ارزیابی پارامترهای مؤثر بر پاسخ لرزه‌ای پل‌های راه‌آهن با عرشه جعبه‌ای بتن مسلح

مقاله علمی - پژوهشی

معین زرگر*، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اصفهان، اصفهان، ایران
*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: moeinzr@gmail.com
دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۱۸- پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۰۱
صفحه ۱۰۸-۹۹

چکیده

با بررسی آمارهای اداره کل راه‌آهن و سازه‌های فنی راه‌آهن، می‌توان گفت تا پایان سال ۱۳۹۷، تعداد ۲۸۹۸۴ پل در شبکه ریلی کشور وجود داشت که از این تعداد، ۲۲۳ پل از نوع جعبه‌ای بتنی بودند. به دلیل مزایای این پل‌ها، امکان استفاده از این نوع پل در پروژه‌های بیشتری وجود دارد. افزایش استفاده از پل‌های جعبه‌ای بتنی نیازمند تحقیقات بیشتر و در نظر گرفتن تمامی جنبه‌های طراحی و اجرای چنین پل‌هایی است. در این مطالعه، مدل‌سازی دینامیکی پل‌های راه‌آهن با عرشه جعبه‌ای بتن مسلح مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور، سه پل با ارتفاع پایه‌های مختلف و همچنین سه پل با تعداد دهانه‌های مختلف انتخاب شده‌اند. سپس، مراحل مذکور در نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس مدل‌سازی شده‌اند. برای شبیه‌سازی شرایط بارگذاری زلزله، از شتاب‌نگاری لرزه‌ای ال سنترو استفاده شده است. همچنین، بارگذاری استاندارد مجله شماره ۱۳۹ سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی ایران (قوانین بارگذاری پل‌ها) برای اعمال بار قطار استفاده شده است. در نهایت، تأثیر ارتفاع پایه‌های پل و همچنین تعداد دهانه‌ها بر جابجایی نسبی و دوره سازه مورد مطالعه با استفاده از روش اجزای محدود و نرم‌افزار آباکوس بررسی شد. نتایج نشان می‌دهند که افزایش تعداد دهانه‌ها نرخ حداکثر جابجایی پل‌ها را افزایش می‌دهد. همچنین، با افزایش تعداد دهانه‌ها در تمامی حالت‌های ارتعاشی، دوره سازه افزایش می‌یابد. از سوی دیگر، افزایش ارتفاع پایه‌ها میزان جابجایی پل را افزایش می‌دهد و همچنین با افزایش ارتفاع پایه‌های پل، پریود پل افزایش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: پل‌های جعبه‌ای بتن‌آرمه، پاسخ لرزه‌ای سازه، تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی، دوره و فرکانس سازه

۱-مقدمه

به دلیل خطر بالای زلزله در ایران و وجود گسل‌های فراوان در نزدیکی بسیاری از شهرها، احتمال وقوع زلزله‌های نزدیک با مؤلفه عمودی قابل توجه زیاد است. پل‌ها به عنوان یکی از شریان‌های حیاتی که پس از زلزله باید برای دسترسی به بیمارستان‌ها، ایستگاه‌های آتش‌نشانی و دیگر خدمات بحران مورد استفاده قرار گیرند، اهمیت بالایی دارند. آسیب یا تخریب پل‌ها در یک زلزله شدید منجر به عدم دسترسی به خدمات اضطراری، از دست رفتن جان انسان‌ها و وقفه‌های طولانی‌مدت در سیستم حمل‌ونقل می‌شود. در ادامه، برخی از پژوهش‌های قبلی که موضوعات تحقیقاتی مناسبی دارند ذکر شده و نتایج آن‌ها بیان می‌شود.

در سال ۲۰۱۷، پهلوان و همکاران حساسیت تعداد دهانه‌ها در رفتار دینامیکی لرزه‌ای پل‌های چند قاب با عرشه جعبه‌ای بتن مسلح را بررسی کردند. تأثیر تعداد دهانه‌ها در پاسخ لرزه‌ای عرشه‌های پل قوسی بتن مسلح در این مطالعه مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور، مدل پل بتن مسلح با تعداد دهانه‌های مختلف و پایه‌های چند ستونی دایره‌ای انجام شد. پارامتر اصلی

مدل، تعداد دهانه‌های پل بود. بدین ترتیب، سه مدل پل شامل یک پل چهار دهانه به عنوان مدل پایه و دو پل با سه و پنج دهانه به ترتیب مدل‌سازی شدند. مجموعه‌ای از هفت رکورد زلزله در نظر گرفته شد و برای هر یک از سه حالت، تعداد دهانه‌ها اعمال شد و مدل‌ها با تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج این مطالعه نشان داد که تعداد دهانه‌ها یک پارامتر مهم و تأثیرگذار بر میزان آسیب به پل‌ها در کلاس مطالعه است. در این مطالعه، حداکثر مقادیر تغییر مکان ستون‌ها در جهات طولی و عرضی ارائه شده است. مشاهده شد که افزایش تعداد دهانه‌ها حداکثر جابجایی نسبی پل را کاهش داده و به تبع آن میزان آسیب به پل را کاهش می‌دهد. در سال ۲۰۰۴، طحونی و همکاران به بررسی اعوجاج عرشه پل‌های جعبه‌ای بتنی پرداختند. در این مقاله، اعوجاج عرشه‌های جعبه‌ای مورد بررسی قرار گرفت و مطالعات انجام شده در این زمینه معرفی شد. برای تحلیل اعوجاج عرشه‌های جعبه‌ای از نرم‌افزار Ansys 6.1 استفاده شده است. مدل اجزای محدود پل جعبه‌ای بتنی اهواز با کمک این نرم‌افزار به طور کامل ساخته شد و تحلیل تقریبی اعوجاج عرشه مذکور با استفاده از نرم‌افزار Sap 2000 انجام شد. نتایج روش اجزای محدود با روش تقریبی مقایسه شده و نشان داده شد که روش تقریبی پیشنهادی دارای دقت مناسبی است. همچنین نشان داده شد که اعوجاج جعبه‌ای تأثیر قابل توجهی بر جریان برشی به دلیل نیروهای پیچشی، زاویه چرخش پل‌ها و توزیع مهارهای خمش عرضی در طول پل‌ها دارد. در سال ۱۳۹۸، سیادپور و همکاران حساسیت پاسخ لرزه‌ای پل بتنی با عرشه جعبه‌ای به ویژگی‌های هندسی و مکانیکی را مورد بررسی و تحلیل قرار دادند. در این مطالعه، تأثیر پارامترهای هندسی و مکانیکی مختلف بر پاسخ لرزه‌ای پل‌های بتنی با عرشه جعبه‌ای مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور، یک مدل سه‌بعدی غیرخطی از یک پل بتنی با در نظر گرفتن تعامل خاک و سازه ایجاد شد و پاسخ آن تحت تأثیر زلزله‌های منتخب بررسی شد. تحلیل حساسیت انجام شده بر روی نتایج تحلیل تاریخچه زمانی نشان داد که پارامترهای توزیع جرم، مقاومت تسلیم فولاد، مقاومت فشاری بتن و میراکنندگی بیشترین تأثیر را بر رفتار لرزه‌ای چنین پل‌هایی دارند و بنابراین باید در مراحل مختلف طراحی، ساخت و نصب این پل‌ها تحلیل شوند تا از وقوع عدم قطعیت‌های مؤثر بر این پارامترها جلوگیری شود. در سال ۱۳۹۸، زرفام و همکاران تأثیر زاویه زلزله بر عملکرد پل‌های عرشه جعبه‌ای با پایه‌های نامساوی را بررسی کردند. در هر یک از این مطالعات، تأثیر زاویه برخورد اجزای لرزه‌ای بر نیازهای مهندسی ایجاد شده در پل با پایه‌های نامساوی مورد بررسی قرار گرفته است. بر این اساس، مجموعه‌ای از چهار کلاس مختلف پل‌ها با عرشه‌های جعبه‌ای بتنی مدل‌سازی شدند. در این مدل‌سازی، عدم قطعیت‌هایی از جمله مواد، عناصر پل، طول دهانه، ارتفاع پایه و عرض پل در نظر گرفته شده است. مجموعه‌ای از شتاب‌نگارها در زوایای مختلف به مدل‌ها اعمال شده و در پاسخ به زلزله در هر زاویه، محورهای پاسخ روی صفحه چرخان داده می‌شود تا بحرانی‌ترین نیاز ایجاد شده در پارامترهای مهندسی مدل‌ها محاسبه شود. بر اساس پاسخ‌های به‌دست‌آمده از تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی که در نرم‌افزار OpenSees انجام شده است، منحنی‌های شکنندگی برای تعیین احتمال رسیدن عناصر به سطح شکست ترسیم شده و نتایج مورد بررسی قرار گرفته و سپس برای مقایسه نتایج، میانگین شکنندگی پارامترهای مهندسی تحت زوایای برخورد مختلف برای هر چهار کلاس پل معرفی شده در این مطالعه مقایسه شده است.

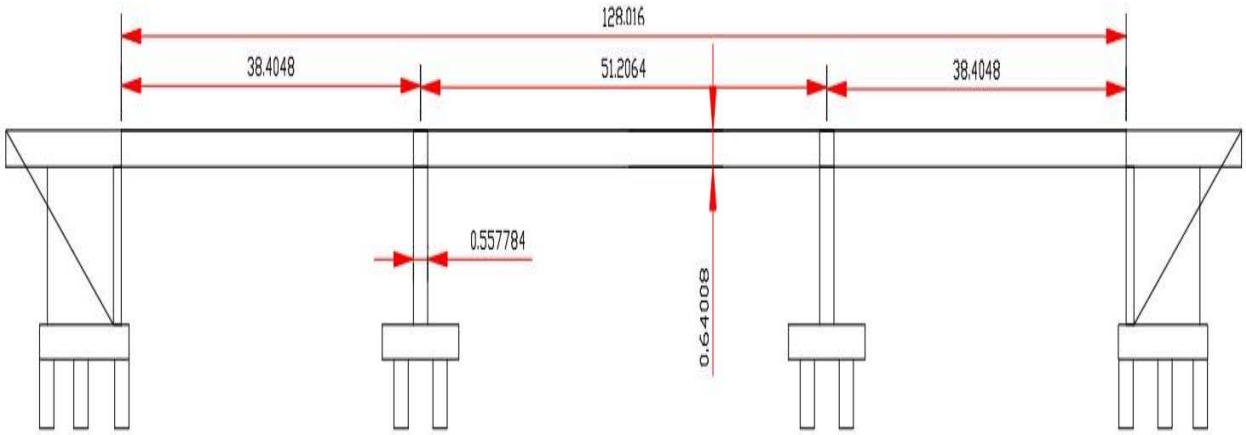
در سال ۲۰۱۴، خیرالدین و همکاران عرشه پل‌های بتنی پیش‌ساخته جعبه‌ای را بر اساس مقررات بارگذاری پل ایران با استفاده از الگوریتم ژنتیک بهینه‌سازی و طراحی کردند. در این مقاله، بهینه‌سازی عرشه پل‌های بتنی پیش‌تنیده جعبه‌ای بر اساس مقررات بارگذاری پل ایران بررسی شده است. کاهش وزن عرشه پل علاوه بر صرفه‌جویی در مواد مصرفی و به‌تبع آن هزینه سازه‌های فوقانی و زیرین، تأثیر قابل توجهی در کاهش نیروی لرزه‌ای وارد بر پل دارد. در این بهینه‌سازی، متغیرهای مختلفی مانند ابعاد اجزای مختلف مقطع عرشه، تعداد تاندون‌ها، تعداد کابل‌های هر تاندون، ترتیب قرارگیری تاندون‌ها، نسبت میلگرد کششی دال بالا و پایین و مقدار کشش جک مورد بررسی قرار گرفته‌اند. محدودیت‌های ویژگی‌های این متغیرها بر اساس شرایط عملی ساخت و محدودیت‌های مقررات تدوین شده است.

محدودیت‌های طراحی ضمنی نیز بر اساس استاندارد AASHTO فرموله شده‌اند. با توجه به اینکه اکثر محدودیت‌ها غیرخطی هستند، با مسئله بهینه‌سازی غیرخطی مواجه هستیم که دارای کمینه‌های محلی مختلفی است؛ به همین دلیل نیاز به روشی است که بتواند

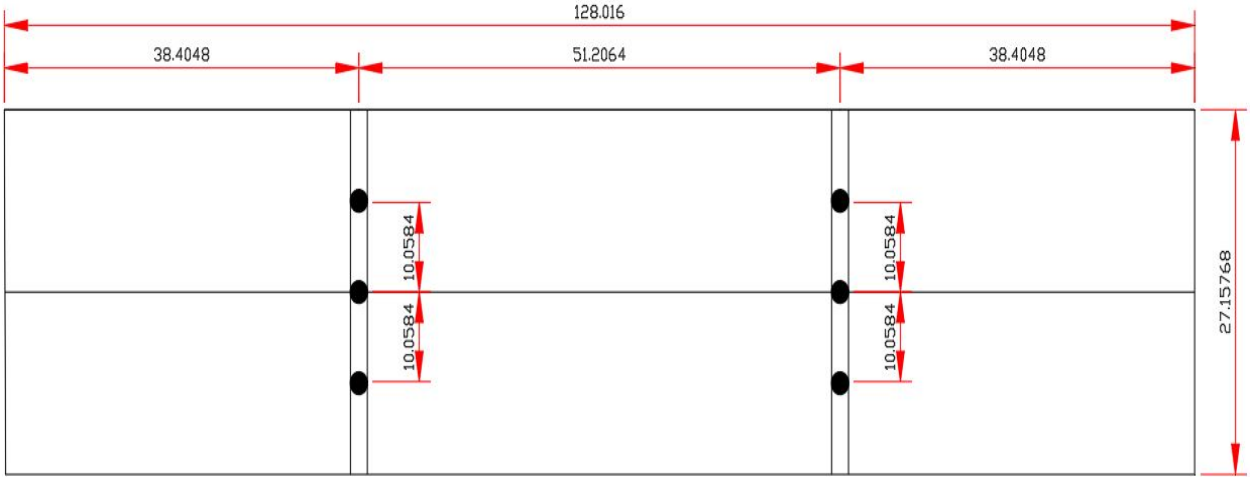
حداقل تابع کلی هدف را شناسایی کند. در این مقاله، از الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی استفاده شده است. این الگوریتم توانایی قابل توجهی در حل مسائل پیچیده بهینه‌سازی دارد که روش‌های کلاسیک یا قابل اجرا نیستند یا در یافتن بهینه کلی قابل اعتماد نیستند. نتایج این بهینه‌سازی نشان می‌دهد که با یک‌بار فرمول‌بندی مسئله طراحی پل و با کمک الگوریتم ژنتیک، می‌توان در مدت زمان کوتاهی به پاسخ بهینه دست یافت. الگوریتم ژنتیک به‌طور موفقیت‌آمیزی در این بهینه‌سازی استفاده شده و طراحی بهینه به‌طور دقیق محاسبه شده است. عرشه بهینه با حداقل وزن ممکن و با رعایت تمامی قوانین مقررات تعریف شده و حداقل و حداکثر نیازهای اجرایی طراح به دست آمده است.

۲-روش‌های تحقیق

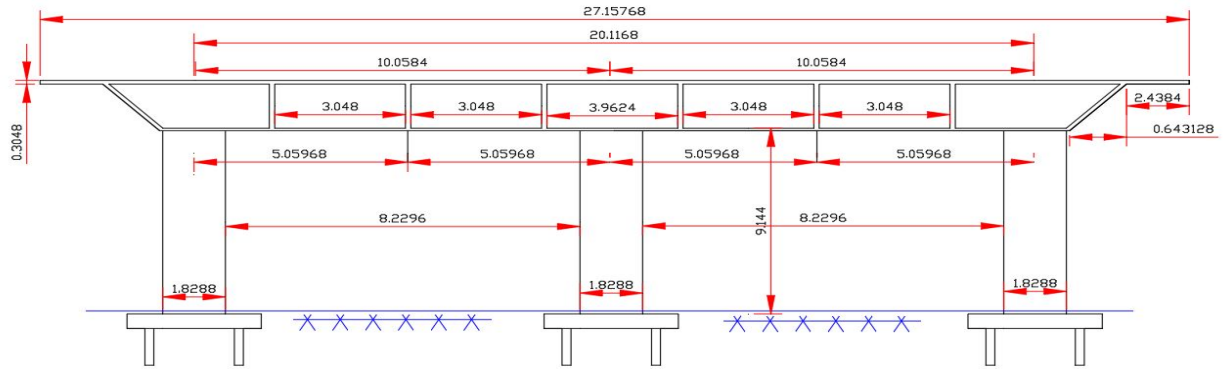
پل‌های مورد بررسی در این مطالعه از تحقیقات آزمایشگاهی و عددی مصطفی و مسلم گرفته شده‌اند که در دانشگاه کالیفرنیا، برکلی انجام و توسط مؤسسه PEER منتشر شده است. طرح هندسی پل مورد مطالعه با سه دهانه و ارتفاع ۱۱,۲ متر، همچنین طرح تقویت و مشخصات مواد، از تحقیقات مذکور استخراج و برای مدل‌سازی استفاده شده است. شکل ۱ نمای طولی پل را نشان می‌دهد.



شکل ۱. طرح طولی پل (واحد بر اساس متر) {محمد ای. مصطفی و خالد ام. مسالم ۲۰۱۵}



شکل ۲. مقطع عرشه (واحد بر اساس متر) {محمد ای. مصطفی و خالد ام. مسالم ۲۰۱۵}



شکل ۳. طرح عرضی (واحدها به متر) {محمد ای. مصطفی و خالد ام. مسالم ۲۰۱۵}

جدول ۱. خلاصه ابعاد بخش‌های عناصر پل {محمد ای. مصطفی و خالد ام. مسالم ۲۰۱۵}

ابعاد	عنصر
۵/۵ متر	قطر ستون
۲۷/۵ متر	**ارتفاع ستون**
۱/۲ – ۱/۶ متر	**ارتفاع تیر پایه/سوپر ساختار**
۷/۳ متر	**عرض تیر پایه**
۰/۶ – ۱/۵ متر	**ضخامت دال عرشه**
۰/۳ – ۰/۶ متر	**ضخامت دال تحتانی**
۱ متر	**ضخامت جان پل جعبه‌ای**
۹/۲ متر	**عرض خالص سلول جعبه‌ای**
۵ متر	**ارتفاع خالص سلول جعبه‌ای**
۸۰/۵ متر	**طول کل زیر مجموعه**
۳۱/۱ متر	**عرض کل زیر مجموعه**

جدول ۲. خلاصه‌ای از تقویت {محمد ای. مصطفی و خالد ام. مسالم ۲۰۱۵}

تقویت	عنصر
آرماتور طولی: ۱۶ عدد میلگرد شماره #۶ آرماتور عرضی (مارپیچی): میلگرد #۳ با فاصله ۲,۵ اینچ	ستون
آرماتور کششی مثبت: ۸ عدد میلگرد شماره #۵ آرماتور کششی منفی: ۸ عدد میلگرد شماره #۵ خاموت: میلگرد #۳ با فاصله ۵ اینچ (۴ شاخه)	**تیر پایه**
آرماتور عرضی: میلگرد #۳ با فاصله ۲,۵ اینچ آرماتور طولی: میلگرد #۳ با فاصله ۲,۵ اینچ آرماتور جان (بست تکی): میلگرد #۳ با فاصله ۴ اینچ	**پل جعبه‌ای**

مدل پل در نرم‌افزار آباکوس در بخش قسمت‌ها به صورت سه‌بعدی مدل‌سازی شد. مدل در سه ابعاد مختلف با ۲، ۳ و ٤ دهانه مدل‌سازی شد. طول دهانه‌های کناری ۳۸,٤ متر و طول دهانه‌های مرکزی ۵۱,٦ متر است. ارتفاع مدل ۱۱,۲ متر و عرض عرشه پل ۲۷,۱۵۷٦ متر است. عرشه پل روی سه ردیف ستون با فاصله ۸,۲۲۹٦ متر از یکدیگر قرار گرفت. مدل میلگردهای تقویتی به صورت جداگانه با المان خرپایی مدل‌سازی شد و در بخش Assemblyکنار یکدیگر قرار گرفتند. مشخصات مکانیکی مواد استفاده شده در مدل‌سازی طبق منبع ذکر شده در جدول ۳ تعریف و اعمال شد.

جدول ۳. مشخصات مکانیکی مواد {محمد ای. مصطفی و خالد ام. مسالم ۲۰۱۵}{

	بتن	میلگرد طولی #۳	میلگرد طولی #۵	میلگرد طولی #٦	میلگرد عرضی #۳
چگالی(کیلوگرم بر مترمکعب)	۲٤۰۰	۷۸۸۰	۷۸۸۰	۷۸۸۰	۷۸۸۰
مدول الاستیسیته (مگاپاسکال)	۳۱۰۰۰	۱۸۸۸۰۰	۱۷٦٦٤۳	۱۸۷۳۵۱	۱۹۳۰۵۲
نسبت پواسون	۰/۲	۰/۳	۰/۳	۰/۳	۰/۳
تنش تسلیم (مگاپاسکال)	-	٤٦٤/۵	٤۵۸/۵۷	٤۷۵/٦۷	٤٦۱/۲٦
تنش نهایی(مگاپاسکال)	-	۷۳۵/۸۸	٦۷۱/۷٦	٤٦۷/٤۲	۷۱۹/٦۱
کرنش نهایی	-	۰/۱۰۹۱	۰/۰۹٦٤	۰/۱۲٦۵	۰/۱۰۸۸
مقاومت فشاری (مگاپاسکال)	٤۹/۳	-	-	-	-

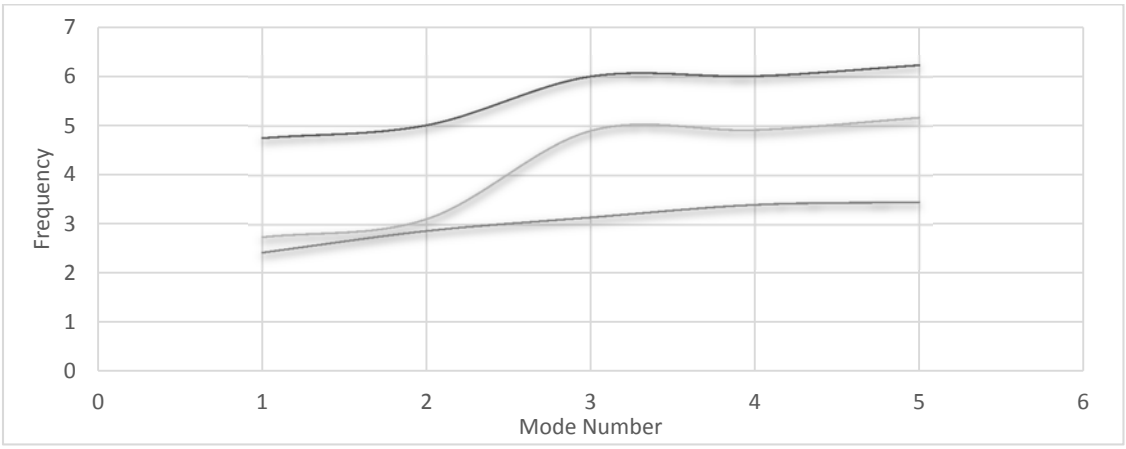
یک بخش جامد برای بتن تعریف شد و به بخش بتن اختصاص داده شد. همچنین، بخش‌هایی به عنوان خرپا با وارد کردن مساحت مقطع برای میلگردهای ۲۰، ۲۸، ۳۲ تعریف و به مواد مورد نظر اعمال شد. در بخشAssembly، قطعات کنار یکدیگر مونتاژ شدند. در بخشStep ، یک گام فرکانس با حل‌کننده Lanczos تعریف شد و نرم‌افزار برای پنج مد اول ساختار درخواست شد. یک مدل دینامیکی مدال ۳۰ ثانیه‌ای نیز با زمان ۰,۰۲ ثانیه تعریف شد که معادل با لحظات زلزله السنترو است.

در بخشInteraction، میلگردهای تقویتی توسط دستور embedded region در داخل بخش بتن دفن شدند. در بخش LOAD، شرایط مرزی مدل اعمال شد. در بخش اولیه، هر دو طرف پل و پایه‌های پل در تمامی درجات آزادی با دستور ENCASTRE مقید شدند. با دستورbase motion acceleration ، نگاشت زلزله السنترو به ساختار اعمال شد. نیروی گرانش با شتاب ۹,۸۱ متر بر ثانیه مربع به کل ساختار اعمال شد. برای شبیه‌سازی بار قطار از پل، بارگذاری استاندارد بر اساس نشریه ۱۳۹ استفاده شد که چندین بار پس از معادل‌سازی با عبور ریل بر روی عرشه پل وارد شد. در بخش Mesh نرم‌افزارآباکوس، مدل‌ها مدل‌سازی شدند. عناصر به عنوان عنصر بهینه تعیین شدند و اندازه عنصر باید بین یک و دو برابر سنگدانه بتن باشد. درC3D4، اولویت شبکه‌بندی پیش‌فرض
با عناصر چهارگوش است، اما در مناطق انتقالی، عناصر سه‌گوش نیز حضور خواهند داشت.

۳- نتایج

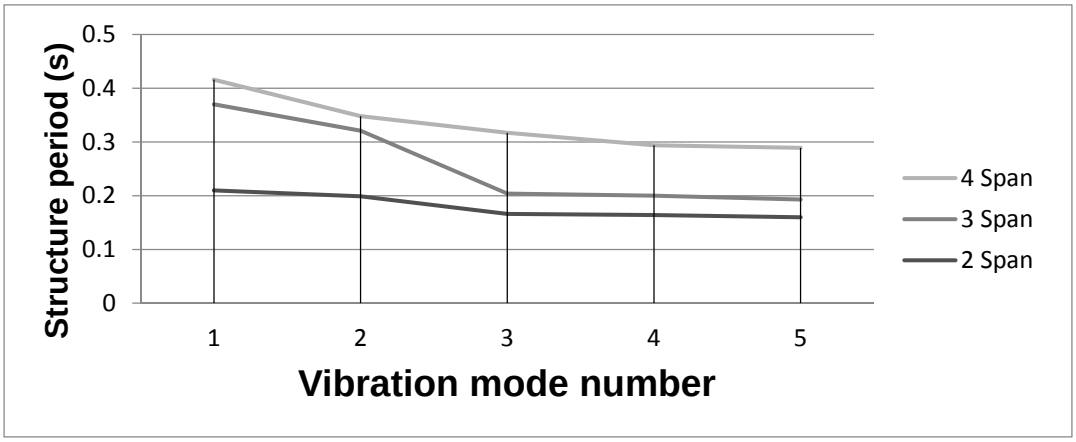
بر اساس نمودارهای جابجایی، بیشترین جابجایی در پل با دو دهانه برابر با ۱۰,۵۳ میلی‌متر، در پل با سه دهانه برابر با ۱۷,۳۰ میلی‌متر و در پل با چهار دهانه برابر با ۵۵,٦۷ میلی‌متر است. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که افزایش تعداد دهانه‌ها باعث افزایش بیشترین جابجایی پل‌ها خواهد شد. در پل با دو دهانه، میزان جابجایی حداکثر در مقایسه با مدل با چهار دهانه ۱۹۳٪ افزایش یافته است. در پل سه دهانه، در مقایسه با پل چهار دهانه، افزایش ۸٤,۵٪ مشاهده شده است. بیشترین جابجایی‌ها در دهانه‌های میانی پل‌های سه و چهار دهانه رخ داده است. بنابراین، این مناطق بحرانی‌ترین نقاط پل‌ها هستند. با افزایش

مدهای ارتعاشی پل، فرکانس ساختار نیز افزایش می‌یابد. به دلیل رابطه بین فرکانس و دوره، افزایش مدهای ارتعاشی پل باعث کاهش دوره ساختار می‌شود. همانطور که در شکل ٤ نشان داده شده است، با افزایش مدهای پل، فرکانس ساختار نیز افزایش می‌یابد. در نتیجه، دوره ساختار با افزایش مدهای ارتعاشی پل با سه دهانه کاهش می‌یابد.



شکل ٤. مقایسه فرکانس‌های ساختاری در پنج حالت اول در پل‌های با دو، سه و چهار دهانه

در شکل زیر، مقایسه‌ی دوره‌های ساختاری در پنج حالت اول در پل‌های با دو، سه و چهار دهانه ارائه شده است.



شکل ۵. دوره ساختار در حالات اول تا پنجم ارتعاش در پل‌های دو، سه و چهار دهانه

با توجه به شکل ۵، با افزایش تعداد دهانه‌ها در تمام حالات ارتعاشی، دوره ساختاری افزایش می‌یابد. همچنین باید توجه داشت که در تمام دهانه‌های مورد مطالعه، مقدار دوره ساختاری با افزایش شماره ارتعاش کاهش می‌یابد.

باید توجه داشت که با افزایش تعداد دهانه‌ها، مقدار بیشینه استرس در پل افزایش می‌یابد. در یک پل با دو دهانه، حداکثر سطح استرس فون میزس ۲۰,٤۵ مگاپاسکال است، در یک پل با سه دهانه، این میزان ۲۱,۳۳ مگاپاسکال است، و در یک پل با چهار دهانه، این میزان ٤۱,۲۵ مگاپاسکال است. بررسی اثر ارتفاع‌های پایه مختلف در این مطالعه، سه ارتفاع پایه مختلف نیز مورد بررسی قرار گرفته است. ارتفاع‌های ۱۱,۲، ۸ و ۵ متر در پل با سه دهانه برای بررسی اثر ارتفاع‌های پایه مختلف بر دوره و جابجایی پل انتخاب شده است. مشخص شده است که با افزایش ارتفاع پایه‌ها، جابجایی پل نیز افزایش می‌یابد. بیشینه جابجایی پل در پل با ارتفاع پایه ۱۱,۲ متر، برابر با ۳۰,۱۷ میلی‌متر مشاهده می‌شود. همچنین، این مقدار ۱,۱۷ میلی‌متر در پل با ارتفاع پایه ۵ متر و ۲,۷۵ میلی‌متر در

پل با ارتفاع ۸ متر است. در شکل زیر، دوره‌های پل‌ها با ارتفاع‌های پایه ۱۱/۲، ۵ و ۸ ارائه شده است. با توجه به شکل ۵، در تمام حالات ارتعاشی، افزایش ارتفاع پایه‌ها باعث افزایش مقادیر دوره پل می‌شود. همچنین باید توجه داشت که در تمام ارتفاع‌های مختلف پایه، مقدار دوره با افزایش شماره ارتعاش کاهش می‌یابد.

٤- بحث

پل مورد مطالعه از تحقیقات آزمایشگاهی و عددی مصطفی و مصلم به عنوان ۳ دهانه با ارتفاع ۱۱,۲ متر استخراج شده است، به‌طوری‌که دهانه‌های ابتدایی و انتهایی آن ۳۸,٤ متر طول دارند و دهانه‌های میانی آن ۵۱,٦ متر طول دارند. مدل‌سازی مجدد در نرم‌افزار آباکوس پل به ۳ طول و ارتفاع مختلف بررسی شد، به‌طوری‌که پل ۲ دهانه با طول ۳۸,٤ متر ابتدا، سپس سه دهانه مانند پل تحقیق مرجع، و سپس ٤ دهانه با افزودن یک دهانه میانی با طول ۵۱/٦ متر بررسی شد؛ سپس، ۳ پایه مرجع با ارتفاع‌های مختلف ۵، ۸ و ۱۱,۲ متر مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج نشان دادند که با افزایش دهانه‌ها، جابجایی و حداکثر جابجایی پل افزایش می‌یابد به‌طوری‌که جابجایی پل در پل با چهار دهانه نسبت به پل با دو دهانه با افزایش ۱۹۳٪ مشاهده شد و جابجایی بیشتری در دهانه‌های میانی پل مشخص است. در پل با سه دهانه با ارتفاع‌های مختلف به نتیجه رسیده شد که با افزایش ارتفاع پل از ۵ متر به ۱۱,۲ متر، جابجایی بیشینه به‌طور قابل توجهی افزایش می‌یابد تا ۲۹ میلی‌متر. باید توجه داشت که پل‌های ریلی ظرفیت برای جاگذاری این میزان جابجایی را ندارند که می‌تواند منجر به حوادثی مانند خروج قطار، آسیب‌های سازه‌ای به پل‌های ریلی و خطوط راه‌آهن، و هزینه‌های نگهداری افزایش یابد.

۵-نتیجه‌گیری

بر اساس خطوط جابجایی، جابجایی بیشینه در پل با دو دهانه ۱۰,۵۳ میلی‌متر، در پل با سه دهانه ۱۷,۳۰ میلی‌متر و در پل با چهار دهانه ۵۵,٦۷ میلی‌متر است. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که افزایش تعداد دهانه‌ها باعث افزایش جابجایی بیشینه پل‌ها می‌شود. در پل با دو دهانه، نرخ جابجایی بیشینه نسبت به مدل با چهار دهانه افزایش ۱۹۳٪ در جابجایی مشاهده شد. در پل سه دهانه، نسبت به پل چهارده دهانه، افزایشی به میزان ۸٤,۵٪ مشاهده شد. بیشترین جابجایی‌ها در دهانه‌های میانی پل‌های سه دهانه و چهار دهانه رخ داده است. بنابراین، این مناطق حساس به عنوان نقاط تزیینی در پل‌ها مدنظر قرار می‌گیرند. طبق نتایج تحقیق، با افزایش تعداد دهانه‌ها در تمام حالات ارتعاشی، دوره ساختاری افزایش می‌یابد. همچنین باید توجه داشت که در تمام دهانه‌های مورد مطالعه، مقدار دوره ساختاری با افزایش شماره ارتعاش کاهش می‌یابد. از طرف دیگر، با افزایش ارتفاع پایه‌ها، مقدار جابجایی پل افزایش می‌یابد. بیشترین جابجایی پل در پل با ارتفاع پایه ۱۱,۲ متر مشاهده شده و برابر با ۳۰,۱۷ میلی‌متر است. همچنین، این مقدار به ترتیب ۱,۱۷ میلی‌متر و ۲,۷۵ میلی‌متر در پل‌های با ارتفاع پایه ۵ متر و ۸ متر مشاهده شده است. در تمام حالات ارتعاشی، افزایش ارتفاع پایه‌ها باعث افزایش مقادیر دوره پل می‌شود. همچنین باید توجه داشت که در تمام ارتفاع‌های مختلف پایه، مقدار دوره با افزایش شماره حالت ارتعاشی کاهش می‌یابد.

٦- مراجع

-Ahmed, G. H., & amp. Aziz, O. Q., (2019). Shear behavior of dry and epoxied joints in precast concrete segmental box girder bridges under direct shear loading. *Engineering Structures*, 182, 89-100.

- Moustafa, M. A., & Mosalam, K. M. (2015). Seismic response of bent caps in as-built and retrofitted reinforced concrete box-girder bridges. Engineering Structures, 98, 59-73.

-Akbari, Reza, (2012). Inspection of concrete bridges with boxed junctions, *Road Quarterly*, *27(71)*.

-Arabestani, Sh. and Zarfam, P., (2018). Investigation of the effect of earthquake impact angle on the performance of box deck bridges with unequal bases, *International Conference on Civil Engineering*, Architecture and Urban Development Management in Iran, Tehran, Maragheh University of Technology in

-Moustafa, M. A., & Mosalam, K. M. (2015). Seismic response of bent caps in as-built and retrofitted reinforced concrete box-girder bridges. *Engineering Structures*, 98, 59-73.
-Naderpour, H. Khair al-Din and Arab Naeini, M., (2014). Optimal design of prefabricated concrete stair deck boxes according to the loading regulations of Iran Bridge using genetic algorithm, *Transportation Engineering Quarterly 6 (2).*
-Preliminary Earthquake Reconnaissance Report on the June 22, (2002). Changureh (Avaj), Iran Earthquake. *International Institute of Earthquake Engineering and Seismology. 2002-07-19.* Archived from the original on March 25, Ret.
-Sayadpour, H. and Eftekhari, (2009). Sensitivity Analysis of Seismic Response of Concrete Bridge with Box Deck to Geometric and Mechanical Specifications, *11th National Congress of Civil Engineering*, Shiraz, Shiraz University.
-State Management and Planning Organization, (2008). Office of the Technical Executive System, & quot; Collection and classification of damage to stairs in past earthquakes & quot, *Journal No. 301*.
- Research Center of the Islamic Consultative Assembly & quot, 20-Year Perspective of Iran & quot. (2005).
-Tahouni, Sh and Khodaei, N., (2004). A Study of Deviation of Concrete Deck Bridges, *First National Congress of Civil Engineering*, Tehran, Sharif University, Civil Engineering.
-Tahouni, Sh., (2012). Bridge Design: Reinforced and Steel Reinforced Concrete Bridges, Third Edition, university of Tehran Press.
-The official website of the International Institute of Seismology and Earthquake Engineering of Iran. http://www.iiees.ac.ir.
-Vice President for Strategic Oversight, (2011). Office of the Executive Technical System, & quot; Guide to Improving Seismicity of Bridges, *Journal No. 511*.
-Website of Iran International Institute of Earthquake and Earthquake Engineering: http://www.iiees.ac.ir.
collaboration with Tabriz University - Shahid Madani University of Azerbaijan.
-Dassault Systemes to acquire Abaqus Inc for 413 mlnusd cash & quot, (2010). 17 May 2005. Retrieved 7 July Strang, Gilbert, Linear Algebra and Its Applications (4th ed.), *Brooks Cole.*
-Dynamic Behavior of Seismic Polymer Boxes of Arm Concrete Box Deck, 5th National Conference on Self-Compact Concrete of Iran and First National Conference on Maintenance of Concrete Structures, Tehran, Alam University and Iranian industry.
-Fazeh, M. and Moharremi, H., (2011). The effect of the vertical earthquake component on two-span railway bridges in areas near the fault, 6th International Conference on Seismology and Earthquake Engineering, Tehran, *International Institute of Seismology and Earthquake Engineering.*
-Group of Stairs and Passages of the General Directorate of Railways and Technical Structures of Railways, (2018). *General Statistics of Iranian Railway Bridges.*
-Gupta, T., & Kumar, M. (2018). Flexural response of skew-curved concrete box-girder bridges. *Engineering Structures,* 163, 358-372. ISBN 978-0- 03-010567-8.
-J. Jara, J. Reynoso, B. Olmos, M. Jara, (2015). Expected seismic performance of irregular medium-span simply supported bridges on soft and hard soils, *Engineering Structures,* 98, *174-185.*
-Keshtegar, B and Miri, M., (2009). Seismic Survey of Non-Linear Geometric Behavior of a Large Oral Cable Bridge, with box deck, according to the angle of impact of seismic waves, *8th International Congress of Civil Engineering*, Shiraz, Shiraz University.
-M. Abbasi, B. Zakeri, G.G. Amiri, (2015). Probabilistic seismic assessment of multiframe concrete box-girder bridges with unequal-height piers, *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 30(2), *04015016.0.*

The Effect of Dynamic Soil-Pile Interaction on Bridges with Slab-Girder Decks Using the Finite Element Method

Moein Zargar, Islamic Azad University Isfahan Branch, Isfahan, Iran.

E-mail: moeinzr@gmail.com

Received: May 2025- Accepted: August 2025

ABSTRACT

Understanding the precise behavior of structures during earthquakes has always been a challenge for engineers. Increasing awareness in this field can lead to improved regulations and safer designs. One of the most critical steps in comprehending this behavior is understanding the response of soil and structures during seismic events. Due to its nonlinear behavior, soil alters the seismic response of structures, while the presence of a structure influences soil movement. The interaction between the structural response and the nonlinear behavior of the underlying soil forms a phenomenon known as soil-structure interaction (SSI). The effects of SSI and the significance of its impact on the seismic response of structures are generally not negligible. These effects may either amplify or reduce the seismic response of structures and other earthquake-induced parameters. Additionally, changes in force distribution within the lateral resistance system may occur, potentially affecting the safety, efficiency, or durability of structural elements. In this study, the dynamic interaction between soil and piles in slab-girder deck bridges is investigated using the finite element method. To this end, a bridge with a reinforced concrete slab deck and deep foundation is analyzed using the ABAQUS finite element software, considering and neglecting soil-structure interaction effects. The research examines the stresses, strains, displacements, and accelerations of the bridge deck. The results indicate that considering pile-soil interaction (PI) increases the maximum stress in the bridge system. However, a more detailed analysis reveals that SSI reduces stress in the bridge deck and foundation while increasing stress behind the piles and within the pile group.

Keywords: Soil-Structure Interaction (SSI), Seismic Response, Finite Element Analysis (FEA)