

ارزیابی سیستم‌های متداول سازه‌ای در پل‌های عابر پیاده فلزی

مقاله علمی - پژوهشی

سید شهاب امامزاده، استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: shemamzadeh@khu.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۳/۰۳/۰۸ - پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۰۱

صفحه ۱۷۲-۱۶۱

چکیده

در این مطالعه، سیستم‌های سازه‌ای پل‌های عابر ارزیابی شده‌اند. سه نوع متداول پل عابر خرابی، کابلی و قوسی معرفی شده و ظرفیت آنها در برابر بارهای استاتیکی، ارتعاشی با نرم افزار اجزای محدود SAP2000 محاسبه گردید. سپس وزن پل‌ها جهت انتخاب اقتصادی‌ترین گزینه مقایسه شدند. نتایج کلی نشان داد که سیستم‌های سازه‌ای متداول در پل‌های عابر، ظرفیت کافی در برابر بارهای وارده دارند. در مقایسه مشخص شد که به ازای طول دهانه و ارتفاع ثابت پل، سیستم خرابی نسبت به سایر سیستم‌ها وزن کمتری دارد. به طوری که وزن پل قوسی ۱/۷ برابر وزن پل خرابی و وزن پل کابلی ۲/۱ برابر وزن پل خرابی بدست آمد. همچنین فرکانس مود اول پل کابلی ۳۳ درصد بیشتر از پل خرابی و فرکانس مود اول پل قوسی ۲۴ درصد کمتر از فرکانس اول پل خرابی محاسبه شد. این نتایج نشان می‌دهد پل قوسی کمترین ارتعاش را دارد و این پل، احساس امنیت بیشتری را به عابرین انتقال می‌دهد. مقایسه نتایج تحلیل مودال با فرکانس آسایش پیشنهادی در استاندارد اشتو نشان داد که فقط در پل خرابی فرکانس محاسباتی با فرکانس آسایش اختلاف زیادی دارد ولی در پل‌های کابلی و قوسی شرایط فرکانس آسایش تامین می‌گردد. براساس نتایج این تحقیق می‌توان با توجه به نوع بار اعمالی به سازه پل مناسب‌ترین سیستم را شناسایی و به کار گرفت.

واژه‌های کلیدی: پل خرابی، پل قوسی، پل کابلی، پل‌های عابر پیاده فلزی، نرم افزار SAP2000

۱- مقدمه

ساخته می‌شوند. در ساخت این پل‌ها گاهی نیز از آلیاژهای سبک یا مقطع مرکب استفاده می‌گردد. استفاده از فولاد در ساخت پل‌های فلزی از قرن گذشته شروع و با توجه به مقاومت کششی و فشاری مطلوب این مصالح در سطح وسیع متداول گردید. معمولاً نیمرخ‌های فولادی دارای ضخامت ناچیز بوده و در نتیجه علاوه بر مسئله زنگ زدن و خوردگی، خطر بروز ناپایداری‌های الاستیک نیز همواره وجود دارد. با افزایش طول دهانه، وزن مرده پل‌ها به سرعت افزایش می‌یابد که به دلیل سبک بودن مقاطع فلزی گزینه مناسبی برای پل‌های عابر عریض هستند. در زمینه طراحی پل‌های عابر پیاده تحقیقات اندکی در کشور انجام شده است. برای مثال (عسگری‌زاده و همکاران، ۲۰۱۳) رفتار پل معلق عابر پیاده میرزاکوچک خان به طول ۶۰ متر و عرض ۳ متر را

در سال‌های اخیر استفاده از پل‌های عابر پیاده به دلیل افزایش روز افزون بار ترافیکی و به تبع آن افزایش عرض جاده‌ها و خیابان‌ها، افزایش قابل ملاحظه‌ای داشته است. با در نظر گرفتن طول دهانه و بار اعمال شده بر روی این نوع پل‌ها از سیستم‌های سازه‌ای مختلفی جهت طراحی استفاده شده است. بنابراین شناسایی مناسب‌ترین طرح با توجه به بارهای اعمالی دارای اهمیت است. به سازه یک پل عابر علاوه بر بارهای مرده، بارهای پیش‌بینی نشده‌ای در طول دوران بهره‌برداری اعمال می‌شود، مانند بار زلزله، باد، تابلوهای تبلیغاتی و در نهایت بار اضافی ناشی از تصادفات انواع وسایل نقلیه دارای ارتفاع زیاد مانند کامیون‌ها، که باید جهت کاهش خسارت و طراحی بهینه این نوع سازه‌ها، توجه بیشتری به عمل آید. پل‌های عابر به اشکال مختلف

(۲۰۱۰)، کاهش ارتعاش پل‌های عابر پیاده را با استفاده از میراگر جرمی تنظیم شده مورد مطالعه قرار داد. نتایج حاصل از این پژوهش که بر روی دو پل انجام شد، نشان دهنده عملکرد مطلوب میراگر جرمی در این پل‌ها بود، به طوری که این میراگر با کنترل مناسب ارتعاش موجب کاهش پاسخ‌های پل‌ها گردید. مشخصات این میراگر جرمی، توسط فیبیگ بررسی گشت و مشخص شد که استفاده از میراگر جرمی، اقتصادی‌ترین روش کاهش ارتعاش پل‌های عابر پیاده است. شایان ذکر است که در این پروژه، میراگرها در راستای عمودی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. اما؛ می‌توان از آن‌ها برای کاهش ارتعاش در راستای محور پل نیز استفاده نمود. مندرس (۲۰۱۱) در تحقیق خود، یک پل عابر پیاده را با استفاده از پروفیل‌های GFRP و با دهانه ۱۲ متر با دو پروفیل کامپوزیتی با مقطع I شکل بررسی نمود. وی از روش اجزای محدود برای بررسی رفتار سازه تحت بارهای مختلف استفاده کرد. بر این اساس دو نمونه از این سیستم سازه‌ای ساخته شد و برای سنجش رفتار دراز مدت مورد بررسی قرار گرفت. لی و همکاران (۲۰۱۴)، برای اولین بار مراحل طراحی و ساخت یک پل عابر که تماماً از GFRP ساخته شده بود را در یک منطقه تحت شرایط محیطی با خوردگی بالا، در تایوان معرفی نمودند. تغییر شکل‌های به دست آمده از مدل اجزای محدود و سازه واقعی بسیار به هم شبیه بودند. این پل گزینه مناسبی برای اجرا در محیط‌های با شدت خوردگی بالا بود. ساندوویک (۲۰۱۲)، روشی برای طراحی نمونه جدیدی از پل‌های فلزی عابر با دو دهانه از نوع معلق ارائه نمود. برای تحلیل این پل، از نیروهای متقارن و نامتقارن استفاده شد و تغییر مکان‌ها در جهت‌های مختلف بررسی گردید. برای تحلیل نیز از نرم افزار BEM استفاده شد. در این پژوهش، درصد خطا کمتر از ۴٪ بود. در پل معرفی شده اعضای معلق علاوه بر مقاومت کششی، دارای سختی خمشی قابل توجهی بودند. لذا عمده بارهای وارده را اعضای معلق تحمل نموده و نیازی به عرشه‌های سنگین و با مقاومت بالا نبود. در تحقیق انجام شده، نمونه‌ای از پل دو دهانه تحت اثر بارهای متقارن و نامتقارن مورد مطالعه قرار گرفت؛ و برای بارپذیری بیشتر پل، محدوده‌ایی به نام نوار تنش در عرشه پل پیشنهاد شد. این نوار مسیر انتقال تنش را در عرشه پل به تکیه‌گاه‌ها مشخص می‌کند. این نوع از پل عابر پیاده تغییر مکان‌های بسیار کمتری را نسبت به پل‌های عابر پیاده سنتی تجربه می‌کند. در ادامه به نمونه‌ای از آخرین تحقیقات انجام شده

بر روی زاینده رود اصفهان مورد پژوهش قرار دادند. در این پژوهش، نتایج اولیه مطالعات وضعیت واقعی پل به استناد بازدیدهای چشمی و اندازه‌گیری‌های انجام شده از پاسخ پل در نقاط بحرانی و همچنین مدل سازی اجزای محدود پل ارائه شد و پاسخ‌های واقعی اندازه‌گیری شده با پاسخ‌های مورد انتظار در زمان طراحی مقایسه گردید. مدل اجزاء محدود سازه با شرایط واقعی تطبیق داده شد به گونه‌ای که پاسخ مدل اجزاء محدود بتواند پاسخ‌های اندازه‌گیری شده واقعی را باز تولید نماید. مگدی (۱۹۹۷) یک روش جدید تحلیل و طراحی برای پل‌های کابلی معرفی کرد. این تحقیقات منجر به احداث اولین پل کابلی در ایالات متحده آمریکا در نبراسکا گردید. جهت مطالعه این پل، از مدل‌های سه بعدی استفاده شد که رفتار کلی پل عابر پیاده را تحت بارهای استاتیکی و دینامیکی نشان می‌داد. سختی پل به دو صورت کوتاه مدت و بلند مدت در مدل در نظر گرفته شد. آپورا و همکاران (۱۹۹۹)، به مطالعه رفتار دینامیکی یک پل عابر پیاده با توجه به تأثیر آرماتور تقویتی در رفتار پل پرداختند. در این مطالعه که به بررسی موردی یک پل عابر پیاده در اسپانیا پرداخته شده است، مشخص گردید با توجه به فرکانس حاصل از عبور عابران بر روی پل و نوسانات ایجاد شده، این پل دارای رفتار لرزه‌ای ضعیفی بوده و باید با استفاده از آرماتورهای تقویتی مقاوم سازی شود. نیولند (۲۰۰۴)، در پژوهش خود نیاز به کاهش ارتعاشات پل‌های عابر پیاده را برای ایجاد احساس امنیت در عابران پیاده، با تعبیه میراگر حل کرد. وی در این کار، علاوه بر ارتعاشات افقی، ارتعاشات قائم را نیز ملاک عمل قرار داد. بوسکاتو و راسو (۲۰۰۸)، به بررسی عملکرد آهن، چوب و FRP در رفتار سازه‌های پل عابر پیاده پرداختند. به طوری که پس از تجزیه و تحلیل با استفاده از روش اجزای محدود و استفاده از الیاف شیشه‌ای در سازه پل جهت افزایش سختی خمشی، در نهایت مشخص گردید که استفاده از مصالح نوین کامپوزیتی به جای مصالح سنتی بسیار مطلوب بوده و مقاومت خمشی پل را به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش داده است. در این پژوهش نتیجه گرفته شد که پیشینه تغییر شکل در پل‌های ساخته شده با هر سه نوع مصالح، با بار مرده ۴۰۰ کیلوگرم بر متر مربع، برابر بوده و مقدار آن ۶ میلی‌متر است. کنستانتینو (۲۰۰۹) در تحقیقات خود به این نتیجه دست یافت که بهترین سازه برای پل عابر پیاده، سازه‌ای با طراحی قوسی است. سازه‌ای که او در مورد آن تحقیق کرد، پلی با دهانه ۵٫۳ متر و ارتفاع ۱۲ متر بود. فیبیگ

حرکت عابرین پیاده حدود دو دهه در حال مطالعه است و تاکنون مدلی برای تعیین مقدار این ارتعاش ارائه نشده است. با اینحال روش‌هایی مانند پاندول وارونه برای کنترل اینگونه ارتعاش‌ها پیشنهاد شده است (زاپ لوسکی، ۲۰۲۴). بررسی تحقیقات انجام گرفته در گذشته نشان داده که اکثر مطالعات قبلی مربوط به رفتار یک نوع سیستم پل عابر بوده و مقایسه بین انواع سیستم‌ها در سطح محدود انجام گرفته است. لذا در تحقیق حاضر به ازای طول دهانه و ارتفاع ثابت، به مقایسه سه نوع سیستم متداول خرپایی، قوسی و کابلی در پل‌های عابر پیاده پرداخته می‌شود. نتایج بدست آمده در این تحقیق با ضوابط آشتو مورد مقایسه قرار می‌گیرد تا روش عددی مورد استفاده صحت‌سنجی شود.

۲- ضوابط طراحی پل‌های عابر پیاده

پل‌های عابر پیاده، مانند هر پل دیگری، باید به اندازه‌ای طولانی باشند تا بتوانند از موانعی که باید از روی آن‌ها بگذرند، عبور کرده و همچنین به اندازه کافی بلند باشند تا با هر خودرویی که از زیر پل می‌گذرد، برخورد نکنند. با این حال، مسیر دسترسی به پل عابر پیاده اغلب از آنچه در پل بزرگراهی در نظر گرفته می‌شود بسیار تفاوت دارد. ایجاد دسترسی مناسب برای صندلی‌های چرخدار و دوچرخه سواران اغلب برای پل‌های عابر فراهم می‌شود. رمپ‌های دسترسی باید با اعمال محدودیت در شیب رمپ‌ها ایجاد شوند. آنچه در پل‌های عابر پیاده اغلب مورد توجه قرار نمی‌گیرد طول این رمپ‌های دسترسی است که سطح جاده یا پیاده رو را به عرشه پل وصل می‌کند و با توجه به رعایت شیب ملایم می‌تواند از طول پل عابر نیز بیشتر باشد. شیب رمپ‌ها ممکن است تأثیر قابل توجهی بر طرح نهایی پل داشته باشد. عرض پل عابر معمولاً بسیار کم است و فقط کافی است که تردد آزادانه در هر دو جهت را برای عابران پیاده فراهم کند. گاهی اوقات پل‌های عابر توأمان برای تردد عابرین و دوچرخه سواران ساخته شده‌اند که در این صورت باید عریض‌تر در نظر گرفته شوند. نرده‌های جان پناه برای ایمنی عابرین پیاده و همچنین جریان ترافیکی طراحی و ساخته می‌شوند. پل‌های عابر روی خطوط راه آهن به نرده‌های محافظ بلندتری نیاز داشته و با پانل‌های سخت مستقیماً بر روی مسیرهای راه آهن ساخته می‌شوند.

در این زمینه پرداخته می‌شود. (طالبی و همکاران، ۲۰۲۳) از یک مدل اجزای محدود برای تحلیل پل عابر و از مدل اطلاعات ساختمانی برای کنترل ارتعاشات پل استفاده نمودند. پردازش داده‌ها توسط الگوریتم هوشمند ازدحام ذرات در محیط نرم‌افزار متلب انجام شد. (دی و همکاران ۲۰۲۱) قابلیت اعتماد پل‌های عابر را در برابر ارتعاش جانبی و سرویس‌دهی به‌روش حالت حدی بررسی نمودند. در این تحقیق ادعا شده که ارتعاش جانبی پل‌ها از اهمیت بیشتری نسبت به ارتعاش قائم برخوردار است. (الحسن و همکاران ۲۰۲۰)، به‌صورت موردی کنترل پل‌های عابر پیاده را در اردن با استفاده از میراگر جرمی تنظیم شونده مورد بررسی قرار دادند. (اینگولفسون و همکاران، ۲۰۱۲) مروری بر مطالعات انجام شده در زمینه ارتعاش پل‌های عابر داشته‌اند. (تدیو و همکاران ۲۰۲۲) به ارزیابی عددی و آزمایشگاهی اثر باد بر روی بزرگترین پل عابر پیاده سال ۲۰۲۰ پرداختند. (کالدرون و همکاران، ۲۰۲۲) از روشی مبتنی بر حوزه فرکانس جهت بکارگیری میراگر جرمی تنظیم کننده برای کنترل ارتعاشات پل‌های عابر استفاده نمودند. (علی و همکاران، ۲۰۲۱) با انجام آزمایش‌هایی در تونل باد از مواد سبک جدیدی در پل‌های عابر پیاده استفاده نمودند که باعث سبکی و استحکام بالای پل می‌شد. (یو و سیمولوس ۲۰۲۳)، پاسخ دینامیکی پل‌های عابر را توسط سنسورهای متصل به ماهواره‌های تحقیقاتی با هزینه اندک بررسی نمودند. آزمایش مودال و تحلیل فرکانسی پل‌های عابر بر اثر حرکت یک عابر بر روی پل نیز توسط (جسوس و زیوانویچ، ۲۰۲۳) بررسی گردید. مدل‌سازی نیروهای جانبی بر اثر حرکت جانبی عابرین پیاده توسط (هان و همکاران، ۲۰۲۱) نیز مطالعه شده است. در این تحقیق با ارائه یک مدل دینامیکی غیرخطی، اثر موقعیت عابرین و فرکانس نیروی ناشی از ضربه پای عابرین که معمولاً توزیع گوسی دارد بر روی پل نیز بررسی شد. اثر فرکانس پل، میرایی و شرایط مختلف بارگذاری در ارتعاشات اضافی پل نیز مطالعه شد. وزن عرشه پل در برخی پل‌ها مانند پل‌های معلق با دهانه‌های بزرگ از اهمیت بسیاری برخوردار است و تاکنون تلاش‌هایی جهت استفاده از موارد سبک مثل کامپوزیت‌های پلیمری شده است و پاسخ این سازه‌ها مانند تنش، جابجایی، فرکانس‌های طبیعی و شتاب حاصله بر اثر حرکت عابرین پیش شده و با الزامات آیین‌نامه‌های طراحی پل‌ها مقایسه شده است (علی و همکاران، ۲۰۲۰). مساله ارتعاش جانبی پل‌ها به‌علت

۳- انواع پل‌های عابر پیاده فلزی

در ایران، پل‌های عابر پیاده فلزی به چند دسته تقسیم می‌شوند. پل‌های ساده یا خرپایی، پل‌های قوسی و پل‌های کابلی. در ادامه به توضیح مختصری در مورد این پل‌ها پرداخته می‌شود.

۳-۱- پل‌های عابر پیاده خرپایی

خرپاها یک شکل سبک و اقتصادی سازه‌ای را ارائه می‌دهند، به ویژه در مواقعی که طول و دهانه پل‌ها زیاد باشند. اعضاء خرپا طبق شکل ۱ می‌توانند کاملاً باریک بوده و این امر به طور طبیعی طراحی سازه را به استفاده از مقاطع توخالی سوق می‌دهد. مقاطع تو خالی بیش از ۵۰ سال است که در ساخت پل‌های عابر پیاده مورد استفاده قرار گرفته‌اند. طبق شکل ۲ الف، اعضایی بنام تیرهای ویرندیل با مقاطع تو خالی، فرم سازه‌ای مکمل دیگری از شبه خرپاها را با جایگزین کردن شکل مستطیلی بجای چیدمان

مثلثی اعضاء ارائه می‌دهند. خرپاهای ویرندیل تنها با داشتن اعضاء عمودی بین تیرهای فوقانی و تحتانی خرپا شناخته می‌شوند و جزو سازه‌های نامعین استاتیکی هستند. از این رو ظرفیت خمشی، برشی و محوری این اعضا به مقاومت در برابر بارهای خارجی کمک می‌کند. استفاده از این تیرها باعث می‌شود که پل‌های عابر ضمن طولانی‌تر شدنشان بر زیبایی‌شان نیز افزوده شود. با این وجود، ضعف این نوع تیرها این است که توزیع تنش‌ها در اعضاء سازه نسبت به سازه‌های خرپایی معمول بسیار پیچیده‌تر است. معمولاً پل‌های عابر با دهانه حداکثر ۳۵ متر که تنها از سیستم سازه‌ای خرپا استفاده می‌کنند، پل ساده تلقی می‌شوند. این نوع پل‌ها شامل دو بخش پایه و عرشه ساخته شده از لوله‌هایی به قطر ۳ تا ۶ اینچ و با ضخامت‌های مورد نیاز هستند، در شکل ۲ ب شمای کلی و اعضای این پل‌ها نشان داده شده‌اند.



شکل ۱. نمای طولی و عرضی از یک پل عابر پیاده خرپایی



(ب)



(الف)

شکل ۲. پل خرپایی با الف) مهاربندهای قائم (ویرندیل) ب) مهاربندهای مورب

۳-۲- پل‌های عابر پیاده قوسی

پل‌های قوسی طبق شکل ۳ معمولاً به شکل نیم‌دایره بوده و دارای تکیه‌گاه‌هایی در هر دو انتها هستند. پل قوسی ابتدا توسط یونانی‌ها و از سنگ ساخته شد. بعدها، رومیان باستان از ملات در پل‌های قوسی خود استفاده کردند. اکنون بیشتر این پل‌ها به شکل فلزی ساخته می‌شوند. با توجه به اصول مقاومت، شعاع

قوس و ابعاد این پل‌ها به گونه‌ای انتخاب می‌شود که بارهای قائم وارد بر آن به یک نیروی فشاری در امتداد قوس تبدیل شوند. بنابراین در مناطقی که نیاز به دهانه‌های طولی بوده و استفاده از پایه‌های میانی نیز مقدور نباشد می‌توان از پل‌های قوسی استفاده کرد. در ادامه به معرفی مهم پل‌های عابر قوسی پرداخته می‌شود.



شکل ۳. نمونه‌هایی از پل عابر پیاده قوسی

۳-۳- پل‌های عابر پیاده کابلی

مه‌های نیروهای کششی کابل‌ها و تبدیل آنها به تنش فشاری و انتقال آن به پی را بر عهده دارد. یک ترکیب کاربردی‌تر، سازه‌ای کابلی ما بین دو تکیه گاه برای تحمل باری معلق در وسط دهانه است. در زیر چنین باری کابل از وسط خم می‌شود و هر تکیه گاه نیمی از وزن بار را تحمل می‌کند. با توجه به این که وزن کابل در برابر بار وارده ناچیز است، کابل شکل V به خود می‌گیرد (شکل ۴). نیروی کششی در کابل از طریق بار وارده و شیب کابل محاسبه می‌شود. نیروی کشش در کابل معمولاً برابر برآیند مؤلفه‌های عمودی و افقی نیروی عکس‌العمل است.

پل کابلی دارای یک عرشه پیوسته با یک یا چند برج در بالای پایه‌های پل یا در وسط دهانه است (شکل ۴). از این برج‌ها، کابل‌ها به صورت اُریب به سمت پایین (معمولاً هر دو طرف) کشیده شده که این کابل‌ها عرشه پل را نگه می‌دارند. کابل‌های فولادی بی‌نهایت قوی و در عین حال بسیار انعطاف پذیر هستند. این کابل‌ها بسیار مقرون به صرفه نیز هستند؛ زیرا سبب ساخت سازه‌ای سبک‌تر و باریک‌تر شده و همچنین امکان پل‌زدن بین مسافت‌های طولانی را فراهم می‌کنند. در این نوع از سازه‌های کابلی یک دکل قائم یا مایل به صورت متقارن یا نامتقارن وظیفه



شکل ۴. نمونه‌هایی از پل عابر پیاده کابلی

۴- بارگذاری پل‌های عابر

شود که بیشترین تاثیر را داشته باشد. در نسخه‌های قدیمی‌تر آیین‌نامه آشتو که بر اساس روش تنش مجاز تهیه شده بودند، کاهش این بار با توجه به خط تاثیر مجاز بود. اما در ویرایش فعلی بار زنده وابسته به خط تاثیر نبوده و قابل کاهش نیست. البته آیین‌نامه‌های اروپایی بار زنده را ۵۳۰ دکانیوتن بر مترمربع پیشنهاد می‌کنند. اما در عوض اعمال ضریب کاهش بار را مجاز می‌دانند. در هر صورت طراح باید این مساله را مد نظر داشته

بار مرده اعمالی بر عرشه پل‌های عابر پیاده برابر با وزن پوشش موجود است که با توجه به نوع آن، مقدار این بار متفاوت خواهد بود. همچنین لازم است بر روی عرشه پل، بار زنده گسترده با شدت حداقل ۴۵۰ دکانیوتن بر مترمربع در نظر گرفته شود. این بار ناشی از تجمع عابری روی پل بوده و باید به نحوی اعمال

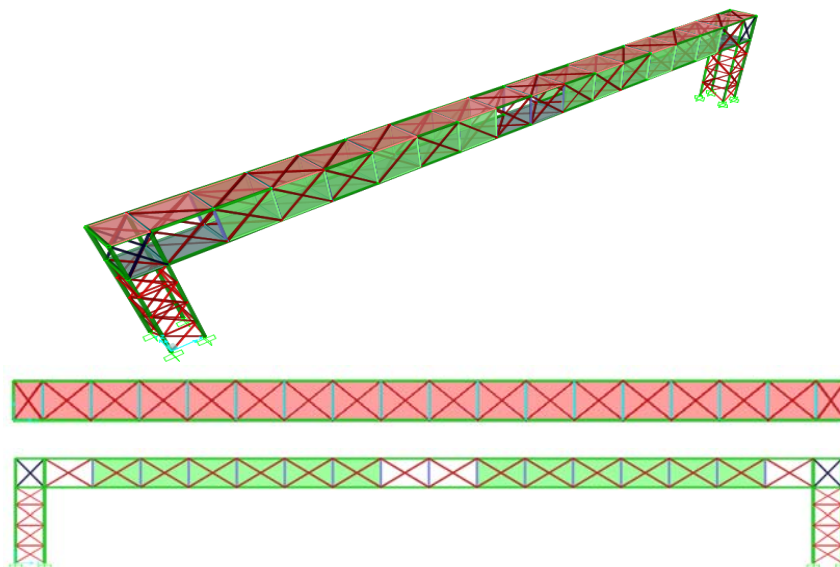
کف تا سقف خرپای فلزی ۲/۵ متر و ارتفاع کف عرشه پل از زمین ۶ متر تعریف شد. ارتفاع ستون‌ها از روی پی تا زیرخرپا مجموعاً ۶/۵ متر است. دلیل انتخاب این ارتفاع، امکان عبور وسایل نقلیه با ارتفاع زیاد است. بیشترین ارتفاع سقف سازه از سطح تراز کف به ۹ متر می‌رسد. برای ستون‌ها لوله ۱۲ اینچ، اعضای افقی و قائم لوله ۶ اینچ و اعضای قطری لوله ۳ اینچ در نظر گرفته شد. فولاد مصرفی از نوع ST37 با مقاومت مشخصه $F_u=3700$ و $F_y=2400$ کیلوگرم بر سانتی‌متر مکعب است. خرپای عرشه پل از قطعات ۶ متری تشکیل شده که با اتصالات فلنچی به یکدیگر متصل می‌شوند. لذا در مجموع شش قطعه شش متری و یک قطعه چهار متری در ساخت عرشه پل استفاده شده است. کلیه اعضای خرپا از مقطع لوله بوده و اتصالات مربوطه به صورت جوش مستقیم در نظر گرفته شده است. نما و پلان این پل‌ها در شکل‌های ۵ تا ۷ قابل مشاهده است. مقطع قوس در پل قوسی، قوطی 40×50 در تکیه گاه است که تا 20×30 سانتی‌متر در بالای قوس بصورت متغیر کاهش می‌یابد. در پل کابلی نیز نیروی مجاز پیش تنیدگی کابل‌ها 40 تن فرض شده است. برای مهاربندی جانبی سیستم سازه‌ای خرپایی و قوسی در برابر بارهای جانبی باد و زلزله از اعضای قطری لوله‌ای استفاده می‌شود. اعضای قطری می‌توانند در این سازه‌ها نقش بادبند را ایفا کنند. همچنین اتصال پای ستون‌ها گیردار در نظر گرفته شده است. محل نصب تابلوهای تبلیغاتی با ورق ۲ میلی‌متر نیز در نظر گرفته شده است.

باشد که پل ممکن است در محل‌های پر رفت و آمد مثل راه دسترسی به استادیوم ورزشی قرار داشته باشد. در واقعیت احتمال اینکه سازه تحت باری به این شدت قرار گیرد بسیار بعید است، ولی از آنجایی که بارگذاری بر اساس احتمال است در جهت اطمینان مقادیر فوق پیشنهاد شده است. پل عابر پیاده لازم است تا برای بارهای دینامیکی باد، زلزله و ترافیک طراحی شده و اثرات خستگی نیز لحاظ شود. ترکیب بارهای این پژوهش بر اساس مبحث ششم مقررات ملی ساختمان به روش ضرایب بار و مقاومت به شرح زیر است. از اثر برف، باران و بارزنده روی پوشش بام پل صرف‌نظر شده است.

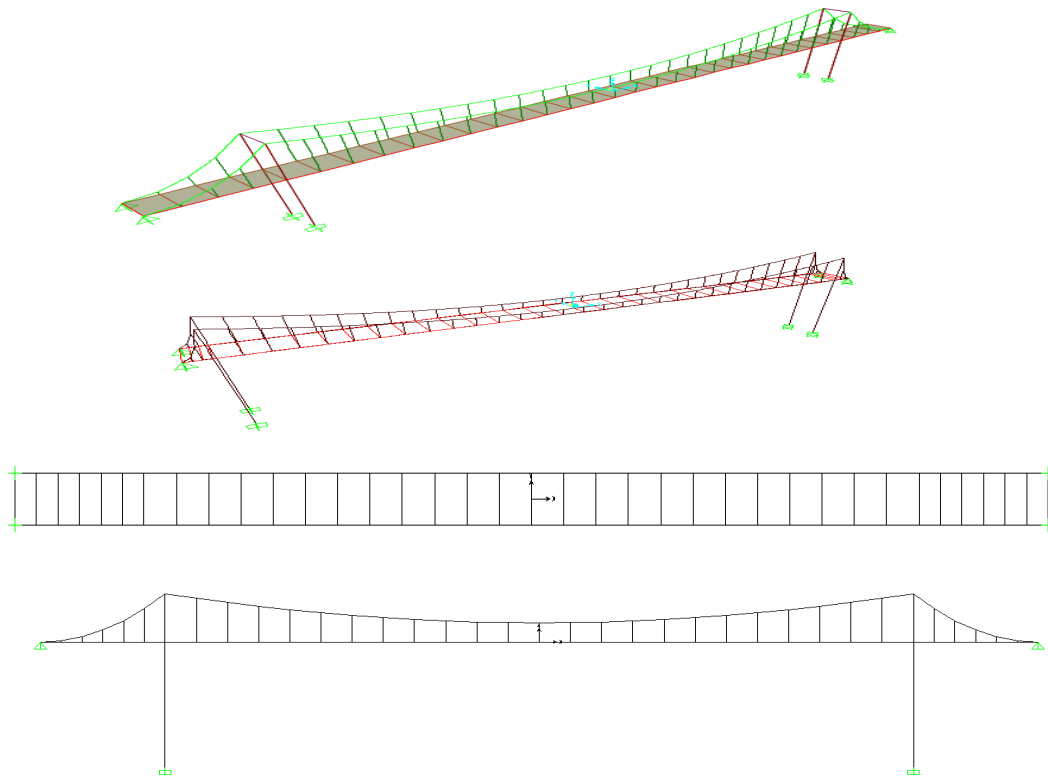
- ۱) $1,4D$
- ۲) $1,2D + 1,6L$
- ۳) $1,2D + (L \text{ یا } 0,8W)$
- ۴) $1,2D + 1,6W + L$
- ۵) $1,2D + E + L$
- ۶) $0,9D + 1,6W$
- ۷) $0,9D + E$

۵- مقایسه سیستم سازه‌ای پل‌های عابر

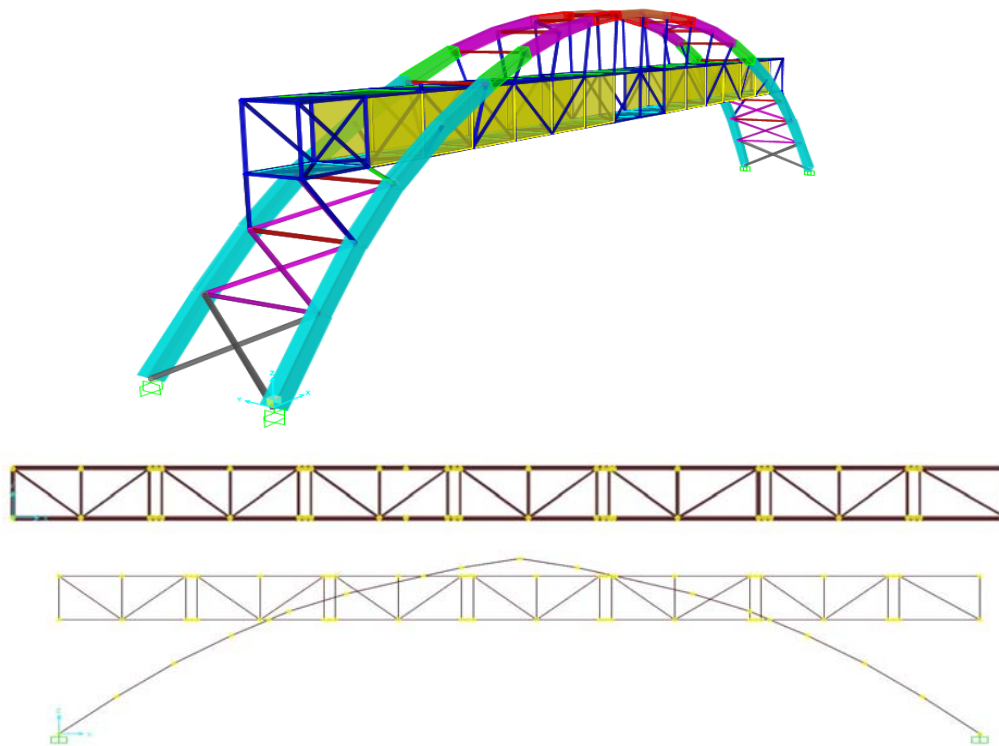
در این بخش سطوح عملکرد پل‌های عابر پیاده با سیستم خرپایی، کابلی و قوسی تحت بارهای یکسان با نرم‌افزار SAP2000 V14 بررسی می‌شود. مرجع انتخاب ابعاد پل‌ها راهنمای طراحی پل‌های عابر پیاده آشتو است. سه پل عابر پیاده خرپایی، کابلی و قوسی با دهانه 40 متر و عرض 2 متر، و ارتفاع



شکل ۵. مدل سه بعدی پل خرپایی به همراه پلان و نمای آن



شکل ۶. مدل سه بعدی پل کابلی به همراه پلان و نمای آن



شکل ۷. مدل سه بعدی پل قوسی به همراه پلان و نمای آن

۱-۵- نتایج

۱-۱-۵- مقایسه وزن پل‌ها

در تمامی پل‌ها کنترل تنش و ظرفیت اعضا در ترکیبات بارگذاری مختلف انجام شده و با سعی و خطا حداقل وزن طرح نهایی بر مبنای روش LRFD آیین‌نامه اشتو محاسبه شده است. وزن تمام شده سیستم سازه‌ای یکی از معیارهای تصمیم‌گیری در انتخاب نوع پل است. وزن تمام شده تاثیر مستقیمی در هزینه یک پل دارد. با توجه به خروجی نرم‌افزار وزن پل‌ها تحت بارگذاری یکسان در جدول ۱ نمایش داده شده است.

جدول ۱. مقایسه حداقل وزن پل‌ها تحت بارگذاری یکسان

نوع پل	وزن پل (تن)
خرپایی	۲۵
قوسی	۴۲
کابلی	۵۳

مشاهده می‌شود که وزن پل خرپایی در دهانه ۴۰ متری کمتر از پل‌های کابلی و قوسی بوده و با توجه به این که هزینه ساخت یک المان سازه‌ای ارتباط مستقیم با وزن مصالح تشکیل‌دهنده آن دارد، هزینه ساخت پل خرپایی کمتر است. علاوه بر این، پل‌های کابلی و قوسی به دلیل دارا بودن اجزای سازه‌ای غیرمعمول، هزینه بیشتری جهت اجرا خواهند داشت. در این پروژه وزن پل

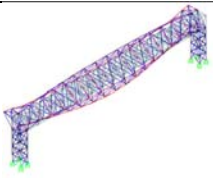
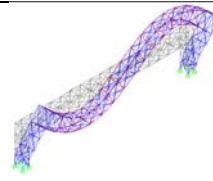
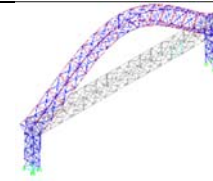
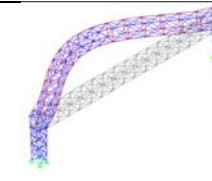
قوسی ۱/۷ برابر وزن پل خرپایی و وزن پل کابلی ۲/۱ برابر وزن پل خرپایی بدست آمده است. با توجه به اینکه تحلیل استاتیکی پل‌های عابر و کنترل ظرفیت تنش و وزن آنها جزو مراحل مقدماتی طراحی است، جهت دستیابی به طرح مناسب در بهره برداری و کاهش ارتعاشات سازه پل، در ادامه نتایج حاصل از تحلیل مودال سازه پل قوسی مورد بررسی قرار گرفته می‌گیرد.

۲-۱-۵- مقایسه فرکانس ارتعاشی پل‌های عابر پیاده

از جمله موارد دخیل در طرح لرزه‌ای و کنترل ارتعاش یک پل، زمان تناوب و فرکانس است. زمان تناوب به مدت زمان یک نوسان کامل (یک رفت و برگشت کامل سازه) در ارتعاش آزاد نامیرا گفته می‌شود. ارتعاش آزاد ارتعاشی است که در آن هیچ نیرویی به سیستم داده نمی‌شود (این ارتعاش مستقل از نیرو است) و تنها یک تغییر مکان به سیستم داده می‌شود (عامل ارتعاش جابه‌جایی است). نامیرا بودن یعنی نادیده گرفتن توان اتلاف انرژی سیستم سازه‌ای. در نتیجه هرچه میرایی سازه بالاتر باشد توانایی اتلاف انرژی سازه را بالا می‌برد و عملکرد سازه در مقابل بارهای جانبی را بهبود می‌بخشد. برای مقایسه رفتار دینامیکی پل‌ها در مواجهه با بارهای باد و زلزله، دوازده فرکانس و دوره تناوب ارتعاشی برای سه نوع سیستم سازه‌ای استخراج گردید که در جدول ۲ با یکدیگر مقایسه شده‌اند. برای نمونه در شکل ۸ اشکال مودی پل خرپایی نشان داده شده است.

جدول ۲. فرکانس انواع پل‌های عابر پیاده (سیکل بر ثانیه)

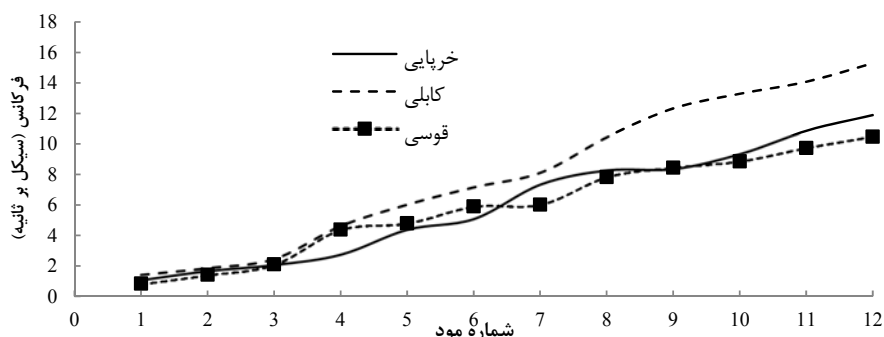
مود	فرکانس (سیکل بر ثانیه)			دوره تناوب (ثانیه)		
	خرپایی	کابلی	قوسی	خرپایی	کابلی	قوسی
۱	۱،۱۰	۱،۴۶	۰،۸۴	۰،۹۰	۰،۶۸	۱،۲۰
۲	۱،۶۸	۱،۹۰	۱،۴۲	۰،۷۰	۰،۵۳	۰،۷۱
۳	۲،۰۶	۲،۵۰	۲،۱۰	۰،۴۹	۰،۴۰	۰،۴۸
۴	۲،۷۸	۴،۶۵	۴،۳۷	۰،۴۰	۰،۲۲	۰،۲۳
۵	۴،۴۲	۶،۰۵	۴،۸۰	۰،۲۷	۰،۱۷	۰،۲۱
۶	۵،۱۱	۷،۱۸	۵،۹۰	۰،۲۰	۰،۱۴	۰،۱۷
۷	۷،۳۷	۸،۱۴	۶،۰۲	۰،۱۴	۰،۱۲	۰،۱۷
۸	۸،۲۷	۱۰،۴۶	۷،۸۳	۰،۱۲	۰،۰۹	۰،۱۳
۹	۸،۳۵	۱۲،۳۳	۸،۴۴	۰،۱۲	۰،۰۸	۰،۱۲
۱۰	۹،۳۵	۱۳،۲۹	۸،۸۵	۰،۱۱	۰،۰۸	۰،۱۱
۱۱	۱۰،۸۶	۱۴،۰۸	۹،۷۳	۰،۰۹	۰،۰۷	۰،۱۰
۱۲	۱۱،۸۹	۱۵،۲۹	۱۰،۴۷	۰،۰۸	۰،۰۶	۰،۰۹

			
مود ۴: پیچشی محوری	مود ۳: جانبی طولی	مود ۲: قائم	مود ۱: جانبی عرضی

شکل ۸. چهار مود اول پل خرپایی

و میرایی سازه است. سختی سازه وابسته به فرکانس سازه بوده و با افزایش فرکانس سازه، تغییر مکان حداکثر افزایش می‌یابد. طبق شکل ۹ مشاهده می‌شود فرکانس سازه‌ی قوسی به ترتیب بیشتر از خرپایی و هر دو کمتر از کابلی هستند. در نتیجه می‌توان گفت جابه‌جایی سازه‌های قوسی از خرپایی و کابلی بالاتر است هرچند این نوع مقایسه به دلیل تغییرات ساختاری در ویژگی‌های وزنی و سازه‌ای سه نمونه پل نمی‌تواند گزینه‌ی مناسبی باشد. اما به هر حال نشان می‌دهد که از نظر کاهش هرچه بیشتر جابه‌جایی استفاده از پل کابلی در اولویت قرار دارد.

با مقایسه انواع پل‌ها در جدول ۲ و نمودار شکل ۹ مشخص می‌شود که فرکانس پل عابر پیاده قوسی کمتر از فرکانس پل عابر پیاده خرپایی است و فرکانس تولید شده در پل عابر پیاده کابلی از همه بیشتر است. به عبارتی در مقایسه با پل خرپایی، فرکانس مود اول پل خرپایی ۳۳ درصد بیشتر و پل قوسی ۲۴ درصد کمتر است که نشان می‌دهد ارتعاش در پل عابر پیاده قوسی کمترین حد ممکن بوده و این پل، احساس امنیت بیشتری را به عابرین انتقال می‌دهد. یکی از معیارهای مهم خرابی در یک سازه، تغییر مکان حداکثر بوده و از عوامل مهم تاثیرگذار بر آن سختی



شکل ۹. فرکانس دوازده مود ارتعاشی انواع پل‌های عابر

$$f \geq 2.86 \ln \left(\frac{180}{W} \right) \quad (2)$$

در این رابطه f فرکانس تجربی مود اول بر حسب هرتز و W وزن سازه بر حسب کیلوپوند (kips) است. طبق جدول ۳، فقط در پل خرپایی فرکانس آسایش بیش از ۳ هرتز است که اختلاف زیادی با فرکانس محاسباتی دارد. ولی در پل‌های کابلی و قوسی شرایط فرکانس آسایش تامین شده است.

طبق استاندارد (آشتو ۲۰۰۹)، ارتعاش یک پل نباید به گونه‌ای باشد که موجب نگرانی عابرین پیاده شود. در این استاندارد پیشنهاد می‌شود که جهت آسایش عابرین در غیاب بارهای زنده فرکانس مود اول ارتعاشی پل بزرگتر از ۳ هرتز باشد. اگر این فرکانس کمتر از ۳ هرتز بود، لازم است یک تحلیل دینامیکی انجام شود. در بخش دیگری از استاندارد آشتو رابطه‌ای بین فرکانس آسایش مود اول و وزن پل داده شده است.

جدول ۳. مقایسه وزن پل‌ها تحت بارگذاری یکسان

نوع پل	وزن پل (تن)	وزن پل (kips)	فرکانس محاسباتی	فرکانس آسایش
خرپایی	۲۵	۵۵	۱٫۱۰	۳٫۴
قوسی	۴۲	۹۳	۰٫۸۴	۱٫۹
کابلی	۵۳	۱۱۷	۱٫۴۶	۱٫۲

۶- نتیجه‌گیری

در این تحقیق انواع مختلفی از پل‌های عابر پیاده بررسی گردید. سه نوع پل خرپایی، کابلی و قوسی با اعمال بارگذاری یکسان و تحلیل استاتیکی به همراه شرایط مرزی، به روش اجزای محدود و نرم‌افزار SAP2000 در نظر گرفته شد. دهانه پل‌ها، ارتفاع و عرض آنها در کلیه مدل‌ها ثابت فرض گردید. هدف تحقیق، مقایسه وزن و رفتار ارتعاشی انواع متداول پل‌های عابر پیاده بود. نتایج نشان داد که سیستم‌های سازه‌ای پل‌های عابر، ظرفیت کافی در برابر بارهای استاتیکی را دارند. نتایج نمونه‌های موردی این تحقیق نشان داد که:

- سیستم خرپایی نسبت به سایر سیستم‌ها هزینه و پایداری کمتری دارد. به عبارتی در سیستم خرپایی با بارگذاری یکسان وزن کل پل کمینه است. از طرفی در سیستم کابلی، ارتعاشات پل عابر کمتر است. مشابه این نتایج در تحقیقات کانستنتینو و همکاران (۲۰۰۹) نیز بدست آمده است.

- در این پروژه وزن پل قوسی ۱٫۷ برابر وزن پل خرپایی و وزن پل کابلی ۰٫۴ برابر وزن پل خرپایی بدست آمد.

- از نتایج دیگر این تحقیق تامین شدن فرکانس آسایش در پل‌های قوسی و کابلی طبق ضوابط استاندارد آشتو است که کمتر از ۳ هرتز بود. با اینحال در نمونه موردی این تحقیق پل خرپایی نتوانست شرایط فرکانس آسایش را تأمین نماید.

- در مقایسه انجام شده، فرکانس پل عابر قوسی کمتر از فرکانس پل عابر پیاده خرپایی تحت بارگذاری موجود محاسبه شد و فرکانس‌های پل عابر کابلی از همه بیشتر است. به عبارتی در مقایسه با پل خرپایی، فرکانس مود اول پل خرپایی ۳۳ درصد بیشتر و پل قوسی ۲۴ درصد کمتر است که نشان می‌دهد ارتعاش در پل عابر قوسی کمترین حد ممکن بوده و این پل، احساس امنیت بیشتری را به عابرین انتقال می‌دهد.

- نتایج کلی این تحقیق نشان داد که جابه‌جایی قائم پل‌های قوسی تحت بارهای استاتیکی، از پل‌های خرپایی و کابلی بالاتر است

هرچند این نوع مقایسه به دلیل تغییرات ساختاری در ویژگی‌های وزنی و سازه‌ای سه نمونه پل نمی‌تواند گزینه‌ی مناسبی باشد. اما به هرحال نشان می‌دهد که از نظر کاهش هرچه بیشتر جابه‌جایی استفاده از پل کابلی در اولویت قرار دارد.

۷- پی‌نوشت‌ها

1-Glass Fiber Reinforced Polymer

۸- مراجع

- AASHTO, (2009). LRFD Guide Specifications for the Design of Pedestrian Bridges. *American Association of State Highway and Transportation Officials*.
- Ali S., Thambiratnam D., Liu X., Fawzia S. (2020). Performance evaluation of innovative composite pedestrian bridge. *Structures*. Vol. 26, 845-858.
- Ali S., Thambiratnam D., Liu X., Fawzia S., (2020). Numerical study of pedestrian suspension bridge with innovative composite deck. *Heliyon*, Vol. 6, Issue 7.
- Aliasghar Talebi, Francesco Potenza, Vincenzo Gattulli (2023). Interoperability between BIM and FEM for vibration-based model updating of a pedestrian bridge. *Structures*, Vol. 53, 1092-1107.
- André Jesus, Stana Živanović (2023). Modal testing with a pedestrian as a vibration exciter. *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 189.
- António Tadeu, F. Marques da Silva, Bahareh Ramezani, António Romero, Leopold Škerget, Filipe Bandeira (2022). Experimental and numerical evaluation of the wind load on the 516 Arouca pedestrian suspension bridge. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 220.
- Asgarizadeh, M., Akbari, R. and Memarzadeh, P. (2013). Investigation of the

- Ivorra, S., Foti, D., Bru, D., and Baeza, F. (2013). Dynamic Behavior of a Pedestrian -Bridge in Alicante, Spain. *J. Perform. Constr. Facil. Journal of Performance of Constructed Facilities*, 29(5).
- Li, Y.F. Badjie, S. Chen, W. W. & Chiu, Y.T. (2014). Case study of first all-GFRP pedestrian bridge in Taiwan. *Case Studies in Construction Materials*, 1, 83–95.
- Magdi, A. Kh. Osama, A. H. Mohammed A. Z. (1997). Analysis and design methodology for an FRP cable-stayed pedestrian bridge. *Composites Part B: Engineering*, Vol. 27, Issues 3–4, 307-317.
- Mendes, P. J. D., Barros, J. A. O., Sena-Cruz, J. M. and Taheri, M. (2011). Development of a pedestrian bridge with GFRP profiles and fiber reinforced self-compacting concrete deck. *Composite Structures*, 93(11), 2969-2982.
- Mohammad A. Alhassan, Rajai Z. Al-Rousan, Shatha I. Al-Khasawneh (2020). Control of Vibrations of Common Pedestrian Bridges in Jordan Using Tuned Mass Dampers. *Procedia Manufacturing*, Vol. 44, 36-43.
- Newland, D. E. (2004). Pedestrian excitation of bridges. *Mechanical Engineering Science*. Vol. 218, Part C. 477-492.
- Nikoumaram, H., Vazifehdoust, H., and Khani, S. (2008). Assessment and Analysis of the Effectiveness of Intra-City Pedestrian Passing Bridges (Case Study: Tehran). *Hoviatehshahr*, 2(2), 3-12.
- Pampa Dey, Sriram Narasimhan, Scott Walbridge, (2021). Reliability-based assessment and calibration of standards for the lateral vibration of pedestrian bridges. *Engineering Structures*, Vol. 239.
- Sandovic, G. and Juozapaitis, a. (2012). The Analysis of the Behaviour of an Innovative Pedestrian Steel Bridge. *Procedia Engineering*. 40, 411–416.
- behavior of Mirzakocheh Khan pedestrian suspension bridge in Isfahan city. *First National Transport Infrastructure Conference*, Tehran, Iran, (In Persian).
- Boscato, G., and Russo, S. (2008). Structural performance of iron-wood-FRP pedestrian bridge, 22–24.
- Bronisław Czaplewski, Mateusz Bocian, John H.G. Macdonald (2024). Calibration of inverted pendulum pedestrian model for laterally oscillating bridges based on stepping behaviour *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 572.
- Chenyu Xue, Panos A. Psimoulis (2023). Monitoring the dynamic response of a pedestrian bridge by using low-cost GNSS receivers. *Engineering Structures*, Vol. 284.
- Christian Gallegos-Calderón, Carlos M.C. Renedo, M. Dolores G. Pulido, Iván M. Díaz, (2022). A frequency-domain procedure to design TMDs for lively pedestrian structures considering Human–Structure Interaction. *Structures*, Vol. 43, 1187-1199.
- Constantino, R., Ripke, Ch., Welch, J. (2009). Design of a Pedestrian Bridge Crossing over Coliseum Boulevard. Research and Creativity, Report. *Civil Engineering Program, Department of Engineering, Indiana University-Purdue University Fort Wayne*.
- Fiebig, W. (2010). Reduction of Vibrations of Pedestrian Bridges Using Tuned Mass Dampers (TMD). *Archives of Acoustics*, 35(2), 165–174.
- Huixuan Han, Ding Zhou, Tianjian Ji, Jiandong Zhang, (2021). Modelling of lateral forces generated by pedestrians walking across footbridges. *Applied Mathematical Modelling*. Vol. 89, Part 2, 1775-1791.
- Ingólfsson E.T., Georgakis C.T., Jönsson J., (2012). Pedestrian-induced lateral vibrations of footbridges: A literature review. *Engineering Structures*, Vol. 45, 21-52.

Evaluation of Conventional Structural Systems in Steel Pedestrian Bridges

*Seyed Shahab Emamzadeh, Assistant Professor, Civil Engineering, Kharazmi University,
Tehran, Iran.*

E-mail: shemamzadeh@khu.ac.ir

Received: November 2024- Accepted: February 2025

ABSTRACT

This study will consider the evaluation of structural systems for pedestrian steel bridges. This research examined three common types of trusses, cable, and arch bridges, and their capacity against static, dynamic, and vibration loads was calculated with SAP software. The weight of the bridges is then compared to select the most economical option. The overall results showed that the structures of conventional pedestrian bridges have sufficient capacity for static, dynamic, and vibratory loads. In comparison, it was found that due to the span's length and the bridge's constant height, the truss system weighs less than other systems. The weight of the arch bridge was 1.7 times that of the truss bridge, and the weight of the cable bridge was 2.1 times that of the truss bridge. Also, the frequency of the first mode of the cable bridge was 33% higher than the truss bridge, and the frequency of the first mode of the arched bridge was 24% lower than the first frequency of the truss bridge. Comparing the common types of bridges, it was found that truss systems have a lower cost and stability index than other systems. In the cable structure system, the vibrations of the pedestrian bridge are further reduced. In a truss system with the same load, the total weight and, therefore, the cost of the bridge is minimal. Based on the results of this research, the most appropriate system can be identified and used according to the type of load applied to the bridge structure.

Keywords: Pedestrian Bridges, Truss Bridges, Arch Bridge, Cable Bridge, SAP2000 Software