

شبیه‌سازی سه بعدی پل‌های قوسی بتنی غیر مسلح راه‌آهن جهت تخمین فرکانس‌های اصلی آنها بر اساس مشخصات هندسی و مکانیکی مختلف

عادل محمودی معظم

دانشجوی دکتری مهندسی زلزله، پژوهشگاه شاخص پروژه، اصفهان، ایران

نعمت حسنی

استاد مهندسی عمران، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

مهدی یزدانی *

استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران

چکیده

پل‌های قوسی بنایی به تعداد زیادی در شبکه راه‌آهن کشور موجود هستند که عمر بیشتر آنها بیش از هفتاد سال است. این پل‌ها نه تنها برای بارهای زلزله طراحی نشده‌اند، بلکه اخیراً نیز استفاده از قطارهای سریع‌السیر در شبکه راه‌آهن به مسئله مهمی تبدیل گشته است. برای این منظور محاسبه فرکانس‌های اصلی این سازه‌ها جهت تفسیر رفتار آنها در برابر زلزله‌ها و قطارهای سریع‌السیر یک امر ضروری به نظر می‌رسد. برای ارزیابی رفتار این پل‌ها به علت رفتار پیچیده آنها، نیاز به آزمایش‌های میدانی است. با توجه به تعدد این پل‌ها در شبکه راه‌آهن امکان انجام آزمایش‌های میدانی بر روی همه آنها وجود ندارد، از اینرو جهت 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 و مشخصات مکانیکی مصالح وجود دارد. در مطالعه حاضر با استفاده از نتایج میدانی انجام گرفته شده بر روی پل‌های قوسی، از روش اجزا محدود و نرم‌افزار انسیس جهت تحلیل سه بعدی ۶۴ مدل عددی به‌هنگام شده که دارای مشخصات هندسی و فیزیکی متفاوتی هستند، استفاده شده است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که تغییر شکل مودی اصلی این سازه‌ها در جهت طولی و عرضی آنها است. همچنین نتایج حاکی از آن است که فرکانس این پل‌ها کاملاً وابسته به طول دهانه آنها است، که در آن با افزایش طول دهانه و تعداد دهانه، فرکانس‌های اصلی این سازه‌ها کاهش می‌یابند. در انتها روابطی جهت محاسبه فرکانس‌های اصلی پل‌های قوسی بتنی غیر مسلح بر اساس تعداد دهانه (n) و طول دهانه (l) ارائه گردیده و با سایر مراجع مقایسه شده است. روابط پیشنهاد شده می‌تواند جهت بررسی تخمین سریع فرکانس‌های اصلی پل‌های قوسی بنایی استفاده گردد.

واژه‌های کلیدی: پل‌های قوسی بتنی غیر مسلح، شبیه‌سازی سه بعدی اجزا محدود، تحلیل مودال، فرکانس‌های اصلی.

۱- مقدمه

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 می‌دهند. 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.

علاوه بر تحقیقات گسترده در زمینه تخمین بار خرابی در حالت استاتیکی، تحقیقات گسترده‌ای نیز در حالت دینامیکی بر روی آنها صورت گرفته است. از جمله مهمترین آنها، تحقیقات برنسیچ می‌باشد [۱۴]. این محقق پل تانارو در ایتالیا که دارای ۱۸ دهانه است را تحلیل کرده است، وی با آزمایش‌هایی هم‌چون مغزه-گیری، چکش‌اشمیت و تست‌های صوت، خصوصیات مختلف پل را تخمین زده است. همچنین با انجام یک تست دینامیکی مشخصات دینامیکی سازه از جمله تغییر شکل مودی، درصد میرایی و فرکانس پنج مود اول را بدست آورده است. با توجه به مشخصات هندسی و فیزیکی پل، فرکانس اول کل پل را در حدود ۷ هرتز و میرایی را در حدود ۶ درصد تخمین زده است. همچنین نتایج وی نشان می‌دهد که در صورتی که قسمت پرکننده‌ها در مدل در نظر گرفته نشوند، فرکانس و میرایی پل کاهش می‌یابد. وی همچنین شکل مود اول پل‌های قوسی بنایی را در جهت طولی محاسبه نموده است. در کشور هند نیز با توجه به سابقه دیرینه شبکه راه‌آهن، پل‌های قوسی بنایی به تعداد بسیار زیادی موجود هستند. کیشن و همکارانش [۱۵] به مطالعه پل‌های قوسی آجری پرداخته‌اند. آنها بر روی یک پل دو دهانه با طول هر دهانه ۱۷/۵ متر آزمایش‌های مختلفی را انجام داده‌اند. در آزمایش دینامیکی با

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 بتوان یک مدل‌سازی مناسب انجام داد و رفتار دقیق این سازه‌های پر 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 مکره 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 [۱]. 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، فرهایی 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، چو 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. وی آزمایش‌های مختلفی را بر روی پل‌های قوسی سنگی جهت محاسبه بار سرویس و بار تخریب در حالت استاتیکی انجام داده 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 بوسی 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 دادند و اثرات تعداد دهانه بر مقاومت نهایی پل‌های قوسی آجری را بدست آوردند. اگرچه آزمایش آنها بر

و فرکانس‌های اصلی) پل‌های قوسی بتنی یک امر ضروری به نظر می‌رسد.

۲- با توجه به ورود قطارهای سریع‌السیر در کشور، داشتن اطلاعات کافی در مورد رفتار دینامیکی (میرایی و فرکانس‌های اصلی) این سازه‌ها پراهمیت گشته است.

پل‌های قوسی بتنی 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 گسترده‌ای بر روی آنها انجام شده است، که البته بیشتر آنها به صورت استاتیکی بوده است. در مورد پل‌های قوسی بتنی غیرمسلح با توجه به تعداد انگشت‌شمار آزمایش‌های میدانی، در این زمینه تحقیقات چندان زیادی انجام نشده است و فقط می‌توان به آزمایش معرفت و همکارانش در سال ۲۰۰۰ [۲۱] و عطایی و همکارانش در سال ۲۰۱۶ اشاره کرد [۲۲].

در مطالعه حاضر، با توجه به اهمیت بررسی رفتار دینامیکی پل‌های قوسی بتنی جهت ارزیابی رفتار آنها در برابر زلزله و حرکت قطارهای سریع‌السیر، به تحلیل مودال با استفاده از شبیه‌سازی سه بعدی و استفاده از روش اجزا محدود در نرم‌افزار انسیس 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 قوس و مشخصات مصالح، عوامل تاثیرگذار در پاسخ پل‌های قوسی بتنی هستند، بنابراین در گام دوم با تهیه ۶۴ مدل عددی، اثر طول دهانه، اثر تعداد دهانه و اثر مشخصات مکانیکی مصالح بر فرکانس‌های اصلی و تغییرشکل مودی این سازه‌ها پرداخته شده است. برای این منظور در بخش بعدی پژوهش حاضر، خلاصه‌ای از نتایج آزمایشگاهی انجام گرفته شده بر روی پل‌های قوسی بتنی غیرمسلح ارائه می‌گردد. در بخش سوم به مدل‌سازی و به‌هنگام کردن نتایج پرداخته خواهد شد. در بخش چهارم به دسته‌بندی مدل‌های تهیه شده و پیشنهاد روابطی جهت تخمین فرکانس‌های اصلی این سازه‌ها پرداخته می‌شود و نهایتاً در بخش پنجم و آخر مقاله نیز نتایج استخراج شده از تحقیق حاضر ارائه می‌گردد.

عبور قطار با سرعت‌های مختلف، فرکانس پل و ضریب تقویت دینامیکی را بدست آورده‌اند. آنها نشان دادند که فرکانس پل موجود در حدود ۵ الی ۱۰ هرتز می‌باشد. تحقیقات دیگری که در مورد ارزیابی رفتار دینامیکی پل‌های قوسی بتنی انجام شده است مربوط به تحقیقات بایراکتارو همکارانش در کشور ترکیه می‌باشد [۱۶-۱۷]. آنها ابتدا در تحقیقات خود با استفاده از آزمایش‌های 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. همچنین نتایج آنها نشان می‌دهد که این سازه‌ها دارای سه تغییرشکل مودی اصلی از جمله مود خمشی و مود قائم به‌عنوان مودهای درون صفحه‌ای و مود پیچشی به‌عنوان مود خارج صفحه‌ای هستند. در ادامه بعد از محاسبه مشخصات دینامیکی پل، با استفاده از مدل سه بعدی و نرم‌افزار انسیس به این نتیجه رسیده‌اند که چنانچه در فرایند مدل‌سازی، عملیات به‌هنگام‌سازی در مدل انجام نگیرد، نتایج حاصل تا ۲۰ درصد خطا خواهد داشت. در ایران نیز مطالعات محدودی در مورد رفتار پل‌های قوسی بتنی انجام گرفته است که می‌توان از بین آنها به مطالعات معرفت و همکاران اشاره نمود. آنها با مطالعه مودی بر روی دو پل قوسی راه‌آهن و با استفاده از مدل‌سازی اجزا محدود، رفتار این پل‌ها را به‌صورت دوبعدی در نظر گرفته‌اند و رفتار دینامیکی آنها را بررسی کرده‌اند [۱۸]. علاوه بر تحقیقات ذکر شده، مطالعات دیگری در زمینه ارزیابی لرزه‌ای این پل‌ها تحت اثر نیروی زلزله [۱۹] و بررسی رفتار این سازه‌ها تحت اثر بار قطار صورت گرفته است که می‌توان به مراجع [۲۰] اشاره کرد.

با توجه به تعداد زیاد پل‌های قوسی در شبکه راه‌آهن کشور، در سال‌های اخیر ارزیابی رفتاری این پل‌ها به دو دلیل عمده بسیار مورد توجه قرار گرفته است که عبارتند از:

۱- با توجه به قدمت بیش از هفتاد سال این سازه‌ها و عدم وجود آیین‌نامه‌های لرزه‌ای در آن زمان، این پل‌ها برای بارهای زلزله طراحی نشده‌اند. بنابراین جهت ارزیابی لرزه‌ای این سازه‌ها، تحلیل‌های دینامیکی جهت شناخت مشخصات دینامیکی (میرایی

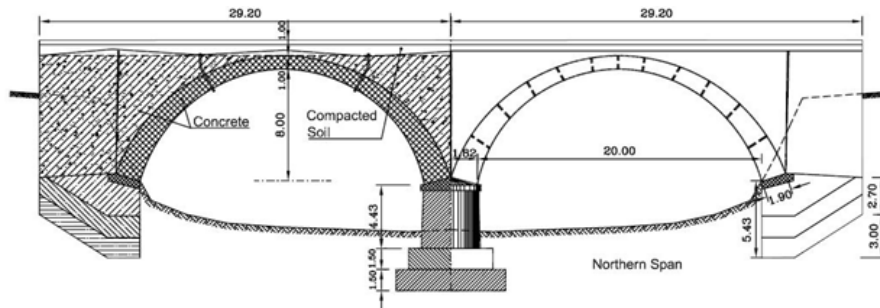
۲- نتایج میدانی

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.

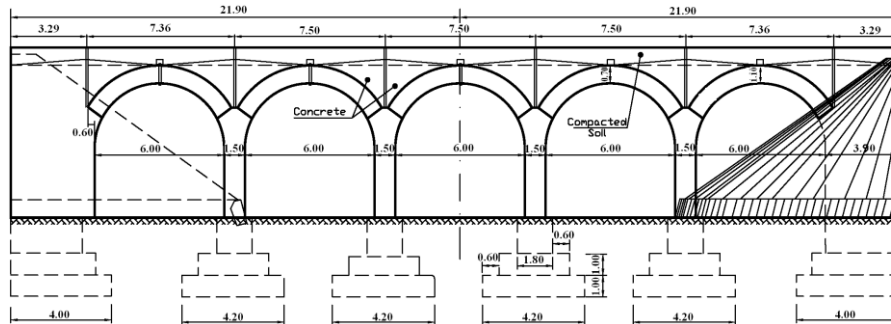
هدف از این آزمایش‌ها، تعیین ضریب ضربه دینامیکی قطار در سرعت‌های مختلف، فرکانس‌های طبیعی سازه و برآوردی از میرایی سازه بوده است. در جدول (۳) فرکانس سه مود اول این پل‌ها که در آزمایش‌های میدانی به دست آمده‌اند، ارائه شده است. لازم به ذکر است که در آزمایش دینامیکی، فرکانس طبیعی پل با استفاده از تحلیل تابع چگالی متقاطع به دست آمده از آزمایش عبور دیزل و ضربه بر روی پل و از پردازش سیگنال‌های دینامیکی به دست آمده است که در مرجع [۲۱] به صورت کامل جزئیات آن ارائه گشته است.

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 به صورت دینامیکی بر روی پل‌های قوسی بتنی غیرمسلح انجام شده است، آزمایش‌های معرفت و همکاران در سال ۲۰۰۰ است، که بر روی دو پل با مشخصات هندسی متفاوت انجام شده است. در این بخش خلاصه‌ای از نتایج این آزمایش‌ها که در مطالعه حاضر از آن استفاده گردیده است، بیان می‌شود [۲۱].

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



(الف)



(ب)

شکل ۱- مقطع طولی پل‌ها [۲۱]. (الف) کیلومتر ۲۳ و (ب) کیلومتر ۲۴

جدول ۱- مشخصات هندسی پل‌ها [۲۱]

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 بدست آماده از آزمایش مغزه‌گیری [۲۱]

عنوان	مقاومت فشاری بتن (MPa)		مدول الاستیسیته (GPa)		وزن مخصوص (kg/m ³)	
	۲۳ کیلومتر	۲۴ کیلومتر	۲۳ کیلومتر	۲۴ کیلومتر	۲۳ کیلومتر	۲۴ کیلومتر
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

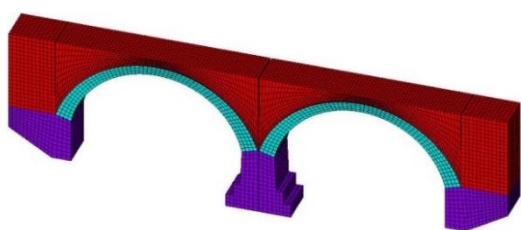
جدول ۳- فرکانس سه مود اول دو پل در آزمایش دینامیکی بر حسب هرترتز [۲۱]

عنوان	مد اول	مد دوم	مد سوم
آزمایش عبور دیزل، پل ۲۳ کیلومتر	۳/۵	۵/۹	۸/۶
آزمایش ضربه، پل ۲۳ کیلومتر	۴/۹	۹/۸	۱۲/۷
آزمایش عبور دیزل، پل ۲۴ کیلومتر	۱۴/۶	۲۱/۵	۲۶/۴

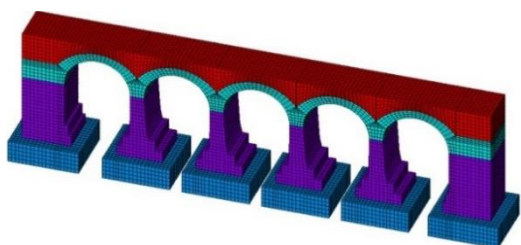
۳- شبیه‌سازی عددی

فرایند به‌هنگام سازی انتخاب گردیده‌اند و آنچنان تغییر داده شده- اند که فرکانس‌های اصلی مدل و آزمایش یکسان گردند. نهایتاً در شکل (۲) مدل نهایی پل‌های ۲۳ و ۲۴ و در جدول (۴) مشخصات مکانیکی مصالح مورد استفاده ارائه شده است. در ادامه فرکانس‌های اصلی محاسبه شده در شبیه‌سازی عددی در جدول (۵) با نتایج آزمایشگاهی مقایسه گردیده است. علاوه بر مقادیر فرکانس اصلی پل‌ها، به ترتیب در شکل (۳) و (۴) تغییر شکل مودی برای پل‌های ۲۳ و ۲۴ ارائه شده است.

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. 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 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 استفاده از المان‌های مکعبی هشت گره‌ای در روش اجزا محدود و در نرم‌افزار انسیس 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 پارامترهای نامعین موجود در مسئله همچون شرایط مرزی مدل و مشخصات مکانیکی خاک زیر پل به عنوان پارامترهای متغیر در



(الف)



(ب)

شکل ۲- مدل‌سازی سه بعدی پل‌ها با استفاده از روش اجزا محدود. (الف) پل ۲۳ کیلومتر و (ب) پل ۲۴ کیلومتر

جدول ۴- مشخصات نهایی مصالح مورد استفاده در شبیه‌سازی عددی

عنوان	مدول الاستیسیته (GPa)		ضریب پواسون		وزن مخصوص (kg/m^3)	
	۲۳ کیلومتر	۲۴ کیلومتر	۲۳ کیلومتر	۲۴ کیلومتر	۲۳ کیلومتر	۲۴ کیلومتر
بتن پرکننده	۲۰/۲	۱۰/۹	۰/۲۱	۰/۲۹	۲۳۰۰	۲۲۱۷
قوس	۱۷	۲۴/۹	۰/۲۱	۰/۱۷	۲۲۸۰	۲۲۹۰
پایه	۳۷/۳	۳۶/۵	۰/۱۹	۰/۱۸	۲۳۵۰	۲۲۵۰
خاک	۰/۷	۰/۹	۰/۳۳	۰/۳۳	۱۸۰۰	۲۰۰۰

۴- مطالعات 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 پل 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 تعداد دهانه‌های مختلف پیشنهاد داده‌اند [۱۶]. در نظر گرفتن همه عوامل طول دهانه، تعداد دهانه، مشخصات هندسی پل و مشخصات مکانیکی مصالح در یک پژوهش نیاز به جمع‌آوری اطلاعات وسیعی از مشخصات پل‌ها دارد. برای این منظور در گزارش حاضر برخی از عوامل مذکور جهت بررسی رفتار پل‌های قوسی بتنی غیرمسلح به منظور محاسبه فرکانس اصلی آنها در نظر گرفته می‌شود. با توجه به اینکه در بخش قبلی از فرایند شبیه‌سازی، دو پل ۲۳ و ۲۴ کیلومتر ۲۴ کیلومتر سنجی قرار گرفتند، در بخش حاضر ۶۴ 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- مشخصات مکانیکی مصالح 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 [۱۵]، ۲۱-۲۲]. برای این منظور جهت بررسی اثر مشخصات مصالح این سازه‌ها بر پاسخ آنها، در مطالعه حاضر از چهار نوع مصالح در فرایند شبیه‌سازی استفاده شده است که در جدول (۶) نمایش داده شده است. لازم به ذکر است که علاوه بر پل‌های ۲۳ کیلومتر و ۲۴، از مشخصات مکانیکی پل صالح که در سال ۲۰۱۶ توسط مرجع [۲۲] مورد آزمایش میدانی قرار گرفته است، نیز استفاده شده است.

جدول ۵- فرکانس محاسبه شده پل‌ها در شبیه‌سازی عددی

برحسب هر تر

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

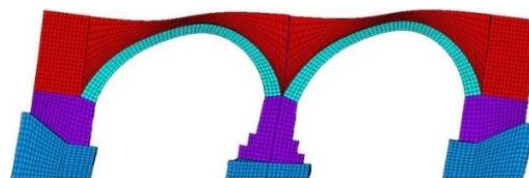
۴-۲- مشخصات مکانیکی خاک زیر سازه

همان‌گونه که مشخص است نوع مشخصات مکانیکی خاک زیر سازه بر روی مشخصات دینامیکی سازه اثرگذار است. مطابق استاندارد ۲۸۰۰ چنانچه سختی خاک زیر سازه کاهش پیدا نماید، فرکانس‌های اصلی سازه نیز کاهش می‌یابند [۲۳]. از اینرو جهت تخمین فرکانس پل‌های قوسی بنایی در نظر گرفتن اثر مشخصات مکانیکی خاک ضروری به نظر می‌رسد.

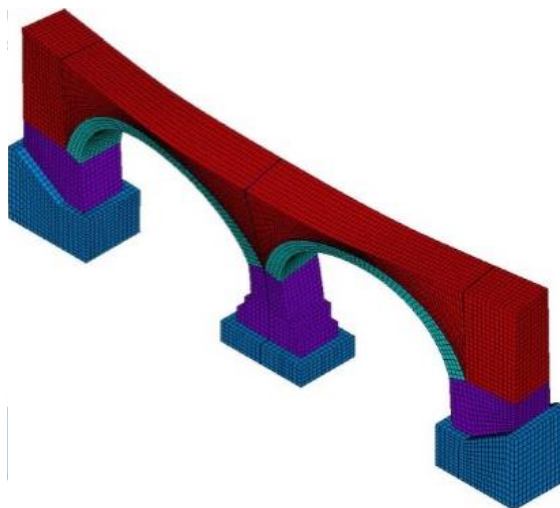
در یک دسته‌بندی کلی، مطابق استاندارد ۲۸۰۰ سازه‌ها می‌توانند بر روی چهار نوع خاک قرار گیرند و براساس سرعت موج برشی در خاک تقسیم‌بندی می‌شوند. با توجه به مشخصات مکانیکی خاک‌های مورد استفاده در پل ۲۳ و ۲۴ که در فرایند به‌هنگام‌سازی مدل‌های عددی به دست آمده‌اند، سرعت موج برشی در آنها به ترتیب برابر $708m/s$ و $624m/s$ برای پل ۲۳ و ۲۴ محاسبه می‌شوند. مطابق استاندارد ۲۸۰۰ برای خاک‌هایی که سرعت موج برشی در آنها در فاصله $(375m/s \leq v \leq 750m/s)$ قرار دارد، جزء خاک‌های خیلی سخت هستند و با خاک نوع II اسم‌گذاری می‌گردند. برای این منظور علاوه بر خاک‌های مذکور، مشخصات مکانیکی خاک‌های متوسط و یا نوع III با سرعت موج برشی $(175m/s \leq v \leq 375m/s)$ در شبیه‌سازی عددی جهت انجام مطالعه پارامتریک نیز استفاده می‌گردد. بنابراین مشخصات مکانیکی خاک‌های مورد نظر در مطالعه حاضر در جدول (۷) نمایش داده شده است.

۴-۳- اثر 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 فرکانس‌های اصلی آنها ضروری است. در مطالعه حاضر با توجه به اینکه این پل‌ها معمولاً دارای تعداد دهانه ۱ تا ۱۰ هستند، پل‌های ۲۳ و ۲۴ با تعداد دهانه‌های ۱، ۲، ۳ و ۵ مورد مطالعه پارامتریک در فرایند شبیه‌سازی عددی قرار می‌گیرند. از طرفی دیگر برای اینکه بتوان رابطه‌ای را برای فرکانس‌های اصلی پل‌های قوسی بنایی پیشنهاد کرد، بهتر است همه مدل‌ها نسبت به مدل یک دهانه‌ای مقیاس شوند. بنابراین در نظر گرفتن اثر تعداد دهانه از این جنبه نیز حائز اهمیت است.

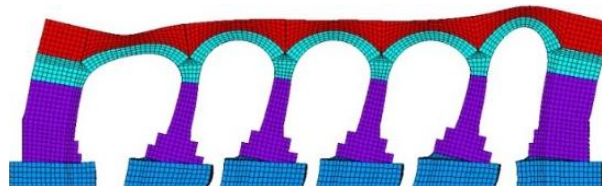


(الف)

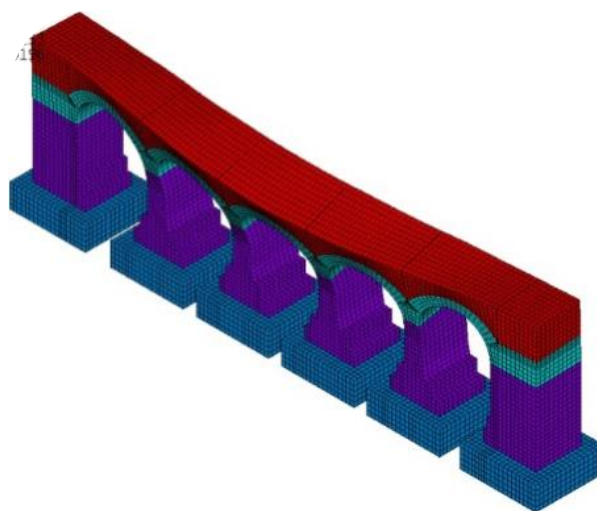


(ب)

شکل ۳- تغییر شکل مودی پل ۲۳ کیلومتر. (الف) مود طولی (درون صفحه‌ای) و (ب) مود عرضی (برون صفحه‌ای)



(الف)



(ب)

شکل ۴- تغییر شکل مودی پل ۲۴ کیلومتر. (الف) مود طولی (درون صفحه‌ای) و (ب) مود عرضی (برون صفحه‌ای)

۴-۴- اثر طول دهانه

مطابق تحقیقات انجام شده در زمینه پل‌های قوسی بنایی، طول دهانه پارامتر بسیار مهمی جهت محاسبه پاسخ سازه است. در تحقیقات مختلفی روابطی بر اساس طول دهانه جهت محاسبه ظرفیت استاتیکی، ضریب میرایی، فرکانس مود اول، جابجایی کلید قوس و غیره ارائه شده است که می‌توان از میان آنها به برخی از مراجع [۴ و ۱۷] 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 یکسان 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 [۲۱-۲۳]

عنوان	شماره مصالح	اسم 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	۲۳۸۰	۲۶۳۰
	۴	میانگین	۲۲۸۲	۲۳۱۷	۲۴۱۰

۴-۵- مشخصات مدل‌های مورد بررسی

مطابق توضیحات ارائه شده در قسمت‌های قبلی در مجموع ۶۴ مدل عددی مطابق با جداول (۸) و (۹) تهیه گردیده است. مطابق دو مدل اولیه صحت‌سنجی شده، سایر مدل‌های دیگر تهیه گردیده‌اند و با انجام تحلیل مودال، دو فرکانس اصلی آنها که در جهت طولی و عرضی هستند محاسبه شده است و مقادیر آن در جدول (۱۰) گزارش شده است. برای درک بهتر جدول (۱۰)، اشکال (۵) و (۶) رسم گردیده‌اند. همان‌طور که دیده می‌شود، تعداد دهانه و مشخصات مکانیکی مصالح نسبت به سایر پارامترهای مورد بررسی دارای تاثیر کمتری هستند. بنابراین می‌توان برای حالتی که مشخصات مکانیکی مصالح به کار برده شده، میانگین مشخصات مکانیکی مصالح (ماده شماره ۴) و تعداد دهانه برابر یک هستند،

اگرچه تاکنون مطالعات انجام شده بر روی محاسبه فرکانس‌های اصلی پل‌های قوسی بنایی فقط بر اساس طول دهانه آنها بوده است، اما می‌توان علاوه بر طول دهانه سایر پارامترهای موثر بر فرکانس را بررسی نمود.

به عنوان نمونه پل‌های قوسی بنایی مشابه تیرهای سرتاسری عمل می‌کند، که در آن هر چقدر تعداد دهانه‌ها بیشتر باشد، سختی آنها کاهش یافته و متعاقباً فرکانس آنها نیز کاهش می‌یابد. مطابق اشکال (۵) و (۶) مشاهده می‌گردد که با افزایش تعداد دهانه‌ها، فرکانس‌های اصلی می‌توانند تا ۵۰ درصد کاهش پیدا کنند، بنابراین با فرض اینکه n تعداد دهانه پل‌های قوسی بتنی غیرمسلح است، روابط (۱) و (۲) را می‌توان به صورت روابط زیر با در نظر گرفتن تعداد دهانه بازنویسی کرد.

$$f_I(l, n) = \frac{400(1-0.2\ln(n))}{9} e^{-0.1048l} \quad (۳)$$

$$f_{II}(l, n) = \frac{4500(1-0.15\ln(n))}{9} l^{-1.4328} \quad (۴)$$

روابط (۳) و (۴) در شکل (۸) نیز نمایش داده شده‌اند.

رابطه‌ای عمومی که بتوان آن را برای سایر پل‌های قوسی بتنی غیرمسلح استفاده نمود، ارائه کرد. مطابق شکل (۷) می‌توان رابطه‌های (۱) و (۲) را جهت فرکانس‌های مود اول (مود طولی) و دوم (عرضی) پل‌های قوسی بتنی غیرمسلح به ازای طول دهانه (l) ارائه نمود:

$$f_I(l) = \frac{400}{9} e^{-0.1048l} \quad (۱)$$

$$f_{II}(l) = \frac{4500}{9} l^{-1.4328} \quad (۲)$$

در روابط (۱) و (۲) f_I و f_{II} فرکانس مود اول و دوم پل‌های قوسی بتنی غیرمسلح بر حسب هرتز است که در شکل (۷) رسم گردیده‌اند و نتایج آنها با نتایج سایر مراجع [۱۴-۱۶، ۲۴-۲۷] مقایسه شده است. در مراجع مذکور، مطالعات سویم و همکاران برای پل‌های قوسی سنگی عابر پیاده، مطالعات فریبا برای پل‌های بتنی راه‌آهن و نتایج آزمایشگاهی مربوط به مطالعه چندین محقق مستقل است که آزمایش‌هایی را بر روی پل‌های قوسی سنگی، آجری و بتنی غیرمسلح با کاربری‌های متفاوت انجام داده‌اند.

جدول ۷- مشخصات خاک مورد استفاده در شبیه‌سازی عددی جهت مطالعه پارامتریک

پل	مدول الاستیسیته (GPa)		ضریب پواسون		وزن مخصوص (kg/m^3)		سرعت موج برشی (m/s)	
	خاک نوع II	خاک نوع III	خاک نوع II	خاک نوع III	خاک نوع II	خاک نوع III	خاک نوع II	خاک نوع III
کیلومتر ۲۳	۰/۷	۰/۲	۰/۳۳	۰/۳۳	۱۸۰۰	۱۸۰۰	۶۲۴	۳۳۳
کیلومتر ۲۴	۰/۹	۰/۲	۰/۳۳	۰/۳۳	۲۰۰۰	۲۰۰۰	۷۰۸	۳۳۳

۶-۴- مقایسه نتایج

عرضی و به صورت خارج از صفحه‌ای است.

۳- با افزایش طول دهانه، فرکانس اصلی پل‌های قوسی بتنی غیرمسلح کاهش می‌یابد.

۴- شبیه‌سازی پل‌های قوسی بتنی غیرمسلح به صورت دوبعدی سبب صرف نظر کردن از مود اصلی خارج از صفحه می‌گردد که این امر در بررسی رفتار این سازه‌ها تحت اثر بار زلزله، منجر به نتایج نادرست می‌گردد.

۵- با افزایش تعداد دهانه، فرکانس اصلی پل‌های قوسی بتنی غیرمسلح کاهش می‌یابد.

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

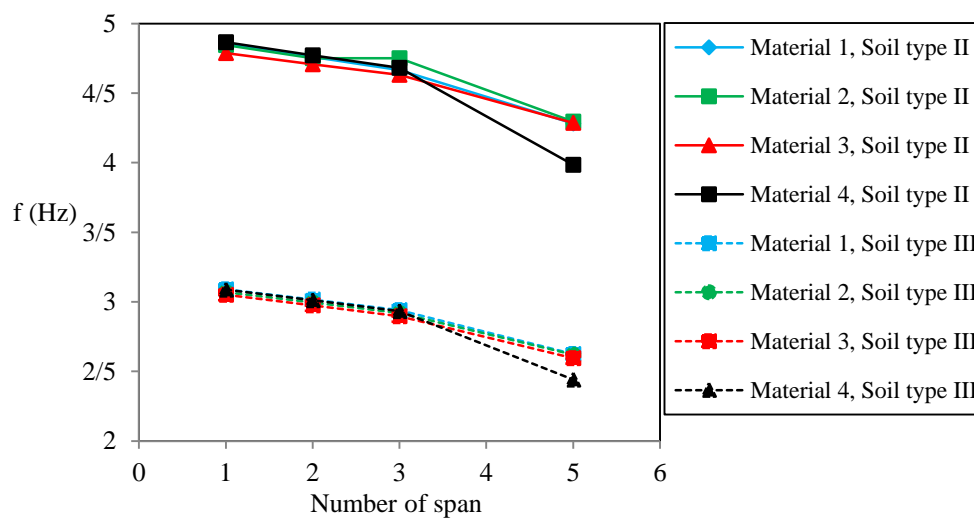
۱- علی‌رغم مطالعه پارامترهای طول دهانه، تعداد دهانه، مشخصات مکانیکی مصالح و نوع خاک، مهمترین پارامتر موثر بر فرکانس پل‌های قوسی بتنی غیرمسلح طول دهانه می‌باشد.

۲- تغییر شکل مود اول پل‌های قوسی بتنی غیرمسلح در جهت طولی و به صورت درون صفحه‌ای و تغییر شکل مود دوم آنها در جهت

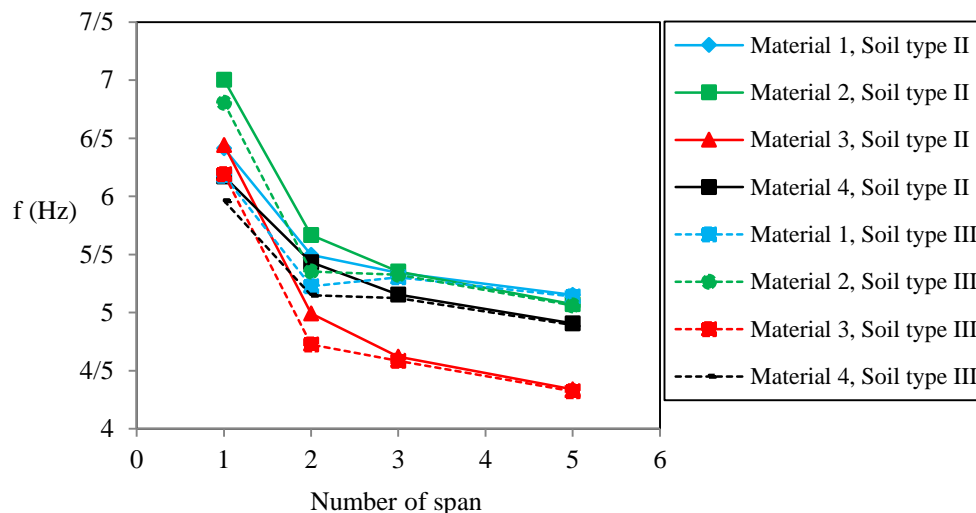
- ۶- با افزایش سختی مصالح، فرکانس اصلی پل‌های قوسی بتنی غیرمسلح افزایش می‌یابد، اما اثر آن بر رفتار پل‌های قوسی بتنی غیرمسلح قابل نظر کردن است.
- ۷- با افزایش سختی خاک، فرکانس اصلی پل‌های قوسی بتنی غیرمسلح افزایش می‌یابد، اما اثر آن بر رفتار پل‌های قوسی بتنی غیرمسلح قابل نظر کردن است.
- ۸- علی‌رغم اینکه پارامترهای نوع خاک و مشخصات مکانیکی مصالح بر رفتار کلی پل‌های قوسی بتنی صرف نظر گردیدند، در فرایند شبیه‌سازی و به‌هنگام کردن مدل‌ها در نظر گرفتن آنها بسیار حائز اهمیت است.
- ۹- روابط پیشنهادی جهت محاسبه فرکانس‌های اصلی پل‌های قوسی بتنی غیرمسلح با سایر روابط موجود هم‌خوانی مناسبی دارند.

جدول ۸- مشخصات مدل‌های مد نظر جهت مطالعه پارامتریک در پل کیلومتر ۲۳ (دهانه ۲۰ متری)

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

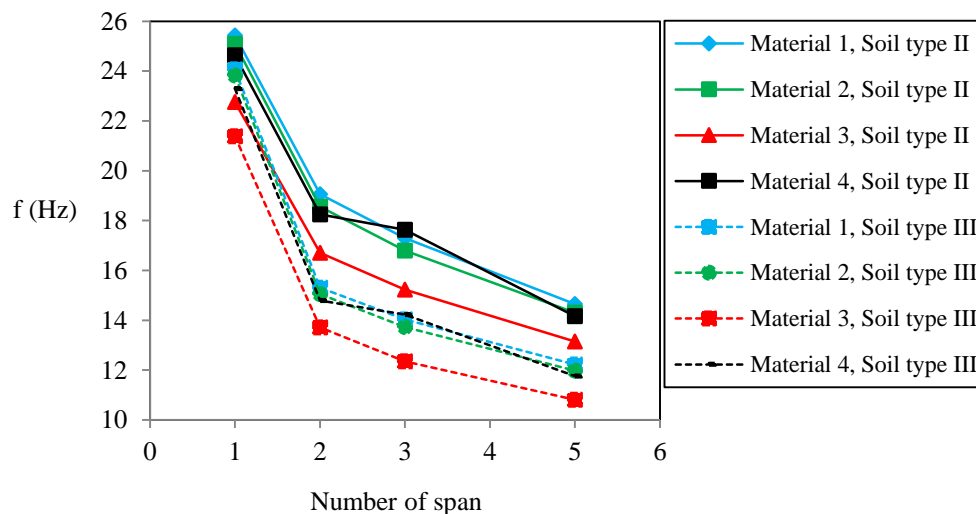


(الف)

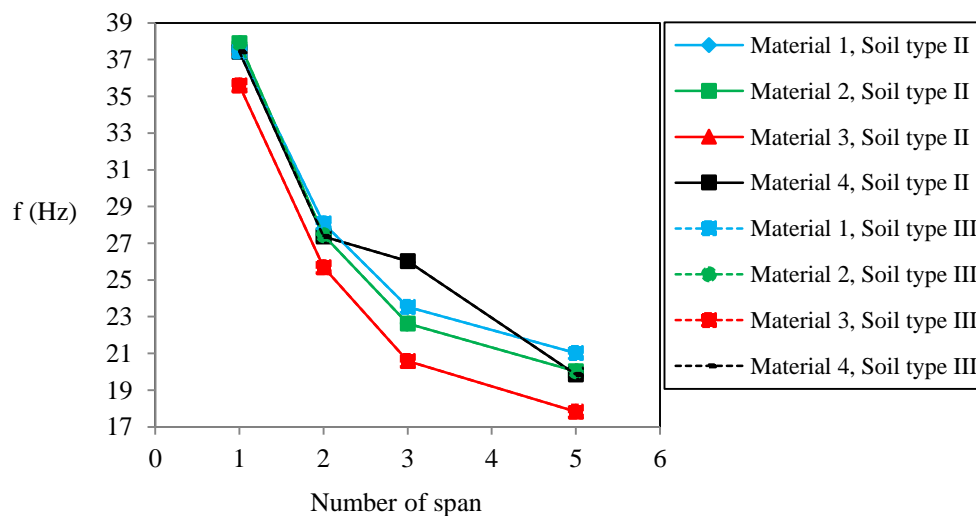


(ب)

شکل ۵- فرکانس های محاسبه شده در مطالعه پارامتریک پل کیلومتر ۲۳. (الف) مود اول (طولی) و (ب) مود دوم (عرضی)



(الف)



(ب)

شکل ۶- فرکانس های محاسبه شده در مطالعه پارامتریک پل کیلومتر ۲۴. (الف) مود اول (طولی) و (ب) مود دوم (عرضی)

جدول ۹- مشخصات مدل‌های مد نظر جهت مطالعه پارامتریک در پل کیلومتر ۲۴ (دهانه ۶ متری)

شماره مدل	شماره مصالح	نوع خاک	تعداد دهانه	شماره مدل	شماره مصالح	نوع خاک	تعداد دهانه
۳۳	۱	خاک نوع II	۱	۴۹	۱	خاک نوع III	۱
۳۴	۱	خاک نوع II	۲	۵۰	۱	خاک نوع III	۲
۳۵	۱	خاک نوع II	۳	۵۱	۱	خاک نوع III	۳
۳۶	۱	خاک نوع II	۵	۵۲	۱	خاک نوع III	۵
۳۷	۲	خاک نوع II	۱	۵۳	۲	خاک نوع III	۱
۳۸	۲	خاک نوع II	۲	۵۴	۲	خاک نوع III	۲
۳۹	۲	خاک نوع II	۳	۵۵	۲	خاک نوع III	۳
۴۰	۲	خاک نوع II	۵	۵۶	۲	خاک نوع III	۵
۴۱	۳	خاک نوع II	۱	۵۷	۳	خاک نوع III	۱
۴۲	۳	خاک نوع II	۲	۵۸	۳	خاک نوع III	۲
۴۳	۳	خاک نوع II	۳	۵۹	۳	خاک نوع III	۳
۴۴	۳	خاک نوع II	۵	۶۰	۳	خاک نوع III	۵
۴۵	۴	خاک نوع II	۱	۶۱	۴	خاک نوع III	۱
۴۶	۴	خاک نوع II	۲	۶۲	۴	خاک نوع III	۲
۴۷	۴	خاک نوع II	۳	۶۳	۴	خاک نوع III	۳
۴۸	۴	خاک نوع II	۵	۶۴	۴	خاک نوع III	۵

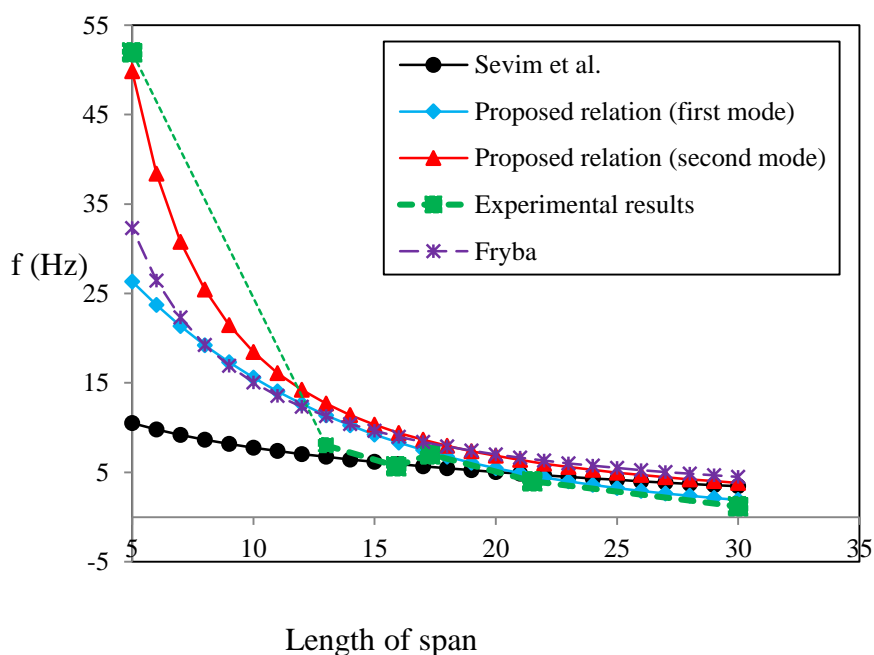
۵- نتیجه گیری

شده بر روی پل‌های قوسی بتنی غیر مسلح، از روش اجزا محدود در نرم‌افزار انسیس جهت تحلیل سه بعدی ۶۴ مدل عددی به‌هنگام شده که دارای مشخصات هندسی و فیزیکی متفاوتی هستند، استفاده گردید. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که تغییر شکل مودی اصلی این سازه‌ها در جهت طولی و عرضی آنها می‌باشد. همچنین نتایج حاکی از آن است که فرکانس این پل‌ها کاملاً وابسته به طول دهانه پل می‌باشد، که در آن با افزایش طول دهانه فرکانس‌های اصلی پل کاهش می‌یابند. برای همین منظور روابطی برحسب طول دهانه و تعداد دهانه جهت محاسبه فرکانس‌های اصلی پل‌های قوسی بتنی غیرمسلح با دهانه‌های متوسط ارائه گردید. روابط پیشنهاد شده نیز از همپوشانی مناسبی با سایر روابط ارائه شده در تحقیقات گذشته برخوردار هستند.

پل‌های قوسی بتنی غیرمسلح به تعداد زیادی در شبکه خطوط راه آهن کشور موجود می‌باشند که عمر بیشتر آنها بیش از هفتاد سال است. این پل‌ها نه تنها برای بارهای زلزله طراحی نشده‌اند، بلکه در سال‌های اخیر استفاده از قطارهای سریع‌السیر در شبکه راه‌آهن کشور به یک مسئله مهم تبدیل گشته است. بنابراین محاسبه و تخمین فرکانس‌های اصلی این سازه‌ها جهت تفسیر رفتار آنها در برابر زلزله‌ها و قطارهای سریع‌السیر یک امر ضروری به نظر می‌رسد. با توجه به رفتار پیچیده پل‌های قوسی بتنی غیرمسلح، جهت بررسی و مطالعه رفتار این پل‌ها نیاز به شبیه‌سازی دقیق می‌باشد. برای اینکه بتوان رفتار این پل‌ها را بهم مربوط کرد 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

جدول ۱۰- فرکانس محاسبه شده در شبیه‌سازی عددی (هرتز)

شماره مدل	مود طولی	مود عرضی	شماره مدل	مود طولی	مود عرضی	شماره مدل	مود طولی	مود عرضی	شماره مدل	مود طولی	مود عرضی
۱	4.2817	6.4136	۱۷	2.6248	6.1778	۳۳	25.425	37.443	۴۹	24.073	37.442
۲	4.6651	5.4964	۱۸	2.9409	5.2249	۳۴	19.064	28.08	۵۰	15.306	28.079
۳	4.7597	5.3405	۱۹	3.0163	5.3045	۳۵	17.296	23.533	۵۱	14.039	23.531
۴	4.8574	5.1512	۲۰	3.0906	5.1372	۳۶	14.656	21.015	۵۲	12.228	21.013
۵	4.2949	7.0034	۲۱	2.6202	6.8054	۳۷	25.09	37.886	۵۳	23.826	37.886
۶	4.6586	5.6659	۲۲	2.9195	5.353	۳۸	18.553	27.433	۵۴	15.049	27.432
۷	4.7509	5.3542	۲۳	2.9948	5.3259	۳۹	16.799	22.631	۵۵	13.733	22.629
۸	4.8459	5.0718	۲۴	3.0694	5.0612	۴۰	14.304	20.032	۵۶	11.975	20.03
۹	4.2859	6.441	۲۵	2.5949	6.1911	۴۱	22.754	35.601	۵۷	21.384	35.6
۱۰	4.6314	4.9919	۲۶	2.8957	4.7249	۴۲	16.709	25.686	۵۸	13.71	25.684
۱۱	4.7073	4.6195	۲۷	2.9736	4.5832	۴۳	15.227	20.586	۵۹	12.349	20.583
۱۲	4.7881	4.3379	۲۸	3.0497	4.3232	۴۴	13.153	17.826	۶۰	10.811	17.823
۱۳	3.9848	6.1702	۲۹	2.441	5.9621	۴۵	24.638	37.422	۶۱	23.302	37.421
۱۴	4.6823	5.4336	۳۰	2.9323	5.1491	۴۶	18.254	27.368	۶۲	14.79	27.366
۱۵	4.771	5.1557	۳۱	3.0102	5.1229	۴۷	17.635	26.021	۶۳	14.227	26.019
۱۶	4.8654	4.9056	۳۲	3.0876	4.8929	۴۸	14.159	19.851	۶۴	11.761	19.848



شکل ۷- روابط پیشنهاد شده جهت محاسبه فرکانس‌های اصلی پل‌های قوسی بتنی غیر مسلح و مقایسه آن با سایر مراجع

applications", Journal of Bridge Engineering, 9, 591-598, 2004.

[9] Brencich, A. and Francesco, U.D. "Assessment of Multi-span Masonry Arch Bridges. I: Simplified Approach", Journal of bridge engineering, 9(6): 582-590, 2004.

[10] A. Cavicchi, L. Gambarotta, "Collapse analysis of masonry bridges taking into account arch-fill interaction", Engineering Structures, 27, 605-615, 2005.

[11] G.A. Drosopoulos, G.E. Stavroulakis, C.V. Massalas, "FRP reinforcement of stone arch bridges: Unilateral contact models and limit analysis", Composites Part B: Engineering, 38, 144-151, 2007.

[12] A. Carpinteri, G. Lacidogna, F. Accornero, "Evolution of the fracturing process in masonry arches", Journal of Structural Engineering (United States), 141, 2015.

[13] C. Costa, A. Arêde, A. Costa, E. Caetano, A. Cunha, F. Magalhaes, "Updating Numerical Models of Masonry Arch Bridges by Operational Modal Analysis", International Journal of Architectural Heritage, 9, 760-774 2015.

[14] Brencich, A. and Sabia, D. "experimental identification of a multi-span masonry bridge: the tanaro bridge", Construction and Building Materials, No. 22, pp. 2087 – 2099, 2008.

[15] J.M.C. Kishen, A. Ramaswamy, C.S. Manohar, "Safety assessment of a masonry arch bridge: Field testing and simulations", Journal of Bridge Engineering, 18, 162-171, 2013.

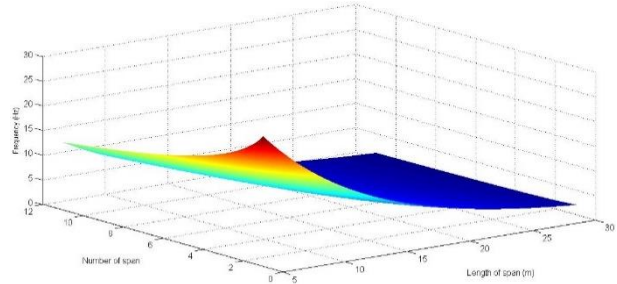
[16] Bayraktar, A. Althnisik, A. C. Birinci, F. Sevim, B. Turker, T. "finite-element analysis and vibration testing of a two-span masonry arch bridge", journal of performance of, constructed facilities, 24 (1): 46-52, 2010.

[17] A. Bayraktar, T. Türker, A.C. "Altunişik, Experimental frequencies and damping ratios for historical masonry arch bridges", Construction and Building Materials, 75, 234-241, 2015.

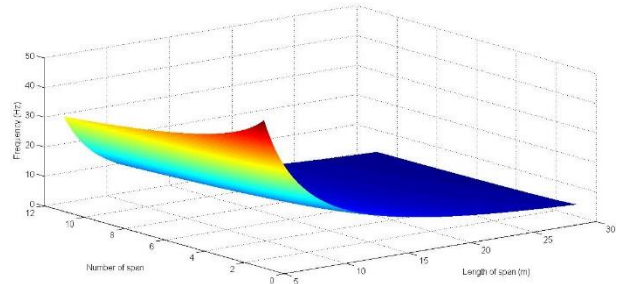
[18] Yazdani, M. Marefat, M.S. " Dynamic load testing and FE model updating based on frequency response of a plain concrete arch bridge ", 9th International Congress on Civil Engineering, Isfahan University of Technology (IUT), Isfahan, Iran, May 8-10, 2012.

[19] Yazdani, M. Marefat, M.S. "seismic assessment of six meter spans plain concrete arch bridge", journal of seismology and earthquake engineering (JSEE), 1, 72-82, 2013.

[۲۰] یزدانی، مهدی و معرفت، محمدصادق. " بررسی اثر رفتار دینامیکی بار قطار بر روی پاسخ پل های قوسی بتنی غیر مسلح در



(الف)



(ب)

شکل ۸- تغییرات فرکانس پل های قوسی بتنی غیر مسلح بر حسب طول دهانه و تعداد دهانه (الف) فرکانس مود اول و (ب) فرکانس مود دوم

۶- مراجع

- [1] Page, J. "masonry arch bridges", TRL State of the art review, London, 1993.
- [2] Fanning, P.J. and Boothby, T.E. "three-dimensional modeling and full-scale testing of stone arch bridges", computers and structures, no. 79, pp. 2645 – 2662, 2001.
- [3] P.J. Fanning, T.E. Boothby, B.J. Roberts, "Longitudinal and transverse effects in masonry arch assessment", Construction and Building Materials, 15, 51-60, 2001.
- [4] Melbourne, C. Gilbrt, M. "the behaviour of multiring brickwork arch bridges", structural engineering, 73 (3), 1995.
- [5] Melbourne, C. Gilbrt, M. Wagstaff, M. "the collapse behavior of mulispan brickworck arch bridges", structural engineering, 75 (17): 297-304, 1997.
- [6] Royles, R. Hendry, A. W. "model tests on masonry arches", proc. instn civ. engrs & bldgs, 299-321, 1992.
- [7] Artega, I. Morer, P. "the effect of geometry on the structural capacity of masonry arch bridges", construction and building materials, 4, 97-106, 2012.
- [8] A. Brencich, U. De Francesco, "Assessment of multispan masonry arch bridges. II: Examples and

حوزه فرکانس"، مجله علمی ترویجی صوت و ارتعاش، دوره سوم، شماره ۶، صفحه ۴۳-۵۰، ۱۳۹۳.

[21] Marefat, M. S. Ghahremani-Gargary, E. and Ataei, Sh. "load test of a plain concrete arch railway bridge of 20-m span", construction and building materials, no.18, pp. 661 – 667, 2004.

[22] S. Ataei, M. Jahangiri Alikamar, V. Kazemiashtiani, "Evaluation of axle load increasing on a monumental masonry arch bridge based on field load testing", Construction and Building Materials, 116, 413-421, 2016.

[۲۳] وزارت راه و شهرسازی، "آیین نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله"، استاندارد ۲۸۰۰، ۱۳۹۲.

[24] D.M. Armstrong, A. Sibbald, C.A. Fairfield, M.C. Forde, "Modal analysis for masonry arch bridge spandrell wall separation identification", NDT and E International, 28, 377-386, 1995.

[25] L. Pelà, A. Aprile, A. Benedetti, "Seismic assessment of masonry arch bridges", Engineering Structures, 31, 1777-1788, 2009.

[26] Fryba, L. "Dynamics of railway bridges", Thomas Telford, 1996.

[27] V. Srinivas, S. Sasmal, K. Ramanjaneyulu, K. Ravisankar, "Performance Evaluation of a Stone Masonry-Arch Railway Bridge under Increased Axle Loads", Journal of Performance of Constructed Facilities, 28, 363-375, 2014

Three dimensional simulation of plain concrete arch bridges for estimating fundamental frequencies using different geometrical and mechanical properties

Adel Mahmoudi Moazam

Research Institute of Shakhes Pajouh, Esfahan, Iran

Nemat Hassani

Abbaspour school of engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

Mahdi Yazdani *

Associate Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Arak University, Arak, Iran

Abstract

There are many plain concrete arch bridges in Iran that have been used as railway bridges for more than seventy years. Owing to the fact that these bridges have not been designed seismically, and even may be loaded under high-speed trains, evaluation of fundamental frequencies of the bridges against earthquake and high-speed train vibrations is necessary to consider dynamics effects. On the basis of construction material, masonry arch bridges may be divided into three groups, namely, brickwork arch, stone arch, and plain concrete arch. Main researches about masonry arch bridges were about static analysis and focused on brickwork arch bridge and stone arch bridge. A few experimental studies were performed on plain concrete arch bridge. To evaluate complex behavior of these bridges, results of field tests are useful. The only comprehensive experiment which considered plain concrete arch bridges was performed by Marefat et al. in 2004, which examined two bridges named km-23 and km-24 with different geometries. 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 64 Three dimensional finite element model with eight node brick elements in ANSYS and various physical parameters. Different parts of the bridge including arches, piers, foundation, wing wall, spandrel walls and soil should be modeled in detail to represent the actual behavior of the km-23 and km-24 bridges. Computer simulations show length of spans has important effects on fundamental frequencies of plain concrete arch bridge and modal deformations of bridges is in longitudinal and transverse directions. Also, these results demonstrate that fundamental frequencies of bridges decrease after increasing span length and number of spans. Plus, some relations based in the number of spans (n) and span length (l) are proposed for calculation of fundamental frequencies of plain concrete arch bridges.

Keywords: Plain concrete arch bridge; three dimensional finite element modeling; modal analysis; fundamental frequencies.

* Corresponding Author: m.yazdani@ut.ac.ir