018) " Evaluating the seismic behavior of a vertical arch bridge and examining the fragility curve and comparing it with a multi-span bridge in northern Iran " *Journal of Structural Engineering*. ASCE, 178-198.
- [15] Kang Hyungoo, Kim Jinkoo. (2017). " Response of a steel column-footing connection subjected to vehicle impact " *Structural Engineering and Mechanics*, Vol. 63, No 1, 125-136.
- [16] Agrawal AK, Xu X, Chen Z. (2011) "*Bridge vehicle impact assessment*". New York State Department of Transportation, University Transportation Research Center;
- [17] Shome, N., Cornel, CA. (1999) . "*Probabilistic seismic demand analysis of nonlinear structures*" . Ph.D. dissertation, Stanford University.
- [18] Pacific Earthquake Engineering Research center (PEER) online strong motion database, <http://peer.berkeley.edu/smcat/search.html>.
- [19] Omidian, P. Safari H., (2019). " Seismic vulnerability of continuous concrete bridges on different types of soil using fragility curves" *Journal of Structural Engineering*. ASCE, 6(3), 175-192.
- [20] Goodarzi, M.J., et al., *Fragility assessment of an outrigger structure system based on energy method*. The Structural Design of Tall and Special Buildings: p. e2017
- [21] Moradi, M. and M. Abdolmohammadi, *Seismic fragility evaluation of a diagrid structure based on energy method*. Journal of Constructional Steel Research, 2020. 174: p. 106311.

- [22] Vamvatsikos, D., Cornell, C. A. (۲۰۰۵), "Direct estimation of seismic demand and capacity of multidegree-of-freedom systems through incremental dynamic analysis of single degree of freedom approximation", *Journal of Structural Engineering*, No. 42, pp. 589-599.
- [23] M.R. Shiravand, M. Vasef, (2021) "Effect of Structural Parameters on Failure Probability of Piers in Seismic Isolated Concrete Bridges", *Amirkabir J. Civil Eng.*, 53(7) 2995-3016.
- [24] HAZUS-MH MR5, Multi-Hazard loss Estimation Methodology: Earthquake Model. (2003), Department of Homeland security, FEMA, Washington, D.C.
- [25] Mander, J.B., Priestley, M.J.N., and Park R. (1984). "Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete". *Journal of Structural Engineering. ASCE*, 114(3), 1804-1826.
- [26] O.-S. Kwon, A.S. Elnashai, (2010) " Fragility analysis of a highway over-crossing bridge with consideration of soil–structure interactions", *Structure and Infrastructure Engineering*, 2-1(6).178-159.
- [27] Banerjee, S.,and Shinozuka, M. (2007). "Nonlinear Static Procedure for Seismic Vulnerability Assessment of Bridges". *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 22, 293-305.
- [28] Kim, S. H., and Shinozuka, M. (2004). "Development of fragility curves of bridges retrofitted by column jacketing", *Probabilistic Engineering Mechanics*, 19, 105-112.
- [29] Balou, M., Pahlavan, H., Naseri, A., Rafiee, F., (2021). " Seismic fragility analysis of multi-frame RC curved bridges with base isolation ". *Journal of Structural Engineering. ASCE*, 8(12), 208-224.
- [30] Caltrans.(2012). "*Feasibility Studies for Improving Caltrans Bridge Fragility Relationships Final Report California Department of Transportation*", Report No. CA12-1775.
- [31] Kor, A., Tavakoli, H., Rahimi, H., Hoseinzadeh, M.,(2024) " Seismic Response Probabilistic Evaluation of Bridge Pier After Vehicle Collision", *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*.
- [32] A. Dutta, J.B. Mander,(1999) " *Seismic fragility analysis of highway bridges*", Center-to-Center Project Workshop on Earthquake Engineering in Transportation Systems.