

ارزیابی و بهسازی سازه ای عرشه پل های بتنی درجا - مطالعه موردی پل صلوات آباد بیجار سالار منیعی

استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، سنندج، ایران

manie@iausdj.ac.ir

چکیده

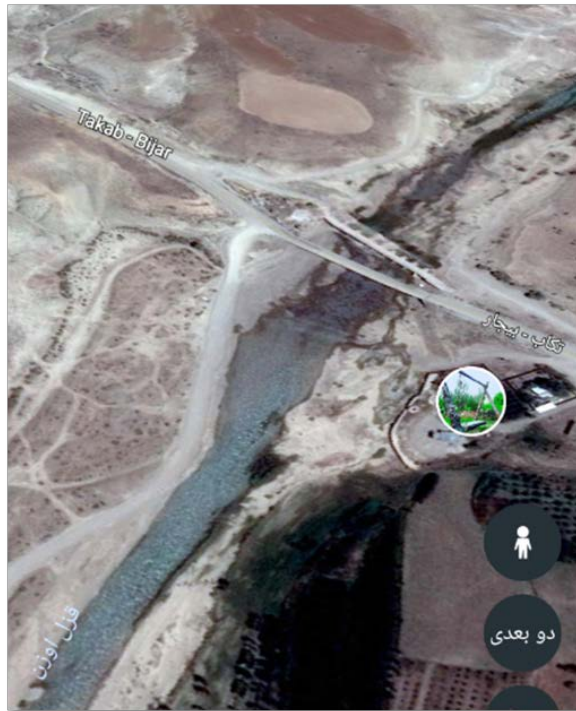
مقاله حاضر به ارزیابی کیفی و کمی و نیز بررسی و ارائه راهکارهای بهسازی و تقویت سازه عرشه پل صلوات آباد بیجار می پردازد. این پل بتنی درجا با ۵ دهانه ۲۰ متری در مسیر شهرستان بیجار به تکاب واقع در استان کردستان در سال ۱۳۵۷ ساخته شده و تاکنون مورد استفاده قرار گرفته است. در حال حاضر پل حین عبور بارهای ترافیکی کامیون لرزش محسوس دارد. به علاوه، ترک خوردگی های شدیدی در تیرهای عرشه در تمامی دهانه وجود داشته و ارزیابی های چشمی حاکی از زوال شدید مقاطع عرشه است. ارزیابی ها نشان می دهد که زوال بتن عموماً ناشی از حمله کلریدها (به مقدار زیاد)، واکنش های کربناسیون، فشار انبساطی ناشی از فرایند زنگ زدگی میلگردها و آثار ذوب و یخ متوالی طی سالیان گذشته است. به دلیل نبود اطلاعات مدون از سازه پل، یک برنامه جامع شناسایی کیفی و کمی با هماهنگی کارفرما (اداره کل راه و شهرسازی) تدوین و به اجرا گذاشته شد. تمامی اطلاعات مورد نیاز در ارزیابی سازه ای پل در برنامه شناسایی از طریق آزمایش های مخرب و غیرمخرب استخراج شده اند. ارزیابی کمی نشان می دهد تحت اثر بارگذاری کامیون استاندارد ایران، ضعف جدی در مقاومت برشی و خمشی تیرهای نگهدارنده عرشه و نیز در مقاومت خمشی دال میانی عرشه وجود دارد. براساس نتایج آزمایش ها و تحلیل آماری آن ها، مدل سازی عددی و محاسبات دستی میزان ضعف دال و تیرهای عرشه تعیین شده و راهکاری بهسازی سیستم عرشه شامل غلاف بتنی، غلاف فولادی، لایه های کامپوزیتی FRP و نصب پایه میانی به تفکیک مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه ملاحظات فنی، اجرایی و اقتصادی، ترمیم بتن های زوال یافته با استفاده از مصالح ترمیمی پایه سیمانی، رفع زنگ زدگی میلگردهای دارای خوردگی، افزایش باربری خمشی و برشی تیرهای عرشه و نیز افزایش باربری خمشی دال عرشه با استفاده از ترکیب روش های غلاف بتنی (با بتن خودتراکم-SCC) و لایه های کامپوزیتی FRP (به صورت محدود) به عنوان راهکار بهینه طرح تقویت عرشه پیشنهاد گردید. برای کاهش ارتعاشات پل، راهکارهای دیگری علاوه بر تقویت های موضعی اشاره شده در فوق، از جمله تعبیه پایه های جدید میانی و کاهش طول دهانه ها، پیشنهاد شده است.

کلمات کلیدی: مقاوم سازی، بهسازی، عرشه پل، غلاف بتنی، کامپوزیت های الیافی.

۱. مقدمه

پل صلوات آباد در مسیر ارتباطی شریانی اصلی با دو خط ترافیکی در محور بیجار (استان کردستان) - تکاب (آذربایجان غربی) قرار دارد (تصویر ۱). پل که از نوع بتنی درجا با دال بتنی و دو تیر تکیه گاهی است، در ۵ دهانه تقریباً ۲۰ متری و با عرض کل ۸/۴ متر در ۱۵ کیلومتری مسیر بیجار به تکاب بر روی رودخانه قزل-اوزن در سال ۱۳۵۷ ساخته شده و تاکنون مورد استفاده قرار گرفته است. در دهانه شمالی، پل در انتهای یک مسیر شیب دار (بیش از ۱۰ درصد) قرار گرفته است. در دهانه جنوبی، پل در انتهای یک قوس افقی و قائم قرار می گیرد و به همین علت معمولاً ترافیک عبوری حین ورود به این دهانه سرعت قابل توجهی ندارد. پل بدون قوس افقی و قائم بوده و کاملاً مستقیم است (تصویر ۲). در حال حاضر پل حین عبور بارهای ترافیکی کامیون لرزش محسوس دارد که شیب مسیر قبل از دهانه ورودی شمالی به تشدید موضوع کمک کرده است. به علاوه، ترک خوردگی های شدیدی در تیرهای عرشه در تمامی دهانه وجود داشته و ارزیابی های چشمی حاکی از زوال شدید مقاطع عرشه است. ارزیابی های کیفی نشان می دهد که زوال بتن عموماً ناشی از حمله کلریدها (به مقدار زیاد)، واکنش های کربناسیون، فشار انبساطی ناشی از فرایند زنگ زدگی میلگردها و آثار ذوب و یخ متوالی طی سالیان گذشته است. از آن جایی که هیچ گونه اطلاعات مدونی از سازه پل اعم از دفترچه محاسبات، نقشه های طرح هندسی، نقشه های سازه ای، گزارش آزمایش های مصالح،

گزارش های نظارتی و اجرا و ... وجود ندارد، یک برنامه جامع شناسایی کیفی و کمی با هماهنگی کارفرما جهت انجام مطالعات بهسازی عرشه تدوین و به اجرا گذاشته شد. تمامی اطلاعات مورد نیاز در ارزیابی سازه ای پل در این برنامه جامع شناسایی استخراج و مورد استفاده قرار گرفته است.



تصویر ۱ - تصویر هوایی محل پل صلوات آباد بیجار



تصویر ۲ - پل صلوات آباد بیجار (دید از دهانه شمالی به سمت جنوب)

در تصاویر (۳) تا (۶) وضع موجود پل و اجزای آن نمایش داده شده است. این تصاویر حاکی از زوال شدید مصالح، خوردگی شدید میلگردها و تخریب بتن است. یادآوری می شود که این مطالعه بر روی عرشه متمرکز است و ارزیابی پایه ها، تیرهای کلاهیکی (cap beams) روی پایه ها و سیستم شالوده مورد بررسی قرار نمی گیرد. روند مطالعه از ارائه یک برنامه جامع شناسایی مشخصات سازه ای و مصالح پل آغاز گردید. متعاقب آن بازدید چشمی، انجام سونداژهای لازم جهت شناسایی و نمونه گیری (بتن و میلگرد) ارزیابی کیفی، ارزیابی کمی براساس مدل اجزای محدود پل زیر اثر بارهای طراحی

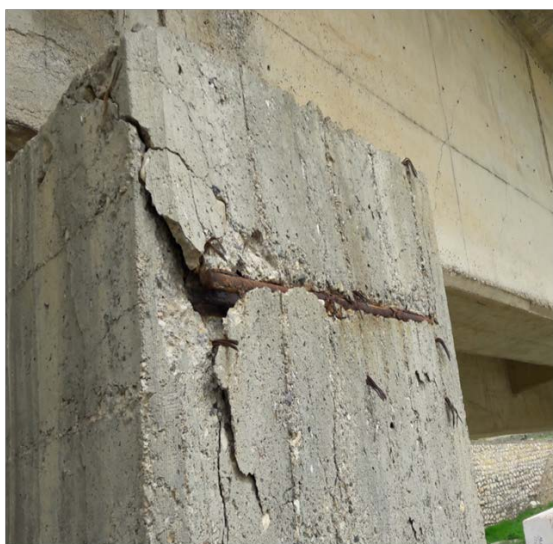
مدنظر قرار گرفته است. به علت عدم وجود نقشه و مشخصات فنی، تمام اطلاعات سازه ای از برنامه شناسایی استخراج و در تحلیل ها مورد استفاده قرار گرفته است. نتایج آزمایش های انجام شده بر روی سونداژهای بتن و فولاد به روش های آماری مطابق نشریه ACI 562M-16 [۱] تجزیه و تحلیل شده اند که جزئیات آن در بخش ارزیابی کمی آورده شده است. براساس نتایج آزمایش ها، مدل سازی عددی و محاسبات دستی میزان ضعف دال و تیرهای عرشه تعیین شده و راهکاری بهسازی سیستم عرشه شامل غلاف بتنی، غلاف فولادی، لایه های کامپوزیتی FRP و نصب پایه میانی به تفکیک مورد بررسی قرار گرفته است. در نهایت با توجه ملاحظات فنی، اجرایی و اقتصادی گزینه ارجح طرح تقویت با جزئیات لازم پیشنهاد شده است.



تصویر ۴- نمای تحتانی یکی از تیرهای عرشه- زوال بتن و خوردگی میلگردهای اصلی تیر



تصویر ۳- نمای تحتانی دال عرشه در یکی از دهانه ها- تخریب بتن و خوردگی شدید میلگردهای خمشی



تصویر ۶- تخریب انبساطی بتن و خوردگی میلگرد یک تیر کلاهیکی



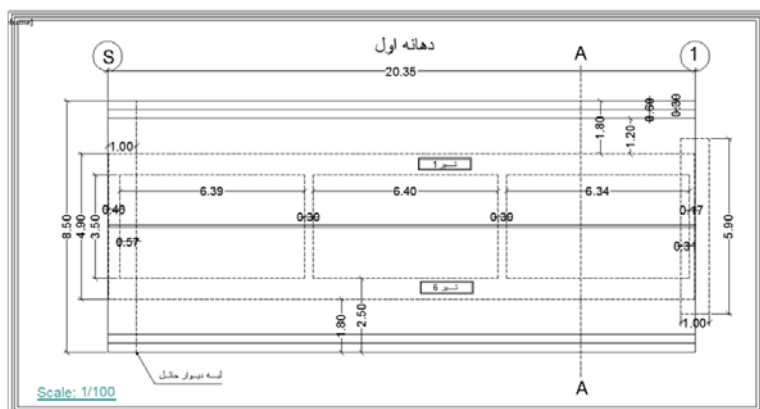
تصویر ۵- ترک سازه ای در تیرهای عرشه

۲. برنامه شناسایی و ارزیابی - مشخصات هندسی پل

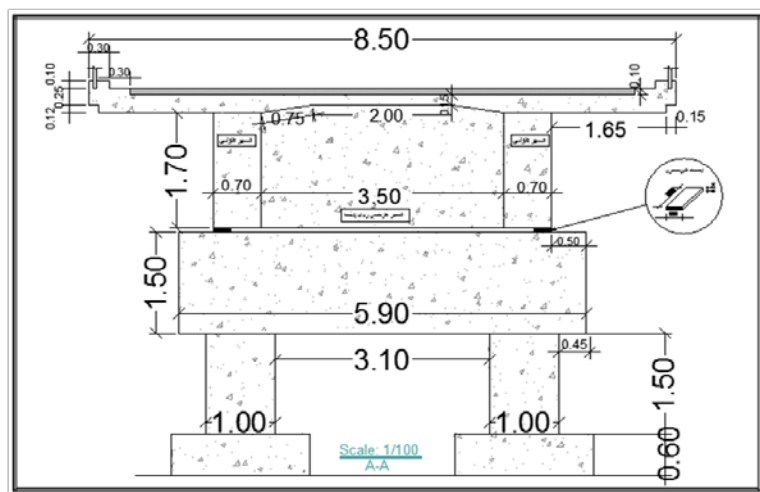
برنامه شناسایی شامل بازدید چشمی، تعیین ابعاد و مشخصات هندسی و نیز انجام سونداژ میلگردهای دال تیرها، بتن دال رویه و بتن تیرها (جان تیرها) به منظور تعیین مقاومت آن ها تدوین گردید. در برنامه شناسایی، نمونه گیری از مصالح به شرح جدول (۱) انجام گرفته است. پلان و هندسه مقطع پل مطابق با برداشت محلی هندسه پل در تصاویر (۷-الف) و (۷-ب) برای یکی از دهانه ها نشان داده شده است. سایر دهانه ها تیب است. با توجه به دو سر مفصل بودن تیرهای عرشه و یکسان بودن مشخصات آن ها در تمامی دهانه ها، ارزیابی کمی صرفاً برای یک دهانه انجام شده و به سایر دهانه ها عیناً تعمیم داده می شود.

جدول (۱) - تعداد نمونه های مصالح اخذ شده

تعداد	نوع مصالح و محل سونداژ
قطر ۱۲، ۱۴ و ۱۶ میلی متر: ۵ مورد جهت آزمایش کشش قطر ۲۲ و ۲۶ میلی متر: ۶ مورد جهت آزمایش کشش قطر ۳۰ میلی متر: ۵ مورد جهت آزمایش کشش جمعاً: ۱۶ مورد	میلگردها
۱۵ مورد مغزه گیری	بتن دال رویه
۹ مورد مغزه گیری	بتن جان تیرها



شکل (۲-الف) - پلان دهانه اول



شکل (۲-ب) - مقطع عرشه پل، تیر کلاهی و پایه ها (اندازه ها بر حسب متر)

۱.۲ شناسایی مشخصات میلگردها

برای تعیین مشخصات میلگردهای دال، در ۳ محل مختلف روی عرشه عملیات سونداژ انجام شد و نمونه های میلگرد برای آزمایش کشش نیز از همان محل ها برداشته شد. تمام میلگردهای دال به صورت ساده (بدون آج) بوده و در برخی موارد مشاهده شد که میلگردهای عرضی (خاموت) تیرها در دال ادامه داشته و به صورت قلاب با شبکه فوقانی دال درگیر شده اند. در بعضی موارد نیز میلگردهای عرضی تیرها با میلگردهای دال جوش شده اند. همچنین در فاصله بین دو تیر طولی میلگردهای طولی ساده به قطر ۱۰ میلی متر و به فاصله ۲۰۰ میلی متر مشاهده شدند که روی شبکه فوقانی قرار گرفته و به نظر می رسد با هدف تامین میلگردهای افت و حرارت پیش بینی شده باشند. قطر میلگردها اندازه گیری شده و نمونه میلگردها برای انجام آزمایش کشش به آزمایشگاه ارسال گردید (تصویر ۸).

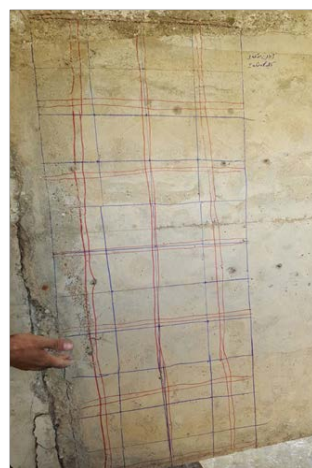


تصویر (۸) - شبکه میلگرد دال عرشه در دهانه اول پس از انجام عملیات سونداژ

مشخصات میلگردهای مقطع تیر با اسکن آن ها و نیز مشاهده مستقیم استخراج گردید (تصویر ۹ و ۱۰). نکته حائز اهمیت که در عمده بتن تیرها، دال، سر ستون و حتی پایه ها نیز مشاهده می شود، زوال بتن (عموماً پوشش و در مواردی بیش از پوشش) است که عموماً ناشی از حمله کلریدها (به مقدار زیاد)، واکنش های کربناسیون، فشار انبساطی ناشی از فرایند زنگ زدگی میلگردها و آثار ذوب و یخ متوالی طی سالیان گذشته است. ارزیابی چشمی مغزه ها حاکی از عدم احتمال بروز واکنش های قلیا-سنگدانه در ساختار بتن است که البته می توان با روش های استاندارد ASTM C 1260 [۲] موضوع را دقیق تر نیز ارزیابی نمود (با بررسی های بیشتر و مشاوره با کارفرما ضرورتی برای این موضوع احساس نگردید). زوال بتن پوششی امکان مشاهده مستقیم میلگردهای خمشی و برشی را در موارد زیادی ممکن ساخت. نمونه های میلگرد استخراج و برای انجام آزمایش کوپان به آزمایشگاه ارسال گردید. مشخصات میلگردها در تیرها و دال عرشه در ارزیابی ظرفیت خمشی و برشی عرشه استفاده شده است. در تصویر (۱۱) یک نمونه آزمایش انجام گرفته در آزمایش مکانیک خاک بر روی میلگرد نشان داده شده است.



تصویر (۱۰) - تعیین میلگردهای تیر در تکیه گاه از طریق سونداژ (تکیه گاه)



تصویر (۹) - تعیین موقعیت میلگردهای تیر به روش اسکن میلگرد (تکیه گاه)



تصویر (۱۱) - انجام آزمایش کشش (آزمایش کوپان روی میلگرد استخراج شده)

۲.۲ شناسایی مشخصات بتن دال رویه عرشه

برای تعیین مقاومت فشاری بتن دال عرشه به تعداد ۳ مغزه در هر پانل عرشه شامل یک نمونه در دال طره ای و دو نمونه از دال اصلی در یک آرایش مثلثی (در فواصل ۵ متری از پایه ها در طرفین و وسط دهانه) استخراج شد که در مجموع ۱۵ نمونه از دال را فراهم آورد. بلافاصله بعد از عملیات مغزه گیری ترمیم محل آنها با گروت اپوکسی سه جزئی انجام شد (تصاویر ۱۲ و ۱۳). پس از اخذ نمونه ها، تمام آن ها جهت انجام آزمایش مقاومت فشاری استاندارد به آزمایشگاه ارسال گردید. در تصاویر زیر، نتایج آزمایش فشاری انجام گرفته روی ۱۵ نمونه نشان داده شده است. برای ارزیابی سازه، تحلیل آماری این نتایج براساس نشریه ACI 214.4R [۳] انجام گردید که در بخش های بعد جزئیات آن آورده شده است.



تصویر (۱۳) - ترمیم محل مغزه گیری با گروت سه جزئی



تصویر (۱۲) - عملیات مغزه گیری

۳.۲ شناسایی مشخصات بتن تیرهای عرشه

برای تعیین مقاومت فشاری بتن در تیرها ابتدا در فواصل یک سوم دهانه با اسکتر میلگردیاب محل مناسب مغزه گیری ها مشخص شده و در نقاط فاقد ترک و مابین محل میلگردها عملیات مغزه گیری انجام شد. در مجموع تعداد ۹ مغزه از کل ۱۰ تیر موجود برداشت شد و مشابه مغزه های دال، همزمان با برداشت نمونه ها عملیات ترمیم با اپوکسی سه جزئی انجام شد. نتایج آزمایش مقاومت فشاری تیرها نیز به صورت آماری به روش نشریه ACI 214.4R بررسی گردید که در بخش های بعد در مورد آن بحث شده است. نکته قابل تامل فرایند مغزه گیری ها، مشاهده ترک در برخی نمونه های اخذ شده است. برای

مثال، در مغزه گیری یکی از تیرها، در عمق نمونه ترک مشاهده شد (شکل ۱۴) که نشان دهنده ترک خوردگی بیش از ناحیه پوششی است. این مساله بسیار اهمیت داشته و ممکن است ناشی از عمق کربناسیون زیاد، ترک سازه ای، انبساط ناشی از مجاورت با میلگرد خورده شده و ... باشد. به هر جهت موضوع ترک احتمالی در عمقی بیش از بتن پوششی در روند بهسازی تیرها بسیار تاثیر گذار بود و دستورالعمل های خاصی در این رابطه برای پیمانکار طرح بهسازی ارائه گردید.



تصویر (۱۴) - ترک در عمق نمونه اخذ شده از یکی از تیرها

۳. نتایج کلی ارزیابی کیفی

ارزیابی کیفی عرشه پل به روش بازدید چشمی و به طور مفصل برای تمامی نواحی آن انجام گرفته است. ارزیابی چشمی مطابق نشریه ACI 201.1R-08 [۴] انجام گرفته است. این ارزیابی نتایج کلی زیر را به همراه داشته است:

- ۱- خوردگی شدید میلگردها به ویژه میلگردهای عرضی که به دلیل تخریب بتن پوششی ناشی از واکنش های ذوب و یخ و احتمالاً کربناسیون رخ داده است.
- ۲- زوال شدید و تخریب بتن به ویژه بتن دال و بتن سرستون و تیرهای عرشه در محل اتصال به تیر کلاهی که به دلیل واکنش های ذوب و یخ، حمله کلریدی ناشی از موارد ضد یخ و عدم هدایت و زهکشی آب های سطحی حاوی یون های کلرید.
- ۳- وجود ترک های عمده در تیرها که ارزیابی های کمی حاکی از سازه ای بودن آن ها در موارد متعدد دارد. ممکن است ترک خوردگی به علت آثار دینامیکی بار ترافیکی و یا تاثیرات موارد ۱ و ۲ فوق تشدید شده باشند.
- ۴- عدم وجود سیستم زهکشی مناسب بر روی عرشه که زوال شدید را در پی داشته است.
- ۵- لرزش نسبتاً قابل توجه عرشه حین عبور کامیون دارای بار.
- ۶- زنگ زدگی نسبی نرده های حفاظ و اتصال نه چندان مناسب به عرشه که احتمال سقوط خودرو را حین برخورد های احتمالی افزایش می دهد.
- ۷- روسازی در بخش هایی دارای گودال و نیز ترک های مختلف (عمدتاً از نوع بلوکی) است که نیازمند ترمیم اساسی است.
- ۸- پوسته شدگی بتن محل حفاظ ها که مرتبط با آثار ذوب و یخ متوالی و احتمالاً حمله کلریدی است.
- ۹- زوال صفحات نئوپرن زیر تیرهای اصلی به علت پدیده کهولت (Ageing) و از دست دادن خاصیت الاستومری آن ها. این موضوع یکی از دلایل لرزش نسبتاً قابل توجه عرشه است.

۴. ارزیابی کمی

در این بخش ارزیابی کمی سیستم عرشه تحت اثر بارهای طراحی مطابق نشریه های شماره ۱۳۹ و ۳۸۹ سازمان برنامه و بودجه کشور [۵] و [۶] مورد توجه قرار می گیرد. ابتدا تحلیل آماری نتایج آزمایشگاهی مصالح ارائه شده و به دنبال آن مدل نرم افزاری عرشه در نرم افزار CSI-Bridge [۷] بررسی شده است. تمام محاسبات به صورت دستی نیز کنترل شده که در این مقاله اشاره نمی شود. نتایج این بخش حاکی از ضعف سازه ای از نوع برشی و خمشی در سیستم عرشه است که باید در کنار ترمیم مشکلات بتن که قبلاً اشاره شد، رفع شود.

۱.۴ تحلیل نتایج آزمایش ها

به دلیل ماهیت تصادفی مقاومت مصالح در هر سازه ای، پراکندگی در نتایج آزمایش های مصالح حتی تحت شرایط یکسان امری اجتناب ناپذیر است. این موضوع از آن جهت اهمیت زیادی در فرآیند ارزیابی دارد که در بهترین حالت فقط نمونه های محدودی از سراسر یک سازه پیوسته در اختیار است. بنابراین باید با در نظر گرفتن پراکندگی نتایج و منابع عدم قطعیت موجود، یک توزیع آماری برای نتایج استخراج نموده و سپس اقدام به انتخاب مقدار مناسب مقاومت مصالح در فرآیند ارزیابی سازه ای نمود. در این مطالعه از روابط آماری نشریه ACI 562M-16 که بر مبنای روش آماری ضریب تیرانس (Tolerance factor method) است، برای تعیین مقاومت بتن و میلگرد براساس نتایج آزمایش های موجود استفاده شده است. این روش از توزیع t -student استفاده می کند. مبنای کار تعیین مقاومت کسرک ۱۰٪ (10% fractile) مقاومت ها است به گونه ای که سطح اطمینان ۹۰ درصد را در جامعه آماری تامین کند. براین اساس، مقاومت معادل تسلیم میلگردها در نشریه ACI 562-M به روش زیر محاسبه می شود:

$$f_{y,eq} = (\bar{f}_y - 28) \exp(-1.3k_s V) \quad (1)$$

که در آن:

\bar{f}_y مقاومت تسلیم میانگین کلیه نمونه ها،

k_s ضریبی که بستگی به تعداد نمونه ها دارد و

V نسبت انحراف معیار به میانگین مقاومت تسلیم نمونه ها (ضریب تغییرات-COV) است.

همچنین مقاومت معادل فشاری نمونه های مغزه بتن در نشریه ACI 562-M به روش زیر محاسبه می شود:

$$f_{ceq} = 0.9\bar{f}_c \left[1 - 1.28 \sqrt{\frac{(k_c V)^2}{n} + 0.0015} \right] \quad (2)$$

که در آن:

\bar{f}_c مقاومت فشاری میانگین کلیه نمونه ها،

k_c ضریبی که بستگی به تعداد نمونه ها دارد،

V نسبت انحراف معیار به میانگین مقاومت تسلیم نمونه ها (ضریب تغییرات-COV) و

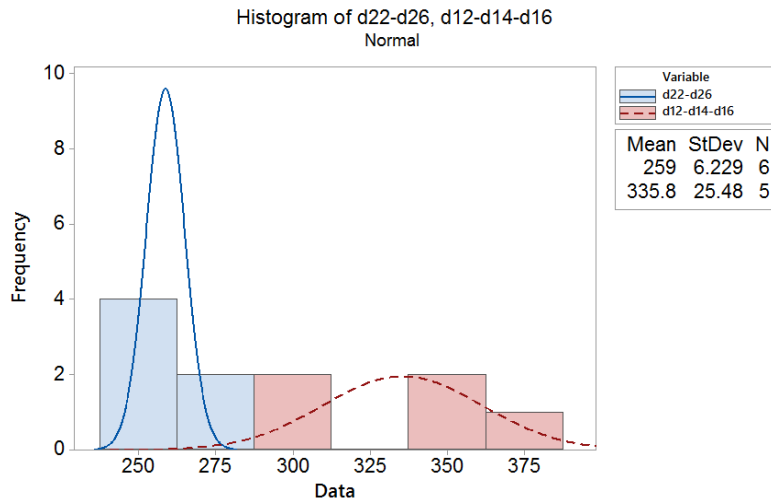
n تعداد نمونه ها است.

براساس روابط ۱ و ۲ در بالا، مقاومت های فولاد و بتن قابل استفاده در ارزیابی کمی محاسبه می شوند. در جدول (۲) یک نمونه برای تعیین مقاومت تسلیم میلگردهای دال نشان داده شده است. همچنین، در تصویر ۱۵ یک نمونه هیستوگرام مقاومت تسلیم نمونه های میلگرد همراه با منحنی توزیع نرمال برازش شده نشان داده شده است

جدول (۲) - نتایج تحلیل آماری مقاومت تسلیم میلگردهای با قطر ۱۲، ۱۴ و ۱۶ میلی متر (۵ نمونه که در یک رده قرار می گیرند)

$\Phi 12, \Phi 14, \Phi 16$ (MPa)

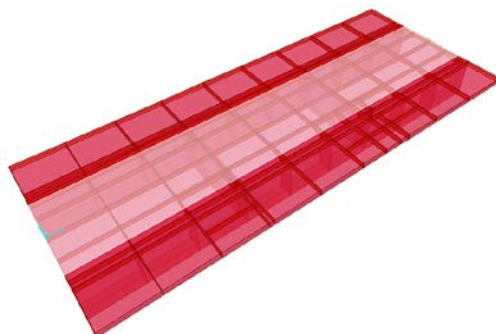
Number of Samples	Mean	Standard Deviation	COV	$f_{y,eq}$
5	33.58	2.55	0.075	252



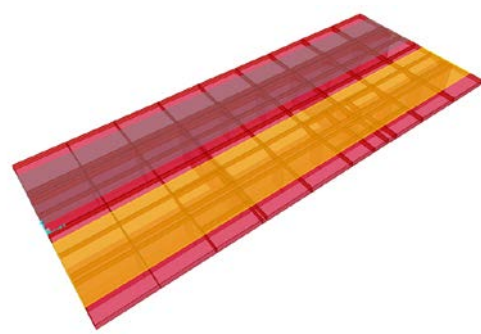
شکل (۱۵) - هیستوگرام مقاومت تسلیم نمونه های میلگرد همراه با منحنی توزیع نرمال برازش شده (محور افقی مگاپاسکال)

۲.۴ مدل سازی نرم افزاری و ارزیابی ظرفیت باربری خمشی و برشی تیرهای عرشه

مدل سازه ای عرشه زیر اثر بارهای مرده و زنده در نرم افزار CSI-Bridge ایجاد شده است. از این مدل برای ارزیابی تلاش های داخلی تیرهای اصلی، تغییر شکل های عرشه و زمان تناوب نوسان مودهای عرشه بهره گرفته شده است. تمامی خروجی های نرم افزاری، کنترل دستی شده اند. تیرها با استفاده از اجزا FRAME و دال با استفاده از اجزا SHELL مدل سازی شده اند. شبکه بندی دال عرشه در فواصل ۰/۵ متری انجام شده است. از آن جایی که ۵ دهانه پل مشابه و دو سر ساده است، فقط یک دهانه آن مدل سازی شده و برای تمامی دهانه ها از نتایج آن بهره گرفته شده است. به علاوه، با توجه به از دست رفتن خاصیت الاستومری صفحات نئوپرنی و تاثیر نه چندان زیاد در تلاش های داخلی، مدل سازی تکیه گاه های انتهایی تیرهای عرشه به صورت غلتکی کامل و بدون انعطاف پذیری راستای قائم انجام شده است. بارگذاری لحاظ شده مطابق نشریه ۱۳۹ سازمان برنامه و بودجه کشور، کامیون ۴۰ تن استاندارد و تانک است. برای کامیون دو خط عبور به عرض هر یک ۳/۵ متر و برای تانک فقط یک خط عبور در وسط (وضعیت حاکم) در نظر گرفته شده است (تصاویر ۱۶ و ۱۷) نتایج تحلیل نشان می دهد که کامیون ۴۰ تن حاکم بر تلاش های داخلی و تغییرشکل های عرشه است. برای بررسی موضوع لرزش، فرکانس طبیعی نوسان عرشه مودهای پایین به ویژه در مود ۱ (با توجه به دو سر ساده بودن عرشه) بسیار حایز اهمیت است. برای این موضوع بار کامیون به عنوان بخشی از جرم معرفی و فرکانس مودها محاسبه گردید که دید بسیار دقیقی از علل ارتعاش به دست داد.



تصویر (۱۷) - خط عبور تانک ۹۰ تن در مدل نرم افزاری



تصویر (۱۶) - خطوط عبور کامیون ۴۰ تن در مدل نرم افزاری

خروجی مدل حاکی از ضعف ۲۸ درصدی تیرها عرشه در خمش و ضعف ۳۹ درصد آن ها در برش است. همچنین دال های طره عرشه در حد ۲۵ درصد ضعف خمشی دارند. با توجه به این نتایج، جبران ضعف خمشی و برشی سیستم عرشه همراه با بهسازی مصالح زوال یافته بتن و میلگرد ضروری است.

همچنین دال قسمت های طره عرشه به دلیل زوال بتن و ضعف میلگردها ناشی از خوردگی آن ها، دارای ضعف جدی خمشی بوده و لذا تقویت و بهسازی این بخش از عرشه نیز در تمام دهانه ها ضروری است. راهکارهای بهسازی و طرح نهایی در بخش بعد آورده شده است.

۵. راهکارهای بهسازی عرشه

بهسازی پل صلووات آباد به دلیل مشکلات توام کیفیت بتن و میلگرد، سن بالای پل، ترک خوردگی شدید تیرها از یک طرف و ضعف مقاومتی اجزای آن نسبتاً پیچیده است. بنابراین راهکارهای بهسازی اساساً ترکیبی از روش های مختلف است. راهکارها حسب ملاحظات فنی و اقتصادی بررسی خواهند شد. چندین گزینه پیشنهادی زیر برای بهسازی و تقویت عرشه قابل طرح است:

(الف) تقویت از طریق غلاف بتنی

(ب) تقویت از طریق غلاف فولادی

(پ) تقویت از طریق لایه های کامپوزیت FRP

(ت) تقویت از طریق نصب میلگردهای کامپوزیتی در نزدیکی سطح و داخل پوشش بتن موجود (روش NSM)

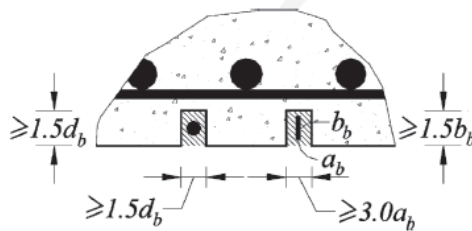
(ث) کاهش تلاشهای داخلی عرشه از طریق نصب پایه های جدید میانی

موضوع لرزش محسوس پل برای عابر پیاده و ایجاد حس روانی نامنی ناشی از فرکانس پایین عرشه است. چنانچه بهسازی عرشه برای حل این مشکل مد نظر باشد، بدون تردید گزینه (ث) یعنی افزایش سختی عرشه و به تبع آن افزایش فرکانس های غالب نوسان عرشه از طریق نصب پایه های جدید میانی به همراه ترکیبی از تقویت های دیگر، گزینه برتر می باشد. ارزیابی های تحلیلی در یک مدل جایگزین با پایه میانی نشان می دهد که فرکانس نوسان اصلی پل حدوداً ۲ برابر شده و مقادیر گشتاور و برش تیرهای عرشه به شدت افت خواهند کرد که گزینه مطلوبی است. چنانچه موضوع کاهش لرزش ها در اولویت اول حالات حدی تقویت برای کارفرما نباشد (به دلایل هزینه و مدن زمان اجرای طرح بهسازی)، روش های (الف) تا (ت) گزینه های طرح بهسازی و تقویت خواهند بود.

با توجه به بررسی های انجام گرفته، گزینه غلاف فولادی با توجه به نامناسب بودن وضعیت کیفی و مقاومت بتن پایه و احتمال زیاد جداشدگی ورق و اپوکسی از سطح بتن موجود (debonding) برای این پروژه مناسب تشخیص داده نمی شود. هر چند گزینه غلاف فولادی می تواند منجر به افزایش شکل پذیری قابل توجهی شود که شاید در روش های دیگر تقویت امکان پذیر نبوده و یا با دشواری قابل تامین باشد.

روش تقویت با لایه های کامپوزیت FRP روش بسیار مناسبی برای تقویت سازه های بتن آرمه است. سهولت نصب و اجرا، توجه اقتصادی، عدم افزایش ابعاد مقطع و زیبایی بیشتر طرح، امکان تقویت خمشی و برشی به صورت توام و دوام زیاد از جمله مزایای تقویت به این روش است. بنابراین به عنوان یکی از گزینه های جدی طرح تقویت دال و تیرهای عرشه در این پروژه مطرح شده است. محاسبات نشان می دهد که تقویت خمشی دال عرشه با این روش کاملاً امکان پذیر بوده، ولی به دلیل مقاومت موجود کم تیرهای عرشه، مقاومت پایین بتن و ... امکان انجام تقویت خمشی تیرهای عرشه با این روش با توجه به محدودیت های استاندارد [۸] ACI 440 وجود ندارد. با این وصف امکان انجام طرح تقویت برشی کماکان وجود دارد. در نهایت، گزینه طرح تقویت خمشی دال و برشی تیرهای عرشه را با استفاده از لایه های کامپوزیت FRP به عنوان بخشی از تقویت به عنوان گزینه ارجح برای این پروژه انتخاب شد.

روش تقویت از طریق نصب میلگردهای کامپوزیتی در نزدیکی سطح و داخل پوشش بتن موجود (روش NSM) یک روش نسبتاً جدید و بسیار مناسب برای تقویت خمشی و برشی اجزای بتن آرمه است. در تصویر (۱۸) این روش نشان داده شده است. روش NSM شامل ایجاد شیار در بتن پوششی، تعبیه میلگردهای کامپوزیتی یا لمینت FRP و سپس پرکردن شیار با گروت اپوکسی است. روش در ACI 440 برای تقویت اعضای تحت برش و خمش استانداردسازی شده است. در خصوص تیرهای و دال های پروژه حاضر به دلیل ضعف جدی بتن پوششی، خوردگی میلگردها، پوشش بسیار کم میلگردها و بعضاً بدون پوشش و عدم نفوذ بتن به طور کامل بین دو لایه میلگرد تحتانی اصلی تیرها عملاً امکان نصب به روش NSM را با قابلیت اطمینان کافی منتفی می کند. حتی در جاهایی که بتن دال نسبتاً سالم است، مقدار پوشش کم بوده و امکان عدم موفقیت طرح زیاد است. بنابراین علیرغم مزایای بسیار قابل توجه این روش برای تقویت خمشی، به دلیل شرایط نامناسب بتن و پوشش عملاً این گزینه منتفی می باشد.

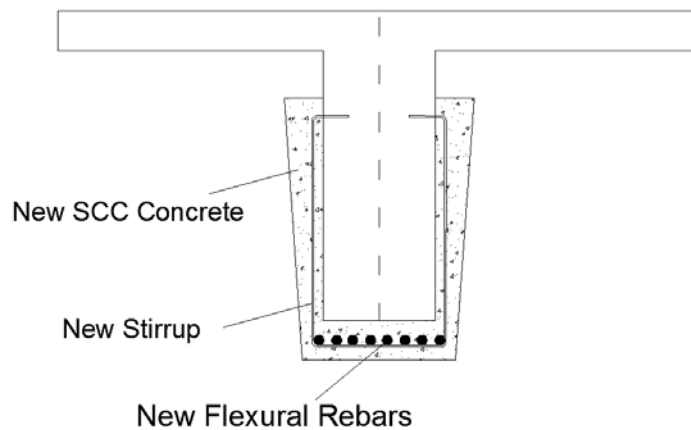


تصویر (۱۸) - تقویت خمشی یک عضو بتنی به روش نصب در نزدیک سطح (NSM) [۸]

برای تیرهای اصلی عرشه، با توجه به زوال جدی بتن موجود و ترک های عمده، روش غلاف بتنی به عنوان روش اصلی تقویت انتخاب گردید. از نکات قابل توجه در گزینه غلاف بتنی می توان به موارد زیر اشاره نمود:

- کمک به بهبود موضوع لرزش پل به دلیل افزایش ابعاد مقطع و به تبع آن افزایش سختی تیرها امکان پذیر است.
- سازگاری مصالح بتن جدید و قدیم بهتر از سایر روش ها تامین می شود.
- به دلیل نیاز به ترمیم ترک ها و لزوم برداشتن پوشش تیرها، بتن ریزی جدید پس از ترمیم ترک ها با رزین های اپوکسی امر قابل توجیهی است.
- هزینه های آن متعارف است.

از آن جایی که در این روش ابعاد مقطع افزایش داده می شود، می توان طرح تقویت خمشی و برشی را به صورت توأم مدنظر قرار داد. در روند طراحی انجام شده، افزایش بعد تیر از طرفین به میزان ۱۲۵ میلی متر و در ناحیه تحتانی تیر به میزان ۲۵۰ میلی متر در نظر گرفته شده است. در ناحیه جان، خاموت جدید و در ناحیه تحتانی میلگرد خمشی جدید طراحی می شود. به علت عرض کم قسمت های اضافه شده، گزینه مناسب استفاده از بتن خودتراکم (SCC) با طرح اختلاط خاص با توجه به مصالح منطقه است که لازم است توسط پیمانکار مدنظر قرار بگیرد. برای اجرای غلاف بتنی لازم است بتن های پوشش تیرها برداشته شده و در صورت نفوذ ترک ها در بتن هسته آن ها، عملیات ترمیم با تزریق پرفشار اپوکسی به روش جاگذاری روزنه تزریق از نوع عمقی (Packer Placing) انجام شود. سطح نمایان شده مضرس خواهد بود. در این حالت میلگردهای عرضی جدید به شکل U در بتن جان کاشت شده و در سطح پایینی تیر، میلگردهای جدید خمشی را در بر می گیرد (تصویر ۱۹). سپس بتن ریزی SCC در موضع انجام می شود. همان طور که اشاره شد، این روش به دلیل افزایش ابعاد، منجر به افزایش سختی خمشی و برشی نیز شده و در کاهش لرزش های محسوس تاثیرگذار است.



تصویر (۱۹) - طرح شماتیک تقویت تیرهای عرشه با غلاف بتنی (تقویت خمشی و برشی)

۶. نتیجه گیری

این مقاله یک مطالعه موردی شناسایی، ارزیابی و بهسازی عرشه پل بتن مسلح درجا و قدیمی در یک مسیر شریانی اصلی است. ابتدا در یک برنامه شناسایی، وضع موجود پل مشخص شد. برنامه شناسایی شامل تعیین ابعاد هندسی و مشخصات مصالح عرشه پل بوده است که از طریق بررسی های محلی و برداشت و نیز انجام آزمایش های مخرب و نمونه برداری مشخص شده است. ارزیابی های چشمی، آزمایش های مصالح، مدل سازی نرم افزاری و محاسبات دستی

حاکمی از ترک خوردگی شدید تیرهای بتنی عرشه (که از نوع خمشی-برشی هستند)، زوال شدید بتن و میلگرد در نقاط مختلف عرشه (شامل دال و تیرهای آن) است. زوال بتن (عموماً در بتن پوششی و در مواردی بیش از پوشش) عموماً ناشی از جمله کلریدها (به مقدار زیاد)، واکنش های کربناسیون، فشار انبساطی ناشی از فرایند زنگ زدگی میلگردها و آثار ذوب و یخ متوالی طی سالیان گذشته تشخیص داده شد. همچنین ارزیابی کمی نشان می دهد تحت اثر بارگذاری کامیون استاندارد ایران، ضعف جدی در مقاومت برشی و خمشی تیرهای نگهدارنده عرشه و نیز مقاومت خمشی مثبت دال میانی عرشه وجود دارد. براساس نتایج آزمایش ها، مدل سازی عددی و محاسبات دستی میزان ضعف دال و تیرهای عرشه تعیین شده و راهکاری بهسازی سیستم عرشه شامل غلاف بتنی، غلاف فولادی، لایه های کامپوزیتی FRP و نصب پایه میانی به تفکیک مورد بررسی قرار گرفته است. در نهایت با توجه ملاحظات فنی، اجرایی و اقتصادی گزینه ارجح طرح تقویت پیشنهاد شده است. ترمیم بتن های زوال یافته با استفاده از مصالح ترمیمی پایه سیمانی، رفع زنگ زدگی میلگردهای دارای خوردگی، افزایش باربری خمشی و برشی تیرهای عرشه و نیز افزایش باربری خمشی دال عرشه با استفاده از ترکیب روش های غلاف بتنی (با بتن خودتراکم-SCC) و لایه های کامپوزیتی FRP (به صورت محدود) راهکارهای نهایی برای تقویت عرشه است. تقویت انجام شده صرفاً به دال و تیرهای طولی عرشه مربوط بوده و سلامت کلی پل را تامین نمی نماید.

۷. مراجع

- [1] ACI 562M-16 (2016). "Code Requirements for Assessment, Repair and Rehabilitation of Existing Concrete Structures and Commentary". American Concrete Institute.
- [2] ASTM C 1260-14 (2014). "Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates". American Society for Testing and Material.
- [3] ACI 214.4R-10 (2011). "Guide for Obtaining Cores and Interpreting Compressive Strength Results". American Concrete Institute.
- [4] ACI 201.1R-08 (2008). "Guide for Conducting a Visual Inspection of Concrete in Service". American Concrete Institute.
- [5] آیین نامه طرح و محاسبه پل های بتن آرمه (نشریه ۳۸۹)، سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور، ۱۳۸۷
- [6] آیین نامه بارگذاری پل ها (نشریه ۱۳۹)، تجدید نظر اول، سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور، ۱۳۷۹
- [7] CSI (2010). "Integrated 3D Bridge Design Software (CSiBridge)". Computers and Structures Inc., University of California, Berkeley.
- [8] ACI 440.2R-17 (2017) "Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures". American Concrete Institute.