

## ارزیابی لرزه‌ای پل‌های قوسی بتنی غیر مسلح راه‌آهن براساس مشخصات هندسی و مکانیکی آنها

عادل محمودی معظم<sup>۱</sup>، نعمت حسنی<sup>۲</sup>، مهدی یزدانی<sup>۳\*</sup>

۱- دانشجوی دکتری مهندسی زلزله، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

۳- استادیار، دانشکده مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران

### چکیده

پل‌های قوسی بنایی به تعداد زیادی در شبکه خطوط راه‌آهن کشور موجود هستند که عمر بیشتر آنها بیش از هفتاد سال است. این سازه‌ها اگرچه تحت اثر بارهای سرویس (قائم) عملکرد خوبی را از خود نشان داده‌اند، اما برای بارهای زلزله (جانبی) طراحی نشده‌اند، بنابراین ارزیابی لرزه‌ای این سازه‌ها برای بدست آوردن سطوح خرابی و سطوح عملکرد آنها امری ضروری به نظر می‌رسد تا در صورت نیاز این سازه‌ها تقویت، و یا از رده خارج شوند. با توجه به رفتار پیچیده این سازه‌ها، نیاز به آزمایش‌های میدانی جهت ارزیابی رفتار آنها امری ضروری است. به علت تعدد این پل‌ها در شبکه راه‌آهن امکان انجام آزمایش‌های میدانی بر روی همه آنها وجود ندارد، بنابراین جهت بررسی و مطالعه رفتار این پل‌ها نیاز به شبیه‌سازی دقیق آنها می‌باشد. برای اینکه بتوان رفتار این پل‌ها را بهم مربوط کرد؛ پارامترهای زیادی از جمله: تعداد دهانه، طول دهانه، مشخصات هندسی قوس، ارتفاع پایه و مشخصات مکانیکی مصالح وجود دارد. در مطالعه حاضر با استفاده از نتایج میدانی انجام گرفته شده بر روی پل‌های قوسی بتنی غیرمسلح، از روش اجزا محدود جهت تحلیل سه بعدی ۳۲ مدل عددی به‌هنگام شده که دارای مشخصات هندسی و فیزیکی متفاوتی هستند، استفاده شده است. در ادامه با استفاده از تحلیل استاتیکی غیرخطی و طیف‌های پیشنهاد شده در آیین‌نامه طرح پل‌های راه و راه‌آهن (نشریه ۴۶۳)، منحنی‌های تقاضا و ظرفیت مدل‌ها با یکدیگر مقایسه شده است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که؛ اگرچه رفتار طولی این سازه‌ها نسبت به جهت عرضی آنها تحت اثر زلزله‌های نسبتاً شدید عملکرد بهتری دارد، اما به طور کلی عملکرد لرزه‌ای این سازه‌ها مناسب نبوده و مقاوم‌سازی آنها جهت بهبود عملکردشان ضروری است.

کلمات کلیدی: پل‌های قوسی بتنی غیرمسلح، شبیه‌سازی سه بعدی اجزا محدود، تحلیل استاتیکی غیرخطی، بررسی پارامترهای هندسی، ارزیابی لرزه‌ای.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	10.22065/jsce.2017.77523.1047	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	http://dx.doi.org/10.22065/jsce.2017.77523.1047	۱۳۹۷/۰۵/۳۰	۱۳۹۶/۰۵/۰۶	۱۳۹۶/۰۵/۰۶	۱۳۹۶/۰۴/۱۹	۱۳۹۵/۱۱/۲۲
			مهدی یزدانی*		*نویسنده مسئول:	
			m-yazdani@araku.ac.ir		پست الکترونیکی:	

## Seismic assessment of plain concrete arch bridges by three dimensional simulation using geometrical and mechanical properties

Adel Mahmoudi Moazam<sup>1</sup>, Nemat Hassani<sup>2</sup>, Mahdi Yazdani<sup>3\*</sup>

1- PhD candidate in Earthquake Engineering, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology, Tehran, Iran

2- Associate professor, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

3- Assistant professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Arak University, Arak, Iran

### ABSTRACT

*There are numerous old arch bridges in Iran that have been used as railway bridges for more than seventy years. Since most of these bridges are not designed for earthquake excitation, seismic vulnerability of these structures is uncertain. This fact necessitates the investigation of the earthquake resistance of these kinds of bridges. To evaluate complex behavior of these bridges, results of field tests are required. Since it is not possible to perform field tests for all arch bridges, these structures should be simulated correctly by computers for structural assessment. Several parameters are employed to describe the bridges, such as number of spans, length, geometrical and material properties. In this study, results of field tests are used and adapted for 32 three dimensional finite element models with various physical parameters. Modal deformations of bridges at longitudinal and transverse directions is perceived from nonlinear computer simulations. Furthermore, Seismic performance of these bridges is assessed by pushover analysis in two directions and the capacity curves of the structures and linear demand spectrum are obtained using nonlinear static analysis method suggested by the Iranian standard. The crown is selected as a control node in the pushover analysis and its influence on seismic performance of plain concrete arch bridges is considered. Finally, the demand levels of the bridges based on 475 return period earthquakes are determined and compared with capacity curves. The results show that the performance of longitudinal direction is better than transverse direction, but the earthquake resistance of these kinds of bridges totally depends on the material properties and geometry of the structures.*

### ARTICLE INFO

Received: 10/02/2017

Revised: 10/07/2017

Accepted: 28/07/2017

### Keywords:

Plain concrete arch bridge

3D FE modeling

Nonlinear static analysis

Geometrical parameters

Seismic assessment

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/jsce.2017.77523.1047

\*Corresponding author: Mehdi Yazdani.

Email address: m-yazdani@araku.ac.ir

## ۱- مقدمه

ارزیابی رفتار پل‌های قوسی بنایی از مباحث مورد توجه مهندسان و محققان از گذشته تا به امروز بوده است. در این ارزیابی، نیاز به مدل‌سازی دقیق رفتار سازه می‌باشد، اما پیچیدگی موجود در رفتار اینگونه سازه‌ها منجر به انجام آزمایش‌های میدانی گردیده است، تا با استفاده از این آزمایش‌ها یک مدل‌سازی مناسب ایجاد گردد و رفتار دقیق این سازه‌ها بر اهمیت مورد ارزیابی قرار گیرد. مطالعه رفتار پل‌های قوسی با مصالح بنایی سابقه دیرینه در نقاط مختلف جهان دارد. از اولین محققین در این زمینه می‌توان به پیپارد و همین اشاره کرد. نتیجه نظریه‌ی پیپارد روش معروف نیمه تجربی مکزه و نتیجه نظریه‌ی همین، روش مکانیزم بوده است. اولین کاربرد تحلیل قوس‌ها با مصالح بنایی با استفاده از روش اجزاء محدود توسط تولر انجام شد. تولر مطالعات خود را با نتایج آزمایشگاهی مقایسه کرد. در مدل او هیچ عملکرد تماسی بین قوس و مصالح پرکننده در نظر گرفته نشد، بنابراین کریسفیلد نشان داد با این شرایط روش اجزاء محدود منجر به بار گسیختگی کمتری نسبت به روش مکانیزم می‌شود، و برای رفع این مشکل، فترهایی با رفتار غیرخطی برای شبیه‌سازی مقاومت جانبی مصالح پرکننده در نظر گرفت. مطالعات تولر بر اساس المان تیر مستقیم بود، راف کار تولر را ادامه داد و از المان‌های تیر خمیده استفاده کرد، چون نیز در ادامه کار تولر از المان‌های تیر مخروطی استفاده کرد [۱]. پیچ از جمله محققینی است که آزمایش‌های فراوانی را بر روی اینگونه پل‌ها انجام داده است. مطالعات وی بر روی پل‌های قوسی سنگی جهت محاسبه بار سرویس و بار تخریب در حالت استاتیکی بوده است و به نتایج مهمی از جمله اینکه رفتار این پل‌ها خطی و تحت بارهای قائم رفتار آنها به صورت دو بعدی است، رسیده است [۱]. فانینگ و بوسبی آزمایش‌های میدانی زیادی روی پل‌های بنایی انجام داده‌اند و مدل‌های اجزاء محدود خود را با آنها مقایسه کرده‌اند. آنها با ارائه یک مدل سه بعدی، پیشنهاداتی را در نحوه مدل‌سازی ارائه کرده‌اند. آنها معتقد هستند که شکل و مقطع قوس و همچنین دیوارهای پیشانی به عنوان عناصر سازه‌ای پل، تاثیر مهمی در رفتار این سازه‌ها دارند [۲-۳]. ملبورن و همکارانش سه پل چند دهانه را مورد آزمایش قرار داده‌اند و اثرات تعداد دهانه بر مقاومت نهایی پل‌های قوسی آجری را بدست آوردند. اگرچه آزمایش آنها بر روی اثرات دیوار جانبی متمرکز نشده بود، اما در یکی از پل‌ها که دارای دیوار جانبی منفصل بود، ۳۰٪ مقاومت کمتری را از خود نشان داد [۴]. ملبورن و همکارانش همچنین در یک مطالعه دیگر تاثیرات دیوار جانبی را بر روی مقاومت نهایی پل بررسی کرده‌اند و متوجه شدند که دیوارهای جانبی ۷۰٪ مقاومت نهایی پل را افزایش می‌دهند [۵]. رویلز و هنری مطالعات خود را بر روی ۲۴ پل قوسی متمرکز کرده بودند و اثرات پرکننده و دیوار جانبی را روی پل‌ها بررسی کرده‌اند و به این نتیجه رسیدند که پرکننده‌ها و دیوارهای جانبی بسته به مشخصات هندسی پل، مقاومت پل را ۲ تا ۱۲ برابر افزایش می‌دهد. آنها همچنین در بررسی‌های خود به این نتیجه رسیدند که رفتار این سازه‌ها سه بعدی می‌باشد [۶]. ارتگا و موریر نیز با مطالعه بر روی شش پل قوسی با تعداد دهانه‌های مختلف، اثر هندسه را بر ظرفیت پل‌های قوسی بنایی مورد مطالعه قرار داده‌اند [۷]. در ادامه تحقیقات وسیعی در مورد تحلیل‌های دوبعدی، سه بعدی در حالت خطی و غیرخطی بر روی این سازه‌ها صورت گرفته است که می‌توان به مراجع [۸-۱۳] اشاره کرد.

علی‌رغم تحقیقات گسترده در زمینه تخمین بار خرابی در این پل‌ها، تحقیقات محدودی در زمینه رفتار لرزه‌ای آنها صورت گرفته است. برای تحلیل لرزه‌ای سازه‌ها روش‌های متنوعی وجود دارد که عبارتند از تحلیل استاتیکی خطی، تحلیل دینامیکی خطی، تحلیل استاتیکی غیرخطی و تحلیل دینامیکی غیرخطی. با توجه به اینکه اکثر سازه‌ها تحت بارهای زلزله وارد مرحله غیرخطی و پلاستیک می‌شوند، روش استاتیکی خطی نمی‌تواند نیازهای تحلیل را برآورده کند. البته در روش دینامیکی خطی با توجه به اینکه بارگذاری به صورت دینامیکی اعمال می‌شود، رفتار به صورت دقیق‌تری بررسی می‌شود. روش دینامیکی غیرخطی به عنوان کامل‌ترین و دقیق‌ترین روش تحلیل لرزه‌ای سازه‌ها شناخته شده است اما به علت داشتن هزینه‌های محاسباتی بالا، استفاده از آن متعارف نمی‌باشد. با توجه به کاستی‌های موجود در روش استاتیکی خطی و توسعه نرم افزارهای غیرخطی در دهه گذشته از یک طرف و مطرح شدن بحث مهندسی بر پایه عملکرد از طرف دیگر، در سال‌های اخیر تلاش‌های زیادی در خصوص روش‌های طراحی و ارزیابی سازه‌ها بر پایه جابجایی و استفاده مستقیم از تحلیل غیرخطی جهت ارزیابی عملکرد سازه‌ها در برابر سطوح مختلف زلزله صورت گرفته است. همچنین جهت لحاظ نمودن مسائل اقتصادی و در راستای استفاده بهینه از خاصیت جذب و استهلاک انرژی در محدوده پلاستیک، به اعضا اجازه داده می‌شود در زلزله‌های شدید وارد مرحله غیرخطی شده و با تغییر شکل‌های پلاستیک در چرخه‌های رفت و برگشتی زلزله به جذب استهلاک و انرژی بپردازند. بنابراین رفتار سازه در برابر زلزله

غیرالاستیک و غیرخطی می باشد و در پارامترهای طراحی علاوه بر مقاومت و سختی، پارامتر شکل پذیری نیز از اهمیت به سزایی برخوردار است، برای این منظور برای تحلیل سازه‌ها در برابر زلزله باید از روش‌های غیرخطی استفاده کرد که در آن روش‌های ساده‌تری برای تخمین پاسخ لرزه‌ای غیرالاستیک بوجود آمده‌اند که به روش‌های تحلیل پوش‌اور شهرت یافته‌اند. در این روش دقت پایین روش تحلیل خطی استاتیکی، تا حد زیادی برطرف شده است. همچنین در این روش مشکلات مربوط به تحلیل دینامیکی غیرخطی را دارا نبوده و با انجام آن می‌توان با استفاده از طیف پاسخ به عنوان منحنی تقاضا، تخمین مناسبی از پاسخ لرزه‌ای سازه را بدست آورد. به همین دلیل تحلیل پوش‌اور در دو دهه اخیر به یک روش مناسب برای ارزیابی لرزه‌ای سازه‌ها تبدیل گشته است. از آنجایی که ارزیابی لرزه‌ای پل‌های قوسی بنایی برخلاف دیگر سازه‌های عمرانی همچنان یک مسئله ناشناخته برای محققین است، تحقیقات محدودی در این ارتباط وجود دارد، که در میان آنها می‌توان به تحقیقات پیلا و همکارانش [۱۴ و ۱۵] و مطالعات معرفت و یزدانی [۱۶ و ۱۷] اشاره کرد. پیلا و همکارانش در تحقیقات خود دو پل را مورد آزمایش قرار دادند و با استفاده از یک مدل اجزاء محدود سه‌بعدی و تحلیل استاتیکی غیرخطی و تحلیل دینامیکی غیرخطی، سطوح عملکرد و ظرفیت سازه را بدست آوردند و نتایج دو روش استاتیکی و دینامیکی را یکدیگر مقایسه نموده‌اند. آنها در تحلیل پوش‌اور با اعمال بارگذاری افقی در سه نقطه نتایج را با هم مقایسه کردند و در انتها به این نتیجه رسیدند که پاسخ در نقطه مرکز جرم پل بحرانی‌تر است. آنها در مدل‌سازی عددی خود ابتدا با استفاده از آزمایش‌های میدانی فرکانس مود اول و مشخصات مکانیکی مصالح را بدست آورده‌اند و نتایج حاصل را در مدل عددی استفاده نموده‌اند و با در نظر گرفتن فرض‌های مختلفی پل‌ها را مورد ارزیابی لرزه‌ای قرار داده‌اند. همچنین نتایج آنها نشان می‌دهد که ضریب امنیت سازه بسته به لرزه‌خیزی منطقه در محدوده‌ای بین ۱/۲ تا ۴/۲ قرار دارد [۱۴]. پیلا و همکارانش در ادامه تحقیقات خود با انتخاب ۲۸ رکورد زلزله در سرتاسر جهان و با دسته بندی آنها ۸۹ تحلیل دینامیکی غیرخطی را بر روی همان دو پل قوسی انجام داده‌اند و نتایج آن را با تحلیل پوش‌اور مقایسه نموده‌اند. نتایج آنها حاکی از آن است که تحلیل پوش‌اور در محاسبه ضریب امنیت پل‌های قوسی بنایی اغراق آمیز تر از تحلیل دینامیکی غیرخطی است [۱۵]. یزدانی و معرفت نیز مطالعات محدودی بر روی عملکرد لرزه‌ای دو پل قوسی بتنی غیرمسلح انجام داده‌اند. برخلاف پیلا و همکارانش که از مدل سه بعدی اجزا محدود استفاده نموده‌اند، یزدانی و معرفت از مدل‌های اجزا محدود دوطبقه استفاده نموده‌اند. به منظور ارزیابی پل‌های قوسی با روش پوش‌اور، تقاضا بر اساس سه سطح زلزله توسط یزدانی و معرفت در نظر گرفته شده است، سطح خطر اول مربوط به زلزله‌هایی با احتمال وقوع ۲٪ با دوره بازگشت ۲۴۷۵ سال، سطح خطر دوم مربوط به زلزله‌هایی با احتمال وقوع ۱۰٪ با دوره بازگشت ۴۷۵ سال، سطح خطر سوم مربوط به زلزله‌هایی با احتمال وقوع ۱۵٪ با دوره بازگشت ۱۰۰ سال است. نتایج آنها نشان می‌دهد که ضریب امنیت این پل‌ها در محدوده ۱ تا ۵ است [۱۶ و ۱۷]. تحقیقات دیگری که در مورد رفتار لرزه‌ای پل‌های قوسی بنایی انجام شده است مربوط به تحقیقات بایراکتار و همکارانش می‌باشد [۲۰-۱۸]. آنها ابتدا در تحقیقات خود با استفاده از آزمایش میدانی عبور عابر بر روی سه پل قوسی سنگی مشخصات دینامیکی پل‌های قوسی سنگی را که شامل فرکانس مود اول و درصد میرایی است را محاسبه نموده‌اند. آنها درصد میرایی را برای این پل‌ها در حدود ۳ درصد توصیه کرده‌اند و برای محاسبه فرکانس مود اول رابطه  $f = 16.824 - 3.935 \ln(l)$  را پیشنهاد کرده‌اند (در این رابطه  $l$  طول بزرگترین دهانه پل برحسب متر و  $f$  فرکانس مود اول برحسب هرتز است) [۱۸]. آنها در ادامه با انجام تحلیل دینامیکی خطی و غیرخطی تحت زلزله اریزینکان که در سال ۱۹۹۲ در کشور ترکیه رخ داده است، این سه پل قوسی سنگی را تحلیل نموده‌اند و نشان دادند که جابه‌جایی حاصل از تحلیل غیرخطی مقادیر بیشتری را محاسبه می‌نماید و تنش ایجاد شده در پل نیز کمتر است [۱۹]. در نهایت آنها در یک مقاله دیگر به این نتیجه رسیدند که رفتار این سه پل تحت اثر زلزله‌های حوزه نزدیک مناسب است [۲۰].

گینترک و همکارانش به مطالعات بسیار جامعی بر روی یک پل قوسی سنگی یک دهانه پرداخته‌اند. آنها با استفاده از روش اجزا محدود و روش حالت حدی بار خرابی این پل را محاسبه نموده‌اند. مدل عددی آنها بسیار جامع می‌باشد. آنها در مدل عددی خود با استفاده از تحلیل سه بعدی، در نظر گرفتن اثر اندرکنش قوس و پرکننده، استفاده از المان‌های تماسی بین سنگ و پیشنهاد ضریب اصطکاک ۰/۵۵ بین اجزای سنگ، مدل عددی خود را تهیه نموده‌اند. در ادامه با استفاده از تحلیل دینامیکی مود اول پل را در جهت عرضی محاسبه نموده‌اند و با انجام تحلیل طیفی حاصل از زلزله‌های اصلی ترکیه، پل را مورد ارزیابی قرار داده‌اند. آنها نشان دادند که برخلاف تحلیل‌های استاتیکی، در تحلیل‌های دینامیکی مکانیزم خرابی این پل‌ها متفاوت است [۲۱]. احمدوند و همکاران نیز با استفاده از روش المان مجزا به مطالعه پل‌های قوسی سنگی تک دهانه پرداخته‌اند و روش مقاوم‌سازی پیش‌تنیدگی را جهت بهبود رفتار این سازه‌ها ارائه نموده‌اند [۲۲]. زامپری و همکارانش

با دسته بندی پل‌های قوسی سنگی براساس هندسه‌شان، تحلیل پوش‌آور را در جهت طولی و عرضی بر روی این سازه‌ها انجام داده‌اند. آنها با وارد کردن شتاب به‌صورت جانبی، منحنی ظرفیت این پل‌ها را محاسبه کرده‌اند. نتایج بدست آمده از تحقیقات آنها حاکی از آن است که با افزایش نسبت ارتفاع به عرض پایه پل، جابه‌جایی پل بیشتر می‌شود [۲۳].

پل‌های قوسی بنایی به تعداد زیادی در شبکه راه‌آهن کشور موجود هستند که قدمت اکثر آنها بیش از هفتاد سال است. از طرف دیگر با توجه به عدم وجود آیین‌نامه‌های لرزه‌ای در آن زمان، در سال‌های اخیر ارزیابی رفتار لرزه‌ای این پل‌ها بسیار ضروری به نظر می‌رسد. پل‌های قوسی بنایی را بسته به نوع مصالح‌شان، می‌توان به سه دسته تقسیم‌بندی نمود: پل‌های قوسی آجری، پل‌های قوسی سنگی و پل‌های قوسی بتنی غیرمسلح. در زمینه پل‌های قوسی آجری و سنگی، با توجه به تعدد این پل‌ها در کشورهای اروپایی، تحقیقات بیشتری بر روی آنها انجام شده است، که البته بیشتر آنها به‌صورت استاتیکی و تحت اثر بارهای سرویس بوده است. در مورد پل‌های قوسی بتنی غیرمسلح با توجه به تعداد انگشت‌شمار آزمایش‌های میدانی، در این زمینه تحقیقات محدودتری انجام شده است که از میان آنها می‌توان به آزمایش معرفت و همکارانش در سال ۲۰۰۰ [۲۴ و ۲۵] و عطایی و همکارانش در سال ۲۰۱۶ اشاره کرد [۲۶].

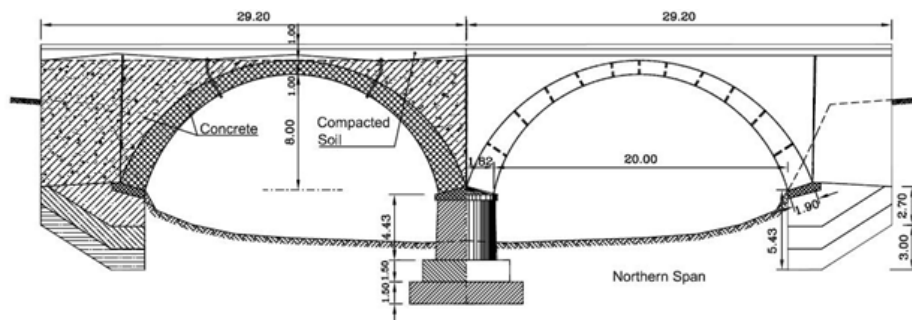
در مطالعه حاضر، با توجه به اهمیت بررسی رفتار لرزه‌ای پل‌های قوسی بنایی، با استفاده از شبیه‌سازی سه بعدی و روش اجزا محدود به بررسی رفتار این سازه‌ها پرداخته شده است. برای این منظور با توجه به نتایج آزمایشگاهی صورت گرفته بر روی پل‌های قوسی بتنی غیرمسلح، در گام نخست مدل اجزا محدود به‌هنگام شده‌ای تهیه گردیده است. با توجه به نظر اکثر محققین، چهار عامل تعداد دهانه، طول دهانه، هندسه پل (قوس و پایه) و مشخصات مصالح، عوامل تاثیرگذار در پاسخ پل‌های قوسی بنایی هستند، برای این منظور در گام دوم با تهیه ۳۲ مدل عددی به اثر طول دهانه، اثر تعداد دهانه و اثر مشخصات مکانیکی مصالح بر پاسخ لرزه‌ای این سازه‌ها پرداخته شده است. در بخش سوم مقاله حاضر به مدل‌سازی و به‌هنگام کردن این سازه‌ها پرداخته خواهد شد. در بخش چهارم به دسته‌بندی مدل‌های تهیه شده و بدست آوردن منحنی ظرفیت آنها پرداخته شده است. در بخش پنجم با استفاده از طیف زلزله پیشنهاد شده در آیین‌نامه طرح پل‌های راه و راه‌آهن (نشریه ۴۶۳)، ارزیابی لرزه‌ای صورت می‌گیرد و نهایتاً در بخش ششم و آخر پژوهش حاضر، نتایج استخراج شده از تحقیق حاضر ارائه می‌گردد.

## ۲- نتایج میدانی

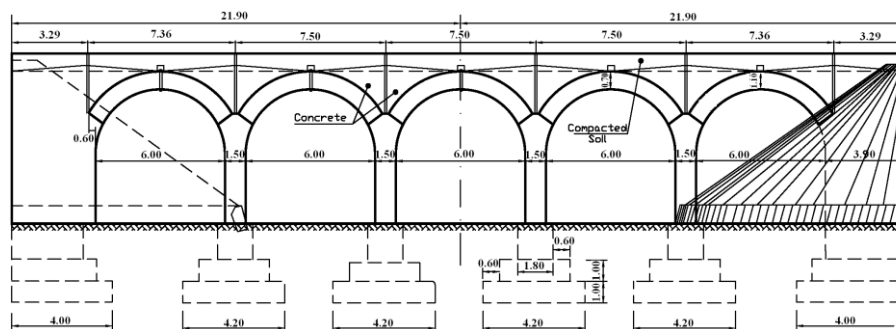
به طور کلی آزمایش‌های بسیاری بر روی پل‌های قوسی بنایی از گذشته تا به امروز انجام شده است. اکثر این آزمایش‌ها بر روی پل‌های قوسی سنگی و آجری و در حالت بارگذاری استاتیکی صورت گرفته است. تنها آزمایش جامعی که بر روی پل‌های قوسی بتنی غیرمسلح انجام شده است، آزمایش‌های معرفت و همکاران در سال ۲۰۰۰ است. در این بخش خلاصه‌ای از نتایج این آزمایش‌ها که در مطالعه حاضر از آن استفاده گردیده است، بیان می‌شود.

پل‌های مورد بررسی در کیلومتر ۲۳ و ۲۴ راه آهن قدیم تهران - قم واقع شده‌اند و به ترتیب دارای دو دهانه ۲۰ متری و پنج دهانه ۶ متری می‌باشند. سازه پل‌ها از نوع قوسی بتنی غیرمسلح می‌باشد و بیش از ۷۰ سال از ساخت آنها می‌گذرد. مشخصات هندسی اجزای این پل‌ها در شکل ۱ نشان داده شده و در جدول ۱ درج گردیده است. مشخصات مکانیکی مصالح با استفاده از آزمایش مغزه‌گیری بدست آمده و در جدول ۲ ارائه شده است [۲۴ و ۲۵]. بارگذاری استاتیکی با استفاده از وزنه‌های ۴ تنی در یکی از دهانه‌ها به طول ۶ متر انجام شده است. در این آزمایش افزایش بار به صورت تدریجی صورت گرفته و هر بار افزایش بار، به میزان ۲۴ تن بوده است. تغییرمکان قائم کلید قوس مطابق شکل ۲ در هر بار افزایش بار، ثبت گردیده است.

در آزمایش دینامیکی، دیزل ۶ محوره ۱۲۰ تنی با سرعت‌های ۱۰، ۲۰، ۴۰، ۵۰، ۶۰، ۸۰ و ۹۰ کیلومتر بر ساعت از روی پل‌ها عبور داده شده و جابجایی و شتاب در کلید قوس دهانه میانی برای پل کیلومتر ۲۴ و قوس سمت چپ کیلومتر ۲۳ تحت اثر حرکت قطار ثبت گردیده است. هدف از این آزمایش‌ها، تعیین ضریب ضربه دینامیکی قطار در سرعت‌های مختلف، فرکانس‌های طبیعی سازه و برآوردی از میرایی سازه بوده است. در جدول ۳ فرکانس سه مود اول این پل‌ها که در آزمایش میدانی به دست آمده‌اند، ارائه شده است.



(الف)



(ب)

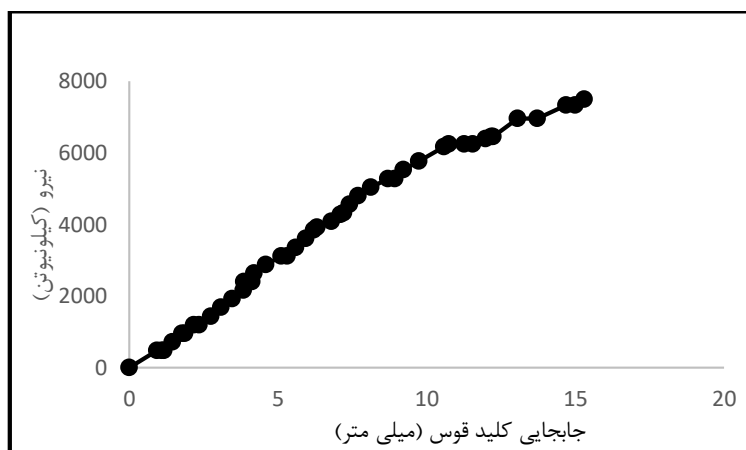
شکل ۱: مقطع طولی پل‌ها [۲۴ و ۲۵]. (الف) کیلومتر ۲۳ و (ب) کیلومتر ۲۴

جدول ۱: مشخصات هندسی پل‌ها [۲۴ و ۲۵]

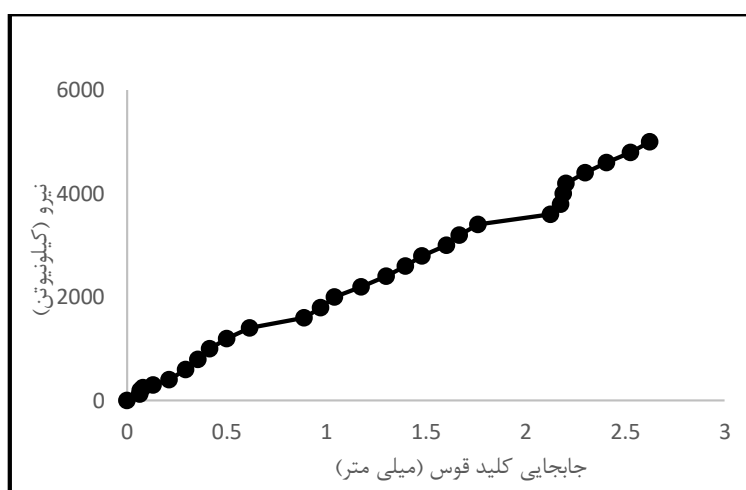
پل	تعداد دهانه	طول دهانه (متر)	شکل قوس	ضخامت کلید (متر)	ضخامت پاتاق (متر)	عرض قوس (متر)	ارتفاع پل (متر)	ضخامت دیوار جانبی (متر)
کیلومتر ۲۳	۲	۲۰	قسمتی از دایره	۱	۱/۹	۴/۴	۱۲	۱
کیلومتر ۲۴	۵	۶	نیم دایره	۰/۷	۱/۱	۳/۹	۸	۱

جدول ۲: مشخصات بتن در اجزای مختلف پل‌ها و به دست آماده از آزمایش‌های [۲۴ و ۲۵]

عنوان	کیلومتر ۲۳	کیلومتر ۲۴	کیلومتر ۲۳	کیلومتر ۲۴	کیلومتر ۲۳	کیلومتر ۲۴	وزن مخصوص ( $kg/m^3$ )
بتن پرکننده	۱۷/۶	۷/۶	۲۰/۲	۱۰/۹	۲۳۰۰	۲۲۱۷	
قوس	۱۷/۳	۳۹/۴	۱۷	۲۴/۹	۲۲۸۰	۲۲۹۰	
پایه	۲۷/۹	۳۱/۹	۳۷/۳	۳۶/۵	۲۳۵۰	۲۲۵۰	



(الف)



(ب)

شکل ۲: منحنی جابه‌جایی قائم - نیرو در دهانه بارگذاری شده [۲۴ و ۲۵]. (الف) کیلومتر ۲۳ و (ب) کیلومتر ۲۴ [۲۴ و ۲۵]

جدول ۳: فرکانس سه مود اول دو پل در آزمایش دینامیکی برحسب هر تاز [۲۴ و ۲۵]

عنوان	مد اول	مد دوم	مد سوم
آزمایش عبور دیزل، پل کیلومتر ۲۳	۳/۵	۵/۹	۸/۶
آزمایش عبور دیزل، پل کیلومتر ۲۴	۱۴/۶	۲۱/۵	۲۶/۴

### ۳- شبیه سازی عددی

رفتار واقعی سازه به شرایط مرزی، خواص واقعی مصالح، تغییر خواص در مقاطع مختلف، ناپیوستگی‌ها و اتصالات بین اجزاء و غیره بستگی دارد. همچنین در پل‌های قوسی بنایی لازم است که رفتار مصالح پرکننده و اندرکنش خاک و پی مد نظر قرار گیرد. در عمل، اعمال همه این ویژگی‌ها به صورت دقیق مقدور نیست. از اینرو برخی از عوامل فوق به صورت غیرمستقیم و در فرایند به‌هنگام سازی وارد شبیه‌سازی می‌شود [۱۳-۱]. با توجه به تحقیقات انجام گرفته بر روی این سازه‌ها، در مدل‌سازی حاضر سعی می‌شود تا با ارائه یک مدل جامع، رفتار این پل‌ها به درستی شبیه‌سازی گردد. برای این منظور در مطالعه حاضر، اجزای مختلف پل‌های کیلومتر ۲۳ و ۲۴، شامل قوس‌ها، پایه‌ها، دیوارهای

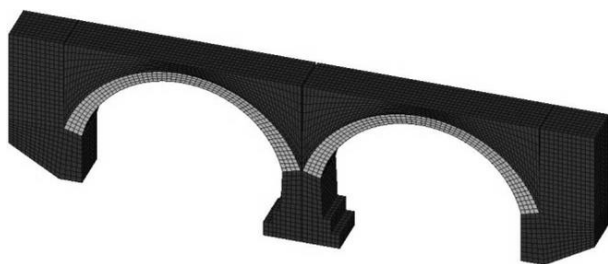
جانبی، کوله‌ها و خاک زیر پل (جهت در نظر گرفتن اثرات جانبی) مطابق با وضعیت موجود پل‌ها با رعایت جزئیات مدل‌سازی گردیده است. با توجه به رفتار این سازه‌ها، از مدل‌سازی سه بعدی و المان‌های مکعبی هشت گره‌ای در روش اجزا محدود جهت ایجاد مدل اولیه استفاده شده است. پس از ایجاد مدل اولیه، مطابق نتایج حاصل از آزمایش مغزه‌گیری، مشخصات مصالح در مدل تعریف گشته است. در گام دوم از شبیه‌سازی با انجام تحلیل مودال و تحلیل استاتیکی پارامترهای نامعین موجود در مسئله مانند شرایط مرزی مدل و مشخصات مکانیکی خاک زیر پل به عنوان پارامترهای متغیر در فرایند به‌هنگام سازی انتخاب گردیده‌اند و آنچنان تغییر داده شده‌اند که فرکانس‌های اصلی مدل و جابجایی کلید قوس دهانه بارگذاری شده و آزمایش یکسان گردند. در این شبیه‌سازی رفتار مواد غیرخطی در نظر گرفته شده است و از تئوری مکانیک شکست جهت محاسبه بار خرابی سازه استفاده شده است. در مکانیک شکست برای بررسی پدیده رشد ترک و همچنین محاسبه ظرفیت نهایی سازه‌ها از دو روش استفاده می‌گردد. در روش اول ترک‌هایی اولیه به صورت هندسی (فضای خالی) مدل می‌گردد و در ادامه مسیر خرابی سازه در راستای ترک‌های اولیه خواهد بود (مدل‌سازی هندسی ترک). در روش دوم با فرض اینکه ترک در کل سازه به صورت یکنواخت پخش شده است، فیزیک ترک در مسئله خرابی لحاظ می‌گردد (مدل‌سازی غیرهندسی ترک). روش دوم تحت عنوان روش ترک پخشی شناخته می‌شود و در سال‌های اخیر بسیار مورد توجه محققین قرار گرفته است. در زمینه پل‌های قوسی بنایی هر دو روش مورد توجه قرار گرفته است که بیشتر آنها بر اساس روش ترک پخشی بوده است [۲ و ۳]. در پژوهش حاضر نیز با توجه به نبودن اطلاعات دقیق از ترک‌های اولیه، از روش ترک پخشی (مدل‌سازی غیرهندسی ترک) جهت محاسبه بار خرابی سازه‌ها استفاده شده است.

برای این منظور برای مصالح بتن از معیار ویلام - وارنکی و برای خاک از معیار دراکر - پراگر استفاده شده است. برای شبیه‌سازی رفتار بتن با استفاده از معیار گسیختگی ویلام-وارنکی لازم است مقادیر مدول الاستیسیته بتن ( $E$ )، ضریب پواسون بتن ( $\nu$ )، مقاومت فشاری حداکثر نهایی بتن ( $f_c'$ )، مقاومت کششی حداکثر نهایی بتن ( $f_t$ )، حداکثر تنش فشاری دو محوره ( $f_{cb}$ )، تنش محصورشدگی هیدرواستاتیک ( $\sigma_H$ )، مقاومت فشاری نهایی بتن در حالت دو محوره ( $f_1$ ) و ضریب انتقال برش ( $\beta$ ) به عنوان داده‌های ورودی در دست باشد. مدل ویلام - وارنکی هر دو نوع خرابی ترک خوردگی (در ناحیه کشش) و خرد شدگی (در ناحیه فشار) را با استفاده از تئوری ترک پخشی در نظر می‌گیرد. لازم به ذکر است این معیار برای پیش‌بینی خرابی‌های رخ داده در بتن بکار می‌رود. برای استفاده از معیار الاستو-پلاستیک دراکر - پراگر نیز لازم است مقادیر مدول الاستیسیته بتن ( $E$ )، ضریب پواسون بتن ( $\nu$ )، ضریب چسبندگی ( $C$ )، ضریب اصطکاک ( $\phi$ ) و زاویه اتساع ( $\psi$ ) به عنوان داده‌های ورودی در دست باشد. در مقاله حاضر با توجه به اینکه مقاومت فشاری بتن در آزمایش مغزه‌گیری بدست آمده است [۲۴ و ۲۵]، سایر پارامترهای غیرخطی مدل‌ها به آسانی قابل محاسبه است [۲۷]. همچنین در مقاله حاضر فرض شده است که مقاومت کششی حداکثر نهایی بتن برابر ۱۵ درصد مقاومت فشاری حداکثر بتن است ( $f_t = 0.15f_c'$ ). نهایتاً با توجه به فرضیات ارائه شده، در شکل ۳ مدل نهایی پل‌های ۲۳ و ۲۴ ارائه شده است. در ادامه جهت صحت‌سنجی مدل‌های ارائه شده، فرکانس‌های اصلی محاسبه شده در شبیه‌سازی عددی در جدول ۴ با نتایج آزمایشگاهی مقایسه گردیده است. علاوه بر مقادیر فرکانس اصلی پل‌ها، در شکل ۴ جابجایی در دهانه بارگذاری شده در محل کلید قوس برای پل‌های ۲۳ و ۲۴ ارائه شده است.

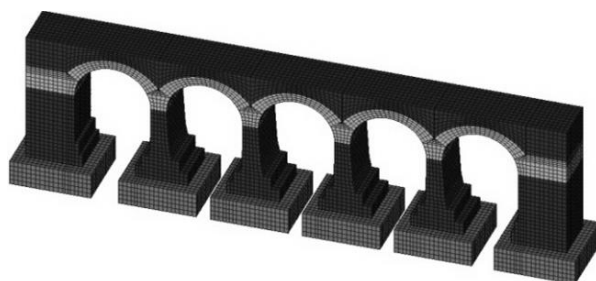
جدول ۴: فرکانس محاسبه شده پل‌ها در شبیه‌سازی عددی برحسب هر ترز

نام پل	عنوان آزمایش	مد اول (جانبی)	مد دوم (عرضی)	مد سوم (قائم)
	آزمایش عبور دیزل	۲/۵	۵/۹	۸/۶
کیلومتر ۲۳	روش اجزا محدود	۴/۶۶	۵/۶۶	۸/۲۸
	درصد خطا	۱۰	۴	۲/۸
	آزمایش عبور دیزل	۱۴/۶	۲۱/۵	۲۶/۴
کیلومتر ۲۴	روش اجزا محدود	۱۴/۶۵	۲۱/۰۲	۲۴/۲۵
	درصد خطا	۰/۳	۲/۲	۸/۱



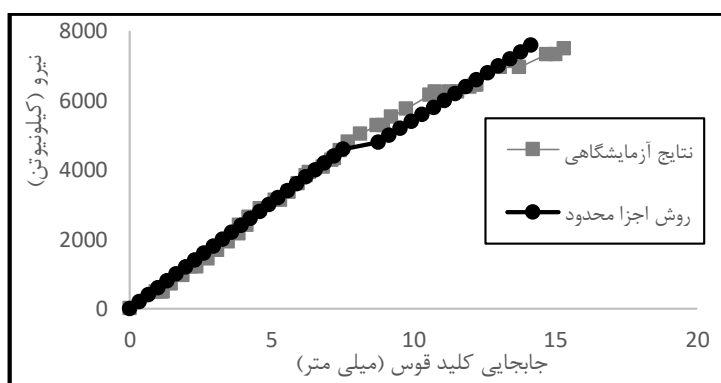


(الف)

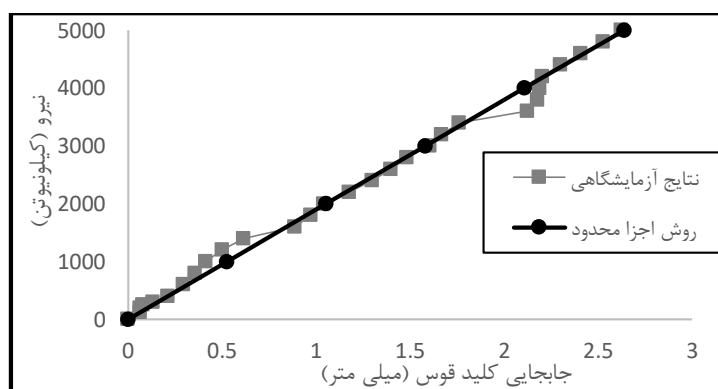


(ب)

شکل ۳: مدل سازی سه بعدی پل ها با استفاده از روش اجزا محدود. (الف) پل کیلومتر ۲۳ و (ب) پل کیلومتر ۲۴



(الف)



(ب)

شکل ۴: مقایسه جابجایی کلید قوس دهانه بارگذاری شده در روش اجزا محدود و نتایج آزمایشگاهی. (الف) پل کیلومتر ۲۳ و (ب) پل کیلومتر ۲۴

در مدل پل کیلومتر ۲۳ با توجه به اینکه رفتار سازه تا بار ۷۲۸۰ کیلونیوتن (بار وارد شده به پل در آزمایش میدانی) به صورت غیرخطی بوده است، مقدار بار ۷۲۸۰ کیلونیوتن در ۵۰ گام به مدل اعمال گردیده است. در مدل پل کیلومتر ۲۴ نیز با توجه به رفتار خطی سازه تنها از ۵ گام جهت اعمال بار ۵۰۰۰ کیلونیوتنی استفاده است. با توجه به مشخصات مکانیکی خاک‌های مورد استفاده در پل کیلومتر ۲۳ و ۲۴ که در فرایند به‌هنگام‌سازی مدل‌های عددی به دست آمده‌اند (جدول ۵)، سرعت موج برشی در آنها به ترتیب برابر  $708 \text{ m/s}$  و  $624 \text{ m/s}$  برای پل کیلومتر ۲۳ و ۲۴ محاسبه می‌شوند. مطابق استاندارد ۲۸۰۰ برای خاک‌هایی که سرعت موج برشی در آنها در فاصله  $300 \text{ m/s} \leq v \leq 875 \text{ m/s}$  قرار دارد، جزء خاک‌های خیلی سخت هستند و با خاک نوع II اسم‌گذاری می‌گردند.

جدول ۵: مشخصات خاک مدل‌سازی شده در پل‌های کیلومتر ۲۳ و ۲۴ در فرایند به‌هنگام‌سازی

پل	مدول الاستیسیته (GPa)	ضریب پواسون	وزن مخصوص ( $\text{kg/m}^3$ )	سرعت موج برشی (m/s)	ضریب چسبندگی (MPa)	زاویه اصطکاک (درجه)
کیلومتر ۲۳	۰/۷	۰/۳۳	۱۸۰۰	۶۲۴	۰/۴	۳۳
کیلومتر ۲۴	۰/۹	۰/۳۳	۲۰۰۰	۷۰۸	۰/۵	۳۵

از آنجایی که فرکانس و جابجایی کلید قوس مدل‌های مورد نظر مطابقت خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارند، می‌توان استنباط کرد که این پل می‌تواند نماینگر واقعی مشخصه‌های دیگر پل از جمله رفتار آن در مقابل زلزله باشد. بنابراین با توجه به مشخصات مدل‌های به‌هنگام‌شده، نتایج ارزیابی لرزه‌ای قابل قبول خواهد بود.

#### ۴- مطالعه پارامتریک

با توجه به رفتار پیچیده پل‌های قوسی بنایی، عوامل زیادی بر پاسخ آنها موثر است که به طور کلی می‌توان آنها را به چهار دسته از جمله: طول دهانه، تعداد دهانه، مشخصات هندسی اجزا و مشخصات مکانیکی مصالح تقسیم‌بندی نمود. در بررسی هر کدام از این عوامل مطالعات وسیعی صورت گرفته است که از مهمترین آنها می‌توان به بررسی اثر تعداد دهانه در مطالعات پیچ [۱] و ملبورن [۴] تحت بارهای استاتیکی در پل‌های قوسی آجری و سنگی اشاره کرد. در سال ۲۰۱۵ نیز بایراکتر و همکاران با انجام مطالعاتی بر روی سه پل سنگی روابطی را جهت محاسبه فرکانس اصلی و میرایی پل‌های قوسی سنگی با طول دهانه‌های مختلف پیشنهاد داده‌اند [۱۸]. در نظر گرفتن همه عوامل طول دهانه، تعداد دهانه، مشخصات هندسی اجزای پل و مشخصات مکانیکی مصالح در یک پژوهش نیاز به جمع‌آوری اطلاعات وسیعی از مشخصات پل‌ها دارد. برای این منظور در پژوهش حاضر برخی از عوامل مذکور جهت بررسی رفتار پل‌های قوسی بتنی غیرمسلح به منظور محاسبه ظرفیت جانبی آنها با استفاده از نتایج محدود از آزمایش‌های میدانی و روش اجزا محدود مورد بررسی قرار می‌گیرد. با توجه به اینکه در بخش قبلی شبیه‌سازی دو پل مورد صحت‌سنجی قرار گرفت، در بخش حاضر ۳۲ مدل عددی که از لحاظ شرایط مرزی مشابه دو مدل صحت‌سنجی شده هستند، تهیه گردیده است و نتایج آنها مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در مورد نحوه انتخاب مدل‌های تهیه شده، در ادامه توضیحات کامل‌تری ارائه می‌گردد.

#### ۴-۱- مطالعه مشخصات مکانیکی پل

مطالعاتی که بر روی پل‌های قوسی بتنی غیرمسلح انجام گرفته است، حاکی از آن است که از لحاظ مشخصات هندسی و مشخصات مصالح، این پل‌ها دارای تیپ‌بندی یکسانی هستند [۲۶-۱۶]. برای این منظور جهت ارزیابی اثر مشخصات مصالح این سازه‌ها بر ظرفیت نهایی آنها، در مطالعه حاضر از چهار نوع مصالح در فرایند شبیه‌سازی استفاده شده است که در جدول ۶ نمایش داده شده است. همان‌طور که از جدول ۶ مشخص است از مشخصات مصالح سه پل بتنی غیرمسلح در شبکه راه‌آهن کشور به همراه میانگین آنها در فرایند شبیه‌سازی استفاده شده است [۲۶-۲۴]. در سال ۲۰۱۶ آقای عطایی و همکاران یک نمونه دیگر از پل‌های قوسی بتنی غیرمسلح (پل صالح) را مورد آزمایش میدانی قرار داده‌اند. با توجه به تیپ بندی بودن این سازه‌ها و همچنین انجام مطالعات پارامتریک دقیق‌تر، از مشخصات مصالح پل صالح نیز در این مقاله استفاده شده است [۲۶].

## ۴-۲- مطالعه تعداد دهانه

با توجه به تعدد پل‌های قوسی بنایی در شبکه راه‌آهن، این پل‌ها با تعداد دهانه‌های مختلف موجود هستند. بنابراین مطالعه پارامتریک بر روی تعداد دهانه جهت محاسبه ظرفیت نهایی آنها ضروری است. در مطالعه حاضر با توجه به اینکه این پل‌ها معمولاً دارای تعداد دهانه ۱ تا ۱۰ هستند، پل‌های کیلومتر ۲۳ و ۲۴ با تعداد دهانه‌های ۱، ۲، ۳ و ۵ مورد مطالعه پارامتریک در فرایند شبیه‌سازی عددی قرار می‌گیرند.

## ۴-۳- مطالعه طول دهانه

مطابق تحقیقات انجام شده در زمینه پل‌های قوسی بنایی، طول دهانه این سازه‌ها پارامتر بسیار مهمی جهت محاسبه پاسخ سازه است. در تحقیقات مختلفی روابطی بر اساس طول دهانه جهت محاسبه ظرفیت استاتیکی (تحت بار قائم)، ضریب میرایی، فرکانس مود اول، جابجایی کلید قوس و غیره ارائه شده است که می‌توان از میان آنها به برخی از مراجع [۴، ۱۸ و ۲۸] اشاره کرد. از نظر طول دهانه ( $l$ ) پل‌های قوسی بنایی به سه دسته تقسیم می‌شوند: دهانه‌های کوچک با طول دهانه ( $l \leq 6m$ )، دهانه‌های متوسط با طول دهانه ( $6m \leq l \leq 20m$ ) و دهانه‌های بزرگ با طول دهانه ( $l \geq 20m$ ). معمولاً پل‌های قوسی بنایی بر اساس این دسته‌بندی انجام گرفته به صورت تیپ‌بندی شده طراحی می‌شوند، بنابراین از لحاظ رفتاری پل‌های قوسی بنایی با طول دهانه مختلف در این بازه‌ها، رفتار مشابهی را از خود نشان می‌دهند. با توجه به طول دهانه‌های پل کیلومتر ۲۳ و ۲۴، این پل‌ها جزء پل‌های با دهانه متوسط هستند. بنابراین در این بخش اثر طول دهانه برای پل‌های قوسی بتنی غیرمسلح با دهانه متوسط مورد مطالعه پارامتریک قرار می‌گیرند.

جدول ۶: مشخصات مصالح اعضای پل‌ها و مورد استفاده در شبیه‌سازی عددی جهت مطالعه پارامتریک [۲۴-۲۶]

عنوان	شماره مصالح	مصالح پل	بتن پرکننده	قوس	پایه
مدول الاستیسیته ( $GPa$ )	۲	کیلومتر ۲۳	۲۰/۲	۱۷	۳۷/۳
	۱	کیلومتر ۲۴	۱۰/۹	۲۴/۹	۳۶/۵
	۳	پل صالح	۱۷/۳	۲۲/۹	۲۳/۴
	۴	میانگین	۱۶/۱۳	۲۱/۶	۳۲/۴
ضریب پواسون	۲	کیلومتر ۲۳	۰/۲۱	۰/۲۱	۰/۱۹
	۱	کیلومتر ۲۴	۰/۲۹	۰/۱۷	۰/۱۸
	۳	پل صالح	۰/۲	۰/۱۸	۰/۱۷
	۴	میانگین	۰/۲۳	۰/۱۹	۰/۱۸
وزن مخصوص ( $kg/m^3$ )	۲	کیلومتر ۲۳	۲۳۰۰	۲۲۸۰	۲۳۵۰
	۱	کیلومتر ۲۴	۲۲۱۷	۲۲۹۰	۲۲۵۰
	۳	پل صالح	۲۳۳۰	۲۲۸۰	۲۶۳۰
	۴	میانگین	۲۲۸۲	۲۳۱۷	۲۴۱۰
مقاومت فشاری بتن ( $MPa$ )	۲	کیلومتر ۲۳	۱۷/۶	۱۷/۳	۲۷/۹
	۱	کیلومتر ۲۴	۷/۶	۳۹/۴	۳۱/۹
	۳	پل صالح	۱۲	۲۱	۲۲
	۴	میانگین	۱۲/۴	۲۵/۹	۳۰/۴

## ۴-۴- دسته‌بندی مدل‌های مورد مطالعه

هدف از ارزیابی لرزه‌ای یک پل تعیین سطح عملکرد آن، متناظر با از دست رفتن خدمت رسانی پل، آسیب شدید لرزه‌ای یا خرابی آن است. با تعیین میزان عملکرد، می‌توان در مورد اینکه پل بهسازی گردد، از رده خارج شود و یا اینکه بدون تغییر باقی بماند تصمیم‌گیری

نمود. برای ارزیابی سازه‌های مورد مطالعه از روش استاتیکی غیرخطی استفاده شده است. در این تحلیل، عملکرد پل در جهت طولی و عرضی بررسی شده است و همچنین بار لرزه‌ای معادل یک الگوی بار جانبی و به صورت استاتیکی جایگزین شده است. از آنجایی که ارزیابی لرزه‌ای پل‌های قوسی بنایی همچنان یک مسئله ناشناخته در بین محققین بوده است، در ارتباط با نحوه بارگذاری این سازه‌ها که یکی از مهمترین مراحل تحلیل پوش‌اور است، روال مشخصی وجود ندارد. تنها تحقیقات نسبتاً جامعی که در این ارتباط وجود دارد، مقاله پیلا و همکاران [۱۴] و معرفت و همکاران [۱۷] می‌باشد. در این مقاله با توجه به تحقیقات پیشین، تحلیل پوش‌اور انجام شده است، برای این منظور ابتدا مدل‌های اجزاء محدود با توجه به آزمایش‌های انجام شده به‌هنگام شده‌اند، سپس بعد از بدست آمدن مشخصات نهایی مدل‌ها (همان‌طور که در بخش سوم نشان داده شد)، تحلیل پوش‌اور انجام شده است. ارزیابی لرزه‌ای با استفاده از روش پوش‌اور در دو مرحله انجام گردیده است، مرحله اول سازه تحت بارهای ثقلی تحلیل شده است و در مرحله دوم بارگذاری افقی اعمال گردیده است.

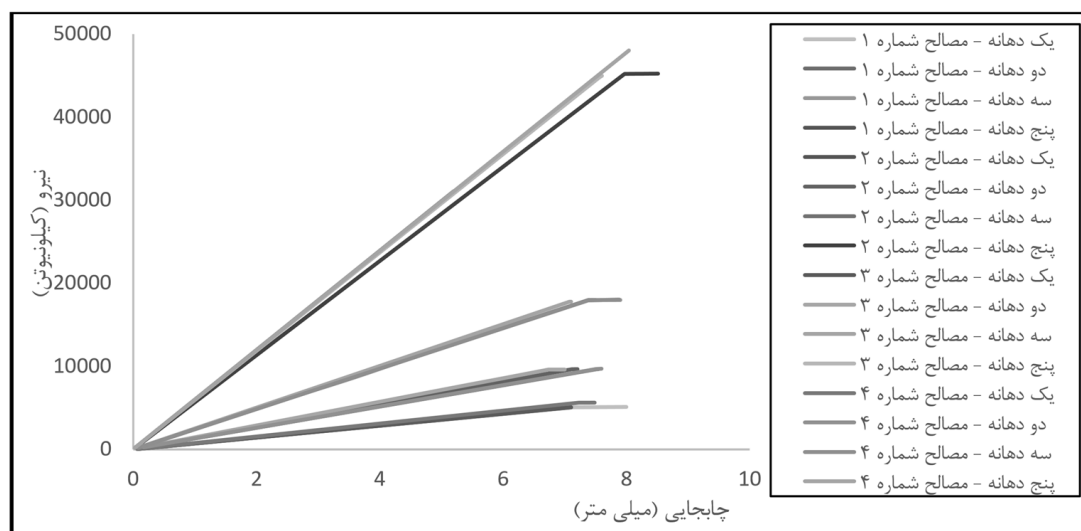
مطابق توضیحات ارائه شده در قسمت‌های قبلی در مجموع ۳۲ مدل عددی مطابق با جدول ۷ تهیه گردیده است. ۳۲ مدل عددی تهیه شده مطابق دو مدل اولیه‌ی صحت‌سنجی شده، تهیه شده‌اند. در ادامه با انجام تحلیل استاتیکی غیرخطی ظرفیت نهایی این مدل‌ها در جهت طولی و عرضی بدست آورده شده است. منحنی ظرفیت ۳۲ مدل تهیه شده در شکل‌های ۵ و ۶ نشان داده شده است. همان‌طور که از شکل‌های ۵ و ۶ مشخص است، رفتار این سازه‌ها تقریباً خطی است و همچنین ظرفیت سازه کاملاً وابسته به مشخصات هندسی و مکانیکی این پل‌ها است. برای بدست آوردن منحنی ظرفیت پل یک نمونه بارگذاری به مدل اعمال شده است. در این بارگذاری باری متناسب با جرم و تغییرشکل مدی مد اول سازه به مدل اعمال شده است [۱۴ و ۱۷]. برای بدست آوردن نمودار برش - تغییرمکان کلید قوس به عنوان نقطه کنترل در نظر گرفته شده است [۱۴ و ۱۵]. همچنین به عنوان نمونه در شکل‌های ۷ و ۸ حالت نهایی خرابی و تشکیل نواحی تمرکز تنش در پل کیلومتر ۲۳ نشان داده شده است.

جدول ۷: مشخصات مدل‌های مد نظر جهت مطالعه پارامتریک

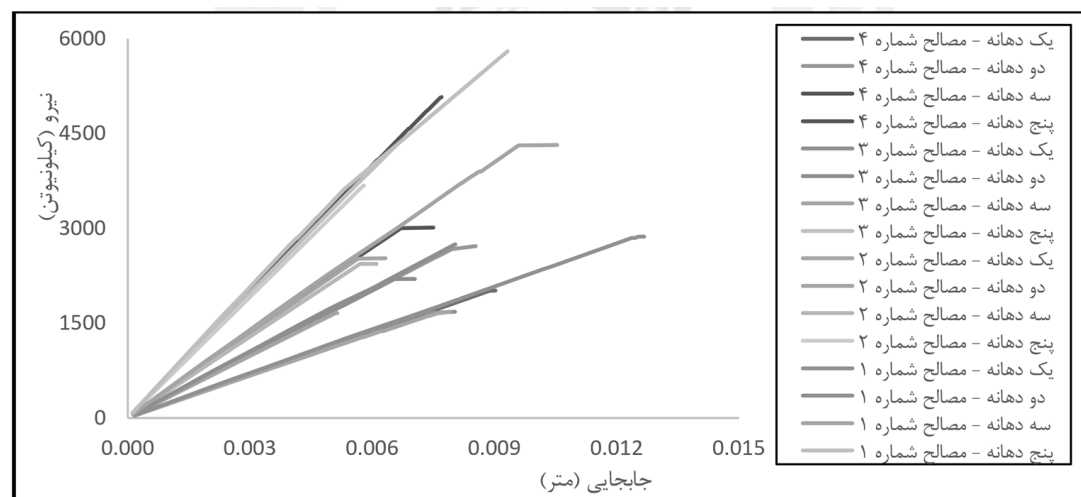
شماره مدل	شماره مصالح	طول دهانه (متر)	تعداد دهانه	شماره مدل	شماره مصالح	طول دهانه (متر)	تعداد دهانه
۱	۱	۶	۱	۱۷	۱	۲۰	۱
۲	۱	۶	۲	۱۸	۱	۲۰	۲
۳	۱	۶	۳	۱۹	۱	۲۰	۳
۴	۱	۶	۵	۲۰	۱	۲۰	۵
۵	۲	۶	۱	۲۱	۲	۲۰	۱
۶	۲	۶	۲	۲۲	۲	۲۰	۲
۷	۲	۶	۳	۲۳	۲	۲۰	۳
۸	۲	۶	۵	۲۴	۲	۲۰	۵
۹	۳	۶	۱	۲۵	۳	۲۰	۱
۱۰	۳	۶	۲	۲۶	۳	۲۰	۲
۱۱	۳	۶	۳	۲۷	۳	۲۰	۳
۱۲	۳	۶	۵	۲۸	۳	۲۰	۵
۱۳	۴	۶	۱	۲۹	۴	۲۰	۱
۱۴	۴	۶	۲	۳۰	۴	۲۰	۲
۱۵	۴	۶	۳	۳۱	۴	۲۰	۳
۱۶	۴	۶	۵	۳۲	۴	۲۰	۵

## ۵- تعیین سطح عملکرد

به منظور ارزیابی این سازه‌ها، تقاضا بر اساس یک سطح زلزله در نظر گرفته شده است، این سطح خطر مربوط به زلزله‌هایی با احتمال وقوع ۱۰٪ در دوره بازگشت ۴۷۵ سال است (زلزله نسبتاً شدید) [۲۹]. در شبکه راه‌آهن کشور بیش از ۳۰۰۰۰ پل وجود دارد که اکثر آنها پل‌های قوسی بنایی هستند. با توجه به اینکه کشور ایران دارای مناطقی با لرزه‌خیزی متنوع است، جهت ارزیابی لرزه‌ای این سازه‌ها در نظر گرفتن لرزه‌خیزی همه مناطق ضروری به نظر می‌رسد. مطابق استاندارد ۲۸۰۰ و نشریه ۴۶۳ کشور ایران از لحاظ لرزه‌خیزی به چهار دسته تقسیم می‌شود. مطابق جدول ۸ حداکثر شتاب در نظر گرفته شده برای سطح خطر مورد بررسی نشان داده شده است [۲۹]. همچنین جهت ارزیابی لرزه‌ای این سازه‌ها از هر چهار نوع خاک موجود در استاندارد ۲۸۰۰ استفاده شده است [۳۰].



(الف)



(ب)

شکل ۵: نمودار جابجایی - نیرو در جهت طولی پل‌ها. (الف) پل کیلومتر ۲۳ و (ب) پل کیلومتر ۲۴

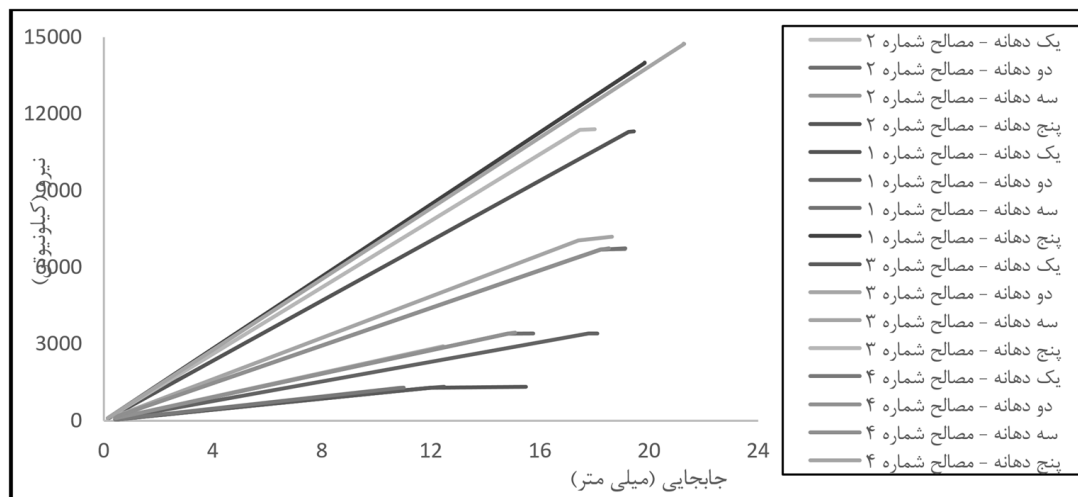
با توجه به اینکه رفتار پل‌های قوسی بنایی عمدتاً به صورت خطی است، جهت تعیین سطح عملکرد این سازه‌ها از طیف الاستیک نشریه ۴۶۳ استفاده شده است. برای بدست آوردن نقطه عملکرد سازه بایستی محل تقاطع منحنی ظرفیت سازه با منحنی تقاضا مشخص

گردد. باتوجه به اینکه منحنی‌های آیین‌نامه‌ای تقاضا برای مدل‌های یک درجه آزادی استخراج گردیده‌اند، بایستی منحنی ظرفیت چند درجه آزادی سازه به صورت مناسبی به منحنی ظرفیت یک درجه آزادی تبدیل گردد. برای این منظور کافی است مقادیر برش پایه و جابجایی در منحنی ظرفیت چند درجه آزادی به رابطه (۱) تقسیم گردد [۳۱].

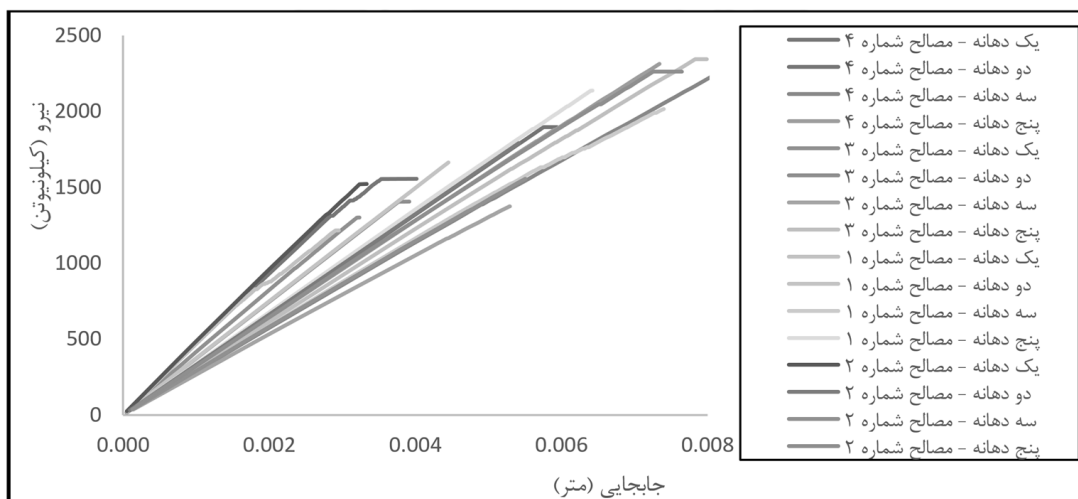
$$\Gamma = \frac{\sum_{i=1}^n m_{mi} \varphi_{mi}}{\sum_{i=1}^n m_{mi} \varphi_{mi}^2} \quad (1)$$

در این رابطه  $m_{mi}$  و  $\varphi_{mi}$  به ترتیب جرم و جابجایی  $i$ -ام در مد  $m$ -ام می‌باشد. با رسم همزمان منحنی ظرفیت پل‌ها و طیف زلزله به عنوان منحنی تقاضا، محل تقاطع آنها به عنوان نقطه عملکرد پل‌ها بدست خواهد آمد که در شکل‌های ۹ و ۱۰ نشان داده شده است. لازم به ذکر است که برای رسم همزمان منحنی ظرفیت و طیف زلزله، منحنی ظرفیت از نیرو باید به شتاب تبدیل گردد. برای این منظور کافی است مقادیر نیرو ( $V$ ) بر جرم موثر مودی ( $m^*$ ) تقسیم گردند تا منحنی ظرفیت به صورت شتاب ( $Sa$ ) بیان گردد ( $Sa = V/m^*$ ).

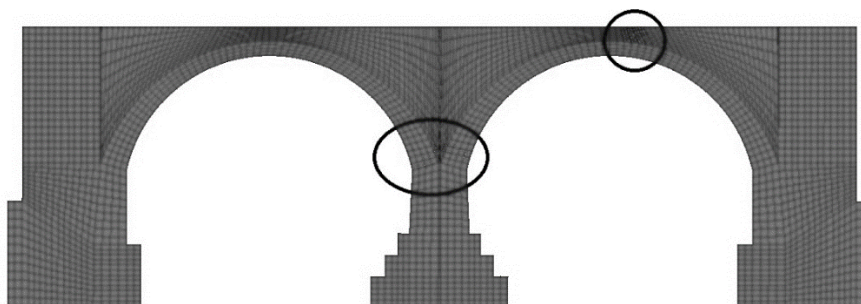
برای تفسیر و مقایسه نتایج این نمودارها ضریب امنیت تعریف می‌شود که عبارتست از تقسیم حداکثر تغییر مکان سازه بر تغییر مکان معادل نقطه عملکرد. اگر ضریب امنیت کوچکتر از یک باشد سازه دچار خرابی شده و هرچه این ضریب بزرگتر از یک باشد، نشانه سطح امنیت بالای سازه است. در جدول ۹ ضرایب امنیت در برخی از حالات نشان داده شده است.



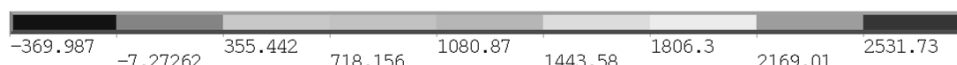
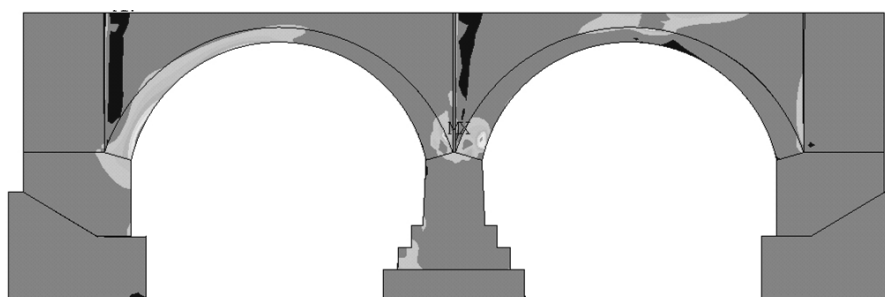
(الف)



شکل ۶: نمودار جابجایی - نیرو در جهت عرضی پل‌ها. (الف) پل ۲۳ کیلومتر و (ب) پل ۲۴ کیلومتر



شکل ۷: ترک خوردگی در کلید قوس و باطاقها در لحظه خرابی



شکل ۸: سطح تنش در لحظه خرابی و ایجاد مکانیزم تشکیل مفصل در قوس

جدول ۸: شتاب حداکثر برای لرزه خیزی مناطق مختلف در ایران [۳۰]

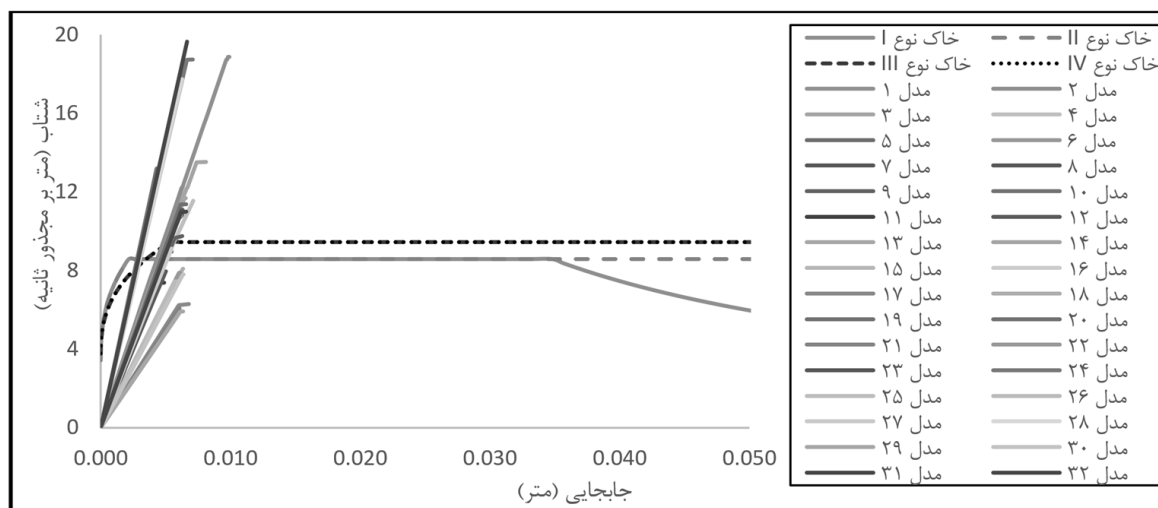
دوره بازگشت زلزله	لرزه خیزی با خطر نسبی کم	لرزه خیزی با خطر نسبی متوسط	لرزه خیزی با خطر نسبی زیاد	لرزه خیزی با خطر نسبی خیلی زیاد
۴۷۵ ساله	۰/۲۰	۰/۲۵	۰/۳۰	۰/۳۵

همان طور که از جدول ۹ مشخص است، از ۳۲ مدل تهیه شده ۱۹ مدل در جهت طولی و ۱۸ مدل در جهت عرضی دارای ضریب امنیت بیشتر از یک برای خاک نوع II هستند که نشان دهنده عملکرد نه چندان مناسب این سازه‌های در برابر زلزله‌های نسبتاً شدید است. لازم به ذکر است از آنجایی که نتایج حاصل از ضریب امنیت برای خاک‌های نوع I و II و همچنین III و IV یکسان هستند، فقط نتایج حاصل از خاک‌های نوع II در جدول ۹ گزارش شده است (البته نتایج حاصل از هر چهار نوع خاک تا حدود نسبتاً زیادی به یکدیگر نزدیک هستند).

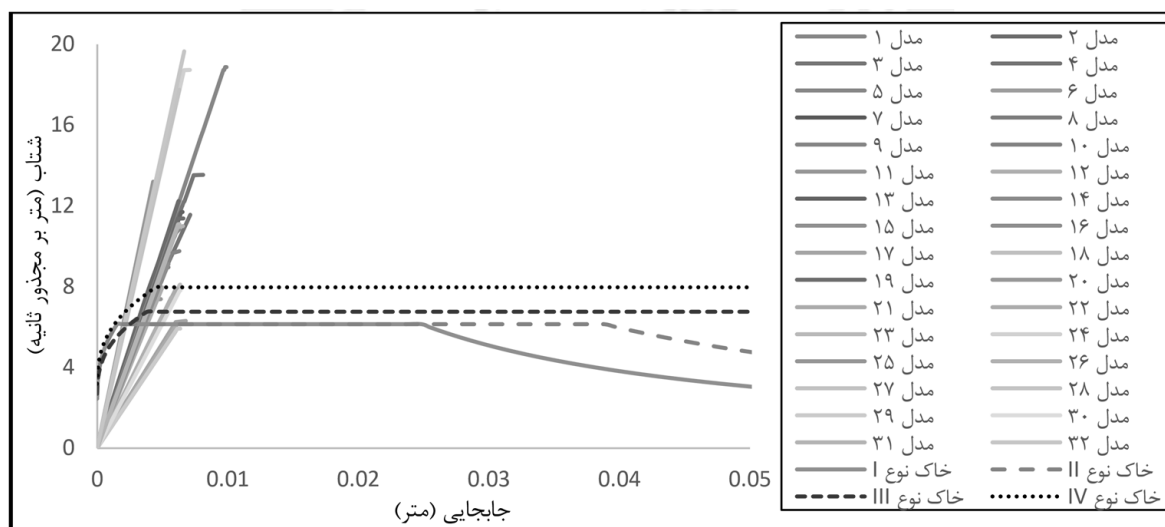
## ۶- مقایسه نتایج

با انجام شبیه‌سازی‌های انجام شده و مقایسه آنها، مهمترین نتایج حاصل از مطالعه حاضر را می‌توان در موارد زیر خلاصه نمود:

- علی‌رغم اینکه این پل‌ها در برابر بارهای سرویس و قائم عملکرد مناسبی دارند، عملکرد لرزه‌ای آنها به طور کلی مناسب نمی‌باشد و این سازه‌ها نیاز به مقاوم‌سازی دارند. ضریب امنیت این پل‌ها در همه مدل‌ها برای زلزله‌های نسبتاً شدید با دوره بازگشت ۴۷۵ سال در حدود ۰/۵ تا ۳ است ( $0.5 \leq SF \leq 3$ ).
- علی‌رغم مطالعه پارامترهای طول دهانه، تعداد دهانه، مشخصات مکانیکی مصالح و نوع خاک، مهمترین پارامتر موثر بر ارزیابی لرزه‌ای پل‌های قوسی بتنی غیرمسلح طول دهانه و تعداد دهانه می‌باشد.



(الف)



(ب)

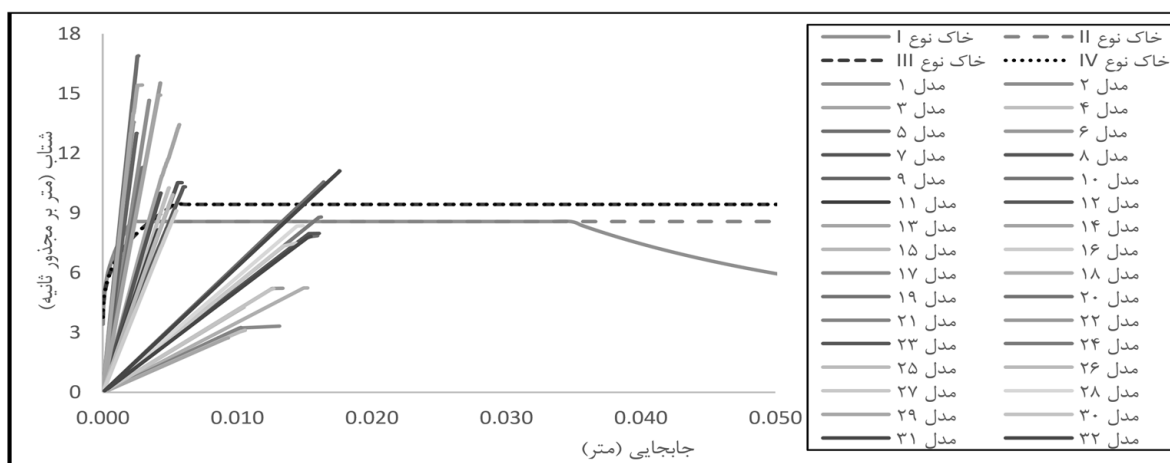
شکل ۹: عملکرد لرزه‌ای مدل‌ها در جهت طولی تحت زلزله شدید با دوره بازگشت ۴۷۵ سال. (الف) خطر نسبی خیلی زیاد و (ب) خطر نسبی متوسط

- عملکرد لرزه‌ای این سازه‌ها در جهت طولی بهتر از جهت عرضی آن است (ظرفیت جهت طولی حدود ۱/۱ الی ۱/۳ برابر جهت عرضی است).
- با توجه به سختی بالای این سازه‌ها، جابجایی آنها بسیار کم می‌باشد که این عامل سبب می‌گردد که این سازه‌ها در ناحیه شتاب ثابت قرار گیرند و عملکرد لرزه‌ای آنها مناسب نباشد.
- با افزایش طول دهانه این پل‌ها، جابجایی آنها نیز افزایش می‌یابد. این افزایش جابجایی در جهت طولی حداکثر ۴۰ درصد و در جهت عرضی تا حدود ۳۰۰ درصد است.
- جابجایی این سازه‌ها در جهت عرضی بیشتر از جهت طولی آن است (۱/۵ الی ۲ برابر) که این امر با افزایش طول دهانه نیز بیشتر می‌شود.
- پل‌های قوسی با تعداد دهانه کمتر در جهت عرضی عملکرد بهتری دارند.

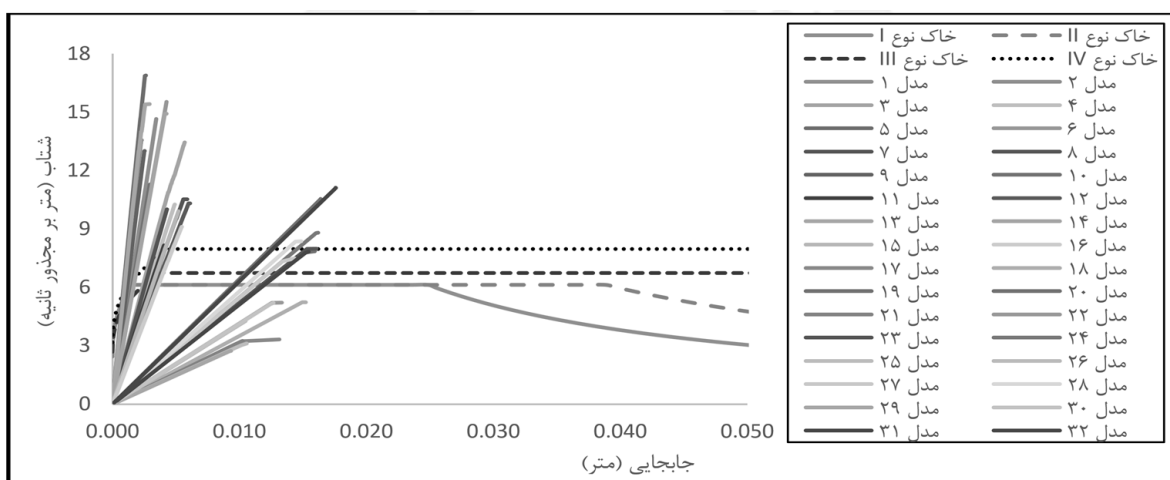


- با افزایش طول دهانه، عملکرد لرزه‌ای پل‌های قوسی بتنی غیرمسلح در جهت طولی افزایش می‌یابد.
- با افزایش طول دهانه، عملکرد لرزه‌ای پل‌های قوسی بتنی غیرمسلح در جهت عرضی کاهش می‌یابد.
- با افزایش تعداد دهانه، عملکرد لرزه‌ای پل‌های قوسی بتنی غیرمسلح افزایش می‌یابد.
- با توجه به اینکه این سازه‌ها در ناحیه شتاب ثابت قرار دارند، نوع خاک تاثیرات چندانی برا عملکرد آنها ندارد.

به طور کلی با توجه به رفتار خطی این سازه‌ها و همچنین سختی بسیار زیاد آنها، عملکرد لرزه‌ای مناسبی ندارند و بایستی مقاومت‌سازی این سازه‌ها در دستور کار قرار گیرد. نکته مهم در مورد مقاوم‌سازی این سازه‌ها این است که این سازه‌ها نیازی به افزایش مقاومت ندارند و فقط افزایش شکل‌پذیری در آنها سبب بروز عملکرد بهتر آنها می‌گردد.



(الف)



(ب)

شکل ۱۰: عملکرد لرزه‌ای مدل‌ها در جهت عرضی تحت زلزله شدید با دوره بازگشت ۴۷۵ سال. (الف) خطر نسبی خیلی زیاد و (ب) خطر نسبی متوسط

جدول ۹: ضریب امنیت مدل‌ها در برای پهنه خطرپذیری خیلی زیاد برای خاک نوع II

شماره مدل	جهت طولی	جهت عرضی	شماره مدل	جهت طولی	جهت عرضی
۱	۲/۸	۲/۱۸	۱۷	کمتراز یک	کمتراز یک

۲	۱/۴۷	۱/۷۵	۱۸	کمتر از یک	کمتر از یک
۳	۱/۸	۱/۷۸	۱۹	۱/۴۳	کمتر از یک
۴	۱/۳۸	۱/۳۲	۲۰	۱/۵۱	۱/۲۴
۵	۱/۳۳	۲/۴۵	۲۱	کمتر از یک	کمتر از یک
۶	کمتر از یک	۱/۸۷	۲۲	کمتر از یک	کمتر از یک
۷	کمتر از یک	۱/۱۹	۲۳	۱/۳۳	کمتر از یک
۸	کمتر از یک	۱/۳۶	۲۴	۲/۴	۱/۰۲
۹	۱/۲۵	۱/۷۳	۲۵	کمتر از یک	کمتر از یک
۱۰	۱/۱۴	۱/۱۱	۲۶	کمتر از یک	کمتر از یک
۱۱	کمتر از یک	کمتر از یک	۲۷	۱/۱۲	کمتر از یک
۱۲	کمتر از یک	۱/۲۴	۲۸	۲/۰۵	کمتر از یک
۱۳	۱/۳۸	۲/۳۳	۲۹	کمتر از یک	کمتر از یک
۱۴	۱/۳۵	۱/۸۷	۳۰	کمتر از یک	کمتر از یک
۱۵	۱/۰۷	۱/۱۷	۳۱	۱/۴	کمتر از یک
۱۶	۱/۰۶	۱/۱	۳۲	۲/۴	۱/۳

## ۷- نتیجه گیری

پل‌های قوسی بنایی به تعداد زیادی در شبکه خطوط راه‌آهن کشور موجود می‌باشند که عمر بیشتر آنها بیش از هفتاد سال است. از آنجایی که این پل‌ها برای بارهای زلزله طراحی نشده‌اند، بررسی عملکرد لرزه‌ای آنها به یک مسئله مهم تبدیل گشته است. با توجه به رفتار پیچیده پل‌های قوسی بنایی، جهت بررسی و مطالعه رفتار این پل‌ها نیاز به شبیه‌سازی دقیق می‌باشد. برای اینکه بتوان رفتار این پل‌ها را به هم مرتبط ساخت، پارامترهای زیادی از جمله: تعداد دهانه، طول دهانه، مشخصات هندسه پل و مشخصات مصالح وجود دارد. در مطالعه حاضر با استفاده از نتایج میدانی انجام گرفته شده بر روی پل‌های قوسی بتنی غیرمسلح، از روش اجزا محدود جهت تحلیل استاتیکی غیرخطی سه بعدی ۳۲ مدل عددی به‌هنگام شده که دارای مشخصات هندسی و فیزیکی متفاوتی هستند، استفاده شده است. در این مقاله با اعمال بارگذاری در جهت طولی و عرضی و اعمال نیرو متناسب با جرم و تغییر شکل مودال، منحنی‌های ظرفیت مدل‌ها با در نظر گرفتن کلید قوس به عنوان نقطه کنترل محاسبه گردیده است. همچنین بر اساس پهنه‌های خطرپذیری مختلفی، طیف‌های تقاضای خطی استخراج گردید. براساس عملکرد پل‌ها، علی‌رغم وابسته بودن عملکرد لرزه‌ای این سازه‌ها به تعداد دهانه و طول دهانه، می‌توان گفت که در هنگام وقوع زلزله‌هایی با دوره بازگشت ۴۷۵ سال خسارت شدیدی به این سازه‌ها وارد گردیده و دارای عملکرد لرزه‌ای مطلوبی نمی‌باشند، برای این منظور مقاوم‌سازی این سازه‌ها جهت افزایش شکل‌پذیری و جابجایی نهایی آنها ضروری به نظر می‌رسد.

## مراجع

- [1] Page, J. (1993). Masonry Arch bridges. TRL state of the art review, HMSO.
- [2] Fanning, P. J. and Boothby, T. E. (2001). Three-dimensional modelling and full-scale testing of stone arch bridges. *Computers and Structures*, 79(29-30), 2645-2662.
- [3] Fanning, P. J. and Boothby, T. E. and Roberts, B. J. (2001). Longitudinal and transverse effects in masonry arch assessment. *Construction and Building Materials*, 15(1), 51-60.
- [4] Melbourne, C. and Gilbert, M. (1995). Behaviour of multiring brickwork arch bridges. *Structural engineer London*, 73(3), 39-47
- [5] Melbourne, C. and Walker, P. (1996). Load Tests To Collapse of Model Brickwork Masonry Arches. 8th international brick and block masonry conference, New York, 991-1002.
- [6] Royles, R. and Hendry, A. W. (1991). Model Tests on Masonry Arches. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 91(2), 299-321.

- [7] De Arteaga, I. and Morer, P. (2012). The effect of geometry on the structural capacity of masonry arch bridges. *Construction and Building Materials*, 34, 97-106.
- [8] Brencich, A. and De Francesco, U. (2004). Assessment of multispan masonry arch bridges. I: Simplified approach. *Journal of Bridge Engineering*, 9(6), 582-590.
- [9] Brencich, A. and Sabia, D. (2008). Experimental identification of a multi-span masonry bridge: The Tanaro Bridge. *Construction and Building Materials*, 22(10), 2087-2099.
- [10] Cavicchi, A. and Gambarotta, L. (2005). Collapse analysis of masonry bridges taking into account arch-fill interaction. *Engineering Structures*, 27(4), 605-615.
- [11] Drosopoulos, G. A. and Stavroulakis, G. E. and Massalas, C. V. (2007). FRP reinforcement of stone arch bridges: Unilateral contact models and limit analysis. *Composites Part B: Engineering*, 38(2), 144-151.
- [12] Carpinteri, A. and Lacidogna, G. and Accornero, F. (2015). Evolution of the fracturing process in masonry arches. *Journal of Structural Engineering (United States)*, 141(5).
- [13] Costa, C. and Arêde, A. and Costa, A. and Caetano, E., Cunha, A. and Magalhaes, F. (2015). Updating Numerical Models of Masonry Arch Bridges by Operational Modal Analysis. *International Journal of Architectural Heritage*, 9(7), 760-774.
- [14] L Pelà, L. and Aprile, A. and Benedetti, A. (2009). Seismic assessment of masonry arch bridges. *Engineering Structures*, 31(8), 1777-1788.
- [15] Pelà, L. and Aprile, A. and Benedetti, A. (2013). Comparison of seismic assessment procedures for masonry arch bridges. *Construction and Building Materials*, 38, 381-394.
- [16] Yazdani, M. and Marefat, M.S. (2013). seismic assessment of six meter spans plain concrete arch bridge. *journal of seismology and earthquake engineering (JSEE)*, 15(1), 72-82.
- [17] Yazdani, M. and Marefat, M.S. (2012). Seismic assessment of twenty-meter spans plain concrete arch bridge. *Proceedings of the 4<sup>th</sup> International Conference on Seismic Retrofitting*, Tabriz, Iran.
- [18] Bayraktar, A. and Türker, T. and Altunişik, A. C. (2015). Experimental frequencies and damping ratios for historical masonry arch bridges. *Construction and Building Materials*, 75, 234-241.
- [19] Sevim, B. and Bayraktar, A. and Altuniik, A. C. and Atamtürktür, S. and Birinci, F. (2011). Finite element model calibration effects on the earthquake response of masonry arch bridges. *Finite Elements in Analysis and Design*, 47(7), 621-634.
- [20] Sevim, B. and Bayraktar, A. and Altunişik, A. C. and Atamtürktür, S. and Birinci, F. (2011). Assessment of nonlinear seismic performance of a restored historical arch bridge using ambient vibrations. *Nonlinear Dynamics*, 63(4), 755-770.
- [21] Gencturk, B. and et al. (2014). Capacity Assessment of the Titus Tunnel Bridge Using Analytical and Numerical Techniques. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 28, 349-62.
- [22] Ahmadvand, Sh. AND Khaji, N. (2010). Seismic Rehabilitation of Masonry Arch Bridges Using Post-Tensioning Method. *Journal of transportation engineering*, 1(2), 1-19.
- [23] Zampieri, P. and Zanini, M. A. and Modena, C. (2015). Simplified seismic assessment of multi-span masonry arch bridges. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 13(9), 2629-2646.
- [24] Marefat, M. S. and Ghahremani-Gargary, E. and Ataei, Sh. (2004). Load test of a plain concrete arch railway bridge of 20-m span. *Construction and Building Materials*, 18(9), 661-667.
- [25] Marefat, M. S. and Ghahremani-Gargary, E. and Ataei, Sh. (2003). Static and dynamic testing of Akbar Abad plain concrete arch bridge. *Journal of civil and surveying Engineering*, 37(1), 13- 25.
- [26] Ataei, S. and Jahangiri Alikamar, M. and Kazemiashtiani, V. (2016). Evaluation of axle load increasing on a monumental masonry arch bridge based on field load testing. *Construction and Building Materials*, 116, 413-421.
- [27] Chen, W.F. (1982). *Plasticity in Reinforced Concrete*. New York, McGraw-Hill.
- [28] Yazdani, M. and Marefat, M.S. (2016). Assessment of Effects of the Number of Spans on Static Capacity of Six-Meter Plain Concrete Arch Bridges. *Concrete research journal*, 8(1), 71-84.
- [29] Ministry of roads and transportation. (2008). *Road and railway bridges seismic resistant design code (No. 463)*, Iran.
- [30] Roads, housing and urban development research center. (2015). *Iranian code of practice for seismic resistant design of buildings (standard No. 2800)*, Iran.
- [31] Naeim, F. (2001). *The Seismic Design Handbook*. New York, Chapman & Hall.