

## تعمیر و نگهداری پل‌های بتنی راه آهن جنوب در مقابل شرایط نامساعد محیطی با استفاده از مصالح و تکنیک‌های نوین

مجید صادق آذر<sup>۱</sup>، ریموند صوفز زاده<sup>۲</sup>، علی دلنواز<sup>۳</sup> سحر مکرمی<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup> دکتری عمران، عضو هیئت علمی دانشگاه تهران، Email: msadegha@chamran.ut.ac.ir

<sup>۲</sup> کارشناس ارشد مهندسی عمران، مهندسین مشاور پردیس روز، Email: Raymond\_sfz@yahoo.com

<sup>۳</sup> دانشجوی دکتری عمران، مهندسین مشاور پردیس روز، Email: alidelnavaz@cic.aut.ac.ir

<sup>۴</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد عمران، مهندسین مشاور پردیس روز، Email: Mokarrami\_vim@yahoo.com

### چکیده

با توجه به گستردگی جغرافیایی کشور و شرایط محیطی مختلف کشور ایران و نقش کلیدی ایمنی پلها در ایمنی و سلامت خطوط راه آهن باید از مصالح مناسب و با دوام برای هر منطقه در ساخت پلهای راه آهن استفاده نمود. بتن و بتن مسلح به عنوان مصالح با دوام در بسیاری از سازه ها به کار گرفته شده اند. اما در طول زمان، عملکرد و دوام بتن نشان داده است که ساختار فیزیکی و رفتار سازه ای آن تابع شرایط محیطی است. در صورتی که بتن مناسب با شرایط محیطی و اقلیمی طراحی و اجرا نگردد، دوام و عمر مفید آن کاهش یافته و نیاز به تعمیر آن افزایش می‌یابد. مصداق این مورد در پلهای راه آهن در سواحل جنوبی کشور و نواحی خلیج فارس است. در این منطقه به دلیل شرایط خاص محیطی (وجود کلر، سولفات، رطوبت و دمای زیاد) سازه های بتنی از عمر کوتاهی برخوردارند. عمر مفید یا سرویس دهی سازه‌ها تابع کیفیت مصالح مصرفی و نحوه اجراست. به عبارت دیگر، چنانچه برای ساخت سازه از مصالح نامناسب و اجرای نامطلوب بهره گرفته شود، عمر مفید سازه کوتاه بوده و نیاز به تعمیر خواهد داشت.

از آنجا که در چند سال اخیر، به علت آسیب دیدگی های شدید پلهای بتنی در منطقه مجاور حوزه خلیج فارس، عملیات تعمیر به دفعات متعدد در منطقه اجرا گردیده، در بعضی موارد عملکرد مصالح تعمیری با شکست روبرو شده و در کوتاه مدت بخش‌های تعمیر شده دچار آسیب دیدگی مجدد شده‌اند. لذا به منظور حفظ سرمایه های ملی و جلوگیری از دوباره کاری ها بایسته است که تعمیر و نگهداری این گونه سازه‌ها با روش‌ها و مصالح مناسب انجام گیرد. استفاده از مصالح و تکنیک های نوین مهندسین را در نیل به این هدف بهتر یاری خواهد نمود.

این مقاله به بررسی هشت پل بزرگ بتنی راه آهن زاد محمود- فین انشعاب بندر عباس می‌پردازد که ستونهای آنها به دلیل اثرات محیطی و عمدتاً نفوذ یون کلر دچار ترک خوردگی و آسیب دیدگی شدید شده‌اند و شدت این آسیب‌ها باعث اعمال تقلیل سرعت

قطار بر روی بعضی از این پل‌ها شده است. در این راستا ابتدا به تشریح عملیات شناسایی و انجام بازرسی‌های لازم از پل‌ها پرداخته شده و سپس آزمایشهای مخرب و نیمه مخرب لازم جهت تشخیص علت و گستره آسیب‌ها تعیین می‌شوند. با تفسیر نتایج آزمایشها و مقایسه با استانداردهای موجود به علل، چگونگی و گستره آسیب‌ها پی برده می‌شود و سپس با توجه به ماهیت و علل خرابی ها، شرایط منطقه و محدودیت‌های اجرایی، روشهای نوینی با استفاده از مصالح جدید جهت ترمیم و حفاظت ستونهای آسیب دیده ارائه و تشریح می‌گردد.

**کلمات کلیدی:** مصالح ترمیمی، تعمیر، حمله کلروری، شرایط محیطی، پل بتن مسلح

### ۱- مقدمه

بلاک زاد محمود- فین بخشی از راه آهن محور بافق- بندرعباس می‌باشد. این محور به علت مشخصات فنی بالای آن بیش از دو برابر احداث شبکه سراسری (بندر ترکمن در شمال به بندر امام در جنوب) وسعت و حجم عملیاتی داشته است و عمدتاً برای نیازهای ترابری باری احداث شده است و به علت متصل کردن قطبهای مهم باری و صنعتی و قرار گرفتن در مسیر بارهای ترانزیتی برآورد شده است.

در این محور قطارهای باری و مسافری به ترتیب با سرعتهای ۱۲۰ و ۱۶۰ کیلومتر بر ساعت می توانند تردد نمایند و در آینده نزدیک به سیستمهای علائم و ارتباطات پیشرفته نیز مجهز خواهد شد. همچنین در ساخت این محور امکان برقی کردن آن نیز ملاحظه گردیده است.

در مقاله حاضر روند بررسی و طرح ترمیم و بهسازی ۸ دستگاه پل از پلهای موجود در محور مذکور که پایه‌های آنها آسیب دیده‌اند، ارائه می‌شود. پل های مورد مطالعه به ترتیب در کیلومترهای ۱۳۸۵+۹۸۳، ۱۳۸۷+۵۵۰، ۱۳۸۸+۰۸۰،

۱۳۸۸+۴۰۰، ۱۳۹۲+۰۲۰، ۱۳۹۲+۸۰۰، ۱۳۹۵+۵۵۰ و ۱۴۰۲+۱۰۰ قرار دارند که از این تعداد تنها پل کیلومتر ۱۴۰۲+۱۰۰ به فاصله کمی بعد از ایستگاه فین و به سمت ایستگاه انشعاب واقع گردیده است.



شکل ۱: موقعیت بلاک زاد محمود-فین در نقشه بلاکهای راه آهن بافق- بندرعباس

شکل ۱ نقشه بلاکهای راه آهن بافق- بندرعباس را که در آن بلاک زاد محمود- فین که هشت پل مورد بررسی در آن قرار دارند مشخص شده است را نشان می‌دهد.

در بررسی وضعیت سرویس‌دهی پل‌ها و تعیین طرح بهسازی و ترمیم پل‌ها ابتدا مبادرت به شناسایی و گردآوری اطلاعات، اسناد و نقشه‌های مربوط به پلها، موجود در آرشیو راه‌آهن و مشاور طراح وقت گردید.

در مرحله بعدی بازدید فنی و بررسی معایب موجود سازه‌ها در محل طی چند مرحله قبل و بعد از خاکبرداری اطراف پایه پلها صورت گرفت.

در نهایت ضمن انجام بررسی نتایج آزمایشات مورد نیاز مخرب و غیرمخرب جهت اطمینان از علت و میزان خرابیهای موجود در پلها روشهای ترمیم و بهسازی و حفاظت پایه‌ها ارائه شده است.

## ۲- مشخصات سازه‌ای پلها

در تمام پلهای مورد بررسی سیستم سازه‌ای عرشه از نوع تیر پیش‌تنیده پیش‌کشیده T شکل و دال بتنی درجا به ضخامت ۲۰ سانتیمتر می‌باشد. تیرهای عرشه در محل پایه‌ها بر روی نشویرن قرار می‌گیرند. پایه‌ها شامل ستون با مقطع دایره و سرستون با مقطع مستطیلی می‌باشند. بر حسب دهانه پلها، قطر ستونها بین ۱۲۰ تا ۱۴۰ سانتیمتر متغیر می‌باشد. به غیر از پل کیلومتر

۱۳۹۲+۰۲۰ که بر روی پی سطحی واقع می‌باشد، پی باقی پلها از نوع سرشمع و شمع می‌باشد. کوله پلها شامل هر دو نوع کوله باز و بسته می‌باشد.

## ۳- شرح آسیب پلها

با توجه وضع ظاهری پایه پل‌ها و بررسی انجام شده نوع خرابی‌ها به سه دسته ذیل تقسیم شدند:

خرابی درجه A: این نوع خرابی شامل ترک‌های ظاهری بر روی کاور بتن می‌باشد که مبین شروع واکنشهای خوردگی آرماتورها می‌باشد.

خرابی درجه B: به معایبی گفته می‌شود که در آن کاور بتن در اثر انبساط آرماتور طبله کرده و در حال جدا شدن از پایه می‌باشد.

خرابی درجه C: به معایبی گفته می‌شود که در آن کاور بتن در قسمت‌های معیوب از پایه جدا شده است و آرماتورهای دورپیچ ستونها کاملاً نمایان شده‌اند.

در کنار خرابی ستونها، خرابی‌های موضعی در عرشه پل و کوله‌ها نیز مشاهده می‌شد که با توجه به اینکه از درجه دوم اهمیت برخوردار بودند، در مقاله حاضر به آنها پرداخته نشده است.

در هنگام بازدید از پلها نسبت به عکس‌برداری از کلیه قسمتهای آسیب‌دیده پلها و به خصوص پایه‌ها اقدام شده و با توجه به تقسیم‌بندی فوق‌الذکر نقشه ترک (Crack Pattern) در کلیه پایه‌ها تهیه گردید. اشکال ۲ الی ۴ نمونه‌هایی از خرابی‌های پلها را نشان می‌دهد. همچنین در شکل ۵ نمونه‌ای از نقشه‌های تهیه شده از موقعیت ترک ستون‌ها ارائه شده است.



شکل ۲: نمونه ای از خرابی نوع A

چشمی انجام آزمایشات گوناگون نیمه مخرب و غیرمخرب بر روی اعضای سازه می‌باشد. خلاصه نوع و اهداف آزمایشات مخرب و غیرمخرب انجام گرفته بر روی پلها توسط آزمایشگاه در جدول ۱ آورده شده است.

هریک از آزمایشات ذکر شده در جدول ۱ به تفکیک برای هر پل انجام و نتایج آن مورد بررسی قرار گرفت. نتایج آزمایشها نشان می‌داد که نفوذ یون کلراید در بتن و ایجاد خوردگی در آرماتورها عامل اصلی ایجاد خرابی در پلها بوده و بقیه عوامل نقش چندانی در این زمینه نداشته‌اند. لذا در زیر نتایج حاصل از آزمایشات یون کلر به طور مختصر ذکر می‌گردد:

نتایج آزمایشات میزان یون کلراید در خاک و آب محل ساختگاه پلها و همچنین آزمایش پروفیل کلر در عمق بتن ستونها وجود مقدار زیاد (بیش از حد مجاز) یون کلراید در این قسمتها را تأیید می‌نماید.

میزان مجاز یون کلراید در شرایط جوی پروژه طبق استاندارد آبا به ۰/۱۵ درصد نسبت به وزن سیمان می‌باشد. [۱]



شکل ۳: نمونه ای از خرابی نوع B



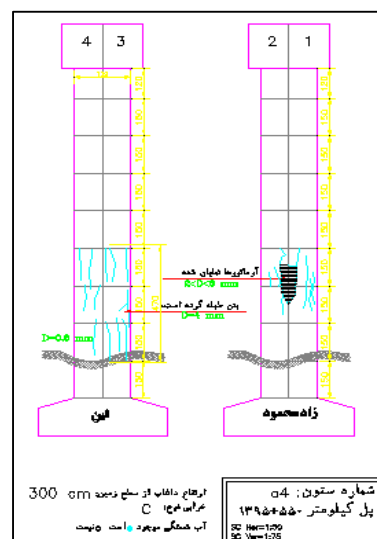
شکل ۴: نمونه ای از خرابی نوع C

جدول ۱: آزمایشهای لازم [۷] و [۸]

ردیف	شرح	هدف
۱	بررسی پتانسیل خوردگی آرماتور به روش نیم پیل	کنترل خوردگی آرماتور
۲	تعیین پروفیل نفوذ یون کلراید	کنترل غلظت کلراید در بتن
۳	آزمایش غیرمخرب به طریق ماورای صوت (آلتراسونیک)	بررسی کیفیت بتن
۴	تعیین عمق کربناته بتن	کنترل کربناتاسیون
۵	تعیین پوشش بتنی و شبکه آرماتور	تعیین پوشش آرماتورها و محل آرماتورها
۶	بررسی واکنش زایی سنگدانه‌ها بوسیله آزمایش پتروگرافی	کنترل واکنش قلیایی
۷	تعیین سولفات بتن	کنترل حمله سولفاتی
۸	مغزه‌گیری از بتن سخت شده به قطر تا ۱۰ سانتیمتر و عمق تا ۲۵ سانتیمتر	تعیین مقاومت فشاری بتن موجود
۹	آزمایش کشش میلگرد	تعیین مقاومت کششی میلگرد
۱۰	میزان یون کلر خاک و آب	تعیین غلظت کلراید خاک
۱۱	میزان سولفات خاک و آب	تعیین غلظت سولفات خاک
۱۲	انجام آزمایش چکش اشمیت (میانگین ده نقطه در محل)	تعیین مقاومت و یکنواختی بتن موجود
۱۳	آزمایش مقاومت الکتریکی	کنترل خوردگی آرماتور

۵- بررسی اثر تغییرات سطح مقطع ستونها در باربری و رفتار پلها

رفتار لرزه‌ای و همچنین میزان باربری پل به عوامل مختلفی وابسته است که از آن جمله می‌توان به نسبت سختی اعضای پل، میزان سختی زیر سازه و ابعاد سازه اشاره کرد. با توجه به اینکه در پلهای حاضر، قسمتی از پوشش بتن ستونها به علت خوردگی از بین رفته است، در نتیجه باربری پل نسبت به حالت مفروض طراحی تغییر می‌کند.



شکل ۵: نمونه‌ای از نقشه موقعیت ترک ستون

۴- آزمایشات انجام گرفته و نتایج حاصله

یکی از مهمترین و قابل اعتمادترین روشهای تعیین میزان وسعت و علت بروز خرابی‌ها در سازه‌ها در تکمیل بازرسی‌های محلی

## آکرلیک

- پلی یورتان
- اپوکسی



شکل ۶: اعمال لایه سطحی محافظ بر ستون تعمیر

۷- محاسبه عمر مفید باقی مانده پل ها پس از تعمیر ستونها  
برای تعیین عمر مفید بهره برداری پل های مورد مطالعه از ضوابط آیین نامه FIB 5.6 استفاده می شود. در این آیین نامه از دو روش احتمالاتی کامل و روش شبه احتمالاتی (روش ضرایب جزئی) برای تعیین عمر مفید بهره برداری استفاده می شود. بر این اساس رابطه احتمالاتی زیر برای تعیین عمر مفید در مقابل نفوذ کلراید باید برآورده گردد:

$$P\{\} = P_{\text{dep.}} = P\{C_{\text{crit.}} - C(a, t_{\text{SL}}) < 0\} < P_0 \quad (۱)$$

در رابطه فوق  $P\{\}$  احتمال از بین رفتن لایه مقاوم،  $C_{\text{crit}}$  مقدار کلراید بحرانی (% وزن سیمان)،  $C(a, t_{\text{SL}})$  مقدار کلراید در عمق  $a$  در زمان  $t_{\text{SL}}$  (% وزن سیمان)،  $a$  پوشش بتن (mm)،  $t_{\text{SL}}$  عمر بهره برداری طراحی (سال) و  $P_0$  احتمال خرابی هدف می باشند. با توجه به این موضوع که اغلب مشاهدات نشان می دهند که انتقال کلراید به بتن از طریق انتشار است، لذا مدلهای احتمالاتی فوق در در ضمیمه B آیین نامه FIB بر اساس قانون دوم فیک بنا نهاده شده است.

بر این اساس معادله حالت حدی ۲، که در آن غلظت کلراید بحرانی،  $C_{\text{crit}}$ ، با غلظت کلراید بحرانی در محل آرماتورها در زمان  $t$ ،  $C(x=a, t)$ ، مقایسه می شود، بنا نهاده شده است:

$$C_{\text{crit}} = C(x=a, t) = C_0 + (C_{S, \Delta x} - C_0) \left[ 1 - \text{erf} \frac{a - \Delta x}{2\sqrt{D_{\text{app. c}} t}} \right] \quad (۲)$$

در رابطه فوق داریم:

$$C_{\text{crit}}: \text{مقدار کلراید بحرانی [درصد وزن سیمان]}$$

برای تعیین تغییرات باربری ستونها، باید نمودار M-P برای ستونهای با قطرهای مختلف در دو حالت بتن با پوشش و بتن بدون پوشش رسم شود. محاسبات با توجه به میزان آرماتور معادل ۲٪ سطح مقطع برای ستون انجام شده است. برای تمام ستونها بار محوری موجود برابر 300 ton و ضریب  $\Phi$  برابر 0.75 فرض شده است و میزان لنگر نهایی قابل تحمل ستون مورد مقایسه قرار گرفته است. خلاصه نتایج در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲: تغییرات باربری خمشی ستون برای بار محوری ثابت 300 ton

D	ستون سالم $M_1$ (ton.m)	ستون تخریبی $M_2$ (ton.m)	$\frac{M_2 - M_1}{M_1} \times 100$
۱۲۰	۳۶۰	۳۱۸	۱۱/۷
۱۳۰	۴۵۵	۴۱۰	۹/۹
۱۴۰	۵۶۰	۵۱۰	۸/۹

بر اساس نتایج جدول ۲ میزان باربری خمشی ستونها برای قطرهای مختلف ستون، به طور متوسط حدود ۱۰٪ کاهش می یابد. با تمهیداتی در پروسه بهسازی این ضعف جبران خواهد شد.

## ۶- ارائه گزینه های مختلف طرح ترمیم و بهسازی

با توجه به نتایج حاصل از آزمایشها و مشاهدات عینی در مورد میزان، علل و مکانیزم خرابیهای بوجود آمده در ستونها، استراتژی ترمیم و بهسازی بر این اساس استوار شد که ضمن تعمیرات ظاهری و بر طرف نمودن ترکها، مقاومت از دست رفته ستونها به دلیل ایجاد خرابیها در آرماتورها و در پوشش بتنی ستونها جبران شده و این مراحل ایجاد کمترین تغییر از نظر سختی، عدم بالانس مقاومت و شکل ظاهری را در پل بنماید.

در ستونهایی که آسیبهای شدیدی به بتن وارد شده است مثلاً بتن قلوه کن شده بود و آرماتورها نمایان شده بودند و یا ترکهای بزرگ با تراکم زیاد وجود داشت و یا به علت وجود درصد کلراید بالا در بتن احتمال خوردگی آرماتور در آنها وجود داشت، مراحل زیر جهت ترمیم انجام شد:

- برداشتن بتن آسیب دیده
- آماده سازی سطح
- آماده سازی میلگردها
- اعمال پوشش بر آرماتورها
- اعمال پوشش بتنی به جای پوشش حذف شده
- اعمال یک لایه مقاوم بر نفوذ کلراید بر روی پوشش بتن
- تقویت ستون جهت برطرف شدن ضعف ناشی از کم شدن سطح مقطع میلگردها یا خاموتها

همچنین در مواردی که امکان نفوذ یون کلراید از خارج به داخل ستون وجود داشت، برای مقابله با نفوذ کلراید، ترکیب زیر برای حفاظت قسمتهای نمایان ستون انتخاب گردید:

- ماده ترکیبی سیلن+ سیلوکسان همراه با اندود نهایی

عمر مفید سازه بر اساس ضوابط آیین نامه fib به بیش از ۵۰ سال افزایش می یابد.

جدول ۳: تغییرات غلظت کلر در محل آرماتور با گذشت زمان

t (year)	C
۱۰	< ۱/۸۵ ۰/۷۸
۲۰	۰/۹ < ۱/۸۵
۳۰	< ۱/۸۵ ۰/۹۶
۴۰	< ۱/۸۵ ۰/۹۹
۵۰	< ۱/۸۵ ۱/۰۲

۸- تقویت ستون جهت جبران ضعف سازه‌ای پس از انجام عملیات ترمیم و بدست آمدن سطحی صاف و آماده، جهت جبران ضعف سازه‌ای به وجود آمده در ستونها به دلیل از بین رفتن کاور بتنی و خوردگی آرماتورها سه روش مرسوم و مورد تأیید در ادبیات تعمیر و بهسازی سازه‌های بتنی جهت انجام بهسازی ستونهای پل‌ها به شرح زیر مد نظر قرار گرفت: [۴]

- اجرای ژاکت بتنی به دور ستونها در ناحیه ترمیم شده.
- اجرای غلاف فولادی به دور ستونها در ناحیه ترمیم شده.
- استفاده از نوارهای کامپوزیتی FRP به دور ستونها در ناحیه ترمیم شده.

استفاده از پوشش‌های بتنی از روشهای تقویت ستونها می‌باشد. با این حال استفاده از غلاف بتنی برای تقویت پایه‌ها در این پروژه به دلایل مختلف چندان منطقی به نظر نمی‌رسید. اولاً به هیچ عنوان دور از ذهن نیست که شرایط محیطی خورنده منطقه که بتن فعلی پایه‌ها را به شدت تخریب کرده است، باعث تخریب بتن جدید گردد. همچنین این روش نیاز به عمل‌آوری دقیق بتن دارد که با توجه به شرایط آب و هوای منطقه، کار را با دشواری همراه خواهد ساخت. به علاوه اجرای ژاکت بتنی باعث تغییر سختی قابل ملاحظه‌ای در ستون می‌شود که در بارگذاری های لرزه‌ای باعث بر هم خوردن توزیع بارها بین ستونها خواهد گردید.

روش بعدی تأمین ظرفیت باربری از دست رفته با استفاده از غلاف فولادی می‌باشد. با این حال استفاده از غلاف فولادی برای تقویت پایه‌ها به دلایل مختلف توصیه نمی‌شود. اولاً شرایط خورنده منطقه می‌تواند موجب خوردگی غلافها گردد. به علاوه تعبیه غلاف باعث بروز تغییر سختی قابل ملاحظه‌ای در ارتفاع ستون می‌شود که در بارگذاری‌های لرزه‌ای می‌تواند باعث

$C(x,t)$ : مقدار کلراید در عمق  $x$  (سطح سازه  $x=0$  m) در زمان  $t$  [درصد وزن سیمان]

$C_0$ : مقدار کلراید اولیه بتن [درصد وزن سیمان]

$C_{S,\Delta x}$ : مقدار کلراید در عمق  $\Delta x$  در زمان  $t$  [درصد وزن سیمان]

$x$ : عمق متناظر با مقدار کلراید  $C(x,t)$  [m]

$a$ : پوشش بتن [mm]

$\Delta x$ : عمق ناحیه همرفت (لایه بتن که تا آن ناحیه فرآیند نفوذ کلراید از قانون انتشار دوم فیک تبعیت نمی‌کند) [mm]

$D_{app,c}$ : ضریب انتشار کلراید در بتن  $\left[ \frac{mm^2}{year} \right]$

erf: تابع خطا

ضریب انتشار کلراید در بتن به وسیله معادله ۳ به دست می‌آید:

$$D_{app,c} = k_e \cdot D_{RCM,C} \cdot k_t \cdot A(t) \quad (3)$$

$K_e$ : متغیر انتقال محیط [-]

$$k_e = \exp \left[ b_e \left( \frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T_{real}} \right) \right]$$

(۴)

$b_e$ : متغیر رگرسیون [k]

$T_{ref}$ : دمای آزمایش استاندارد [k]

$T_{real}$ : دمای عضو سازه یا هوای محیط [k]

$D_{RCM,O}$ : ضریب مهاجرت کلراید  $\left[ \frac{mm^2}{a} \right]$

$K_t$ : پارامتر انتقال [-]

$A(t)$ : زیر تابع برای در نظر گرفتن عمر [-]

$$A(t) = \left( \frac{t_0}{t} \right)^\alpha \quad (5)$$

$\alpha$ : توان سن [-]

$t_0$ : زمان مبدا [سال]

هر کدام از پارامترهای فوق در این آیین نامه بر اساس یک تابع احتمال تعریف می‌شوند. با توجه به در دسترس نبودن تمام پارامترهای فوق، از مقادیر پیش فرض این آیین نامه برای تعیین عمر بهره برداری پلها استفاده شد.

با توجه به محاسبات فوق مشخص است که غلظت کلراید در محل آرماتورها بعد از ۱۰ سال کمتر از غلظت کلراید آستانه (۱/۸۵ درصد وزن سیمان) می‌باشد. جدول ۳ مقادیر غلظت کلراید در محل آرماتور را در زمانهای مختلف بر اساس روابط فوق نشان می‌دهد.

لازم به ذکر است که در محاسبات فوق از اثر بازدارندگی لایه‌های محافظتی پوشش بتن به طور محافظه‌کارانه صرف نظر شده است. بر این اساس با اعمال یک پوشش جدید در ستونها،

مشکلاتی در پایه‌ها گردد. از طرف دیگر نیاز به محافظت در برابر خوردگی، رنگ‌آمیزی و نگهداری پس از اجرا نیز از دیگر معایب این گزینه می‌باشد که هزینه‌ها را به صورت بسیار زیادی افزایش می‌دهد.

روش سوم استفاده از مواد مرکب ساخته شده از الیاف در محیط رزین پلیمری بعنوان پلیمرهای مسلح شده با الیاف (Fiber Reinforced Polymers-FRP) می‌باشد که بعنوان یک ضرورت در جایگزینی مصالح سنتی و شیوه‌های موجود معرفی شده است. از آنجا که کامپوزیت‌های FRP بشدت در مقابل محیط‌های خورنده مقاوم هستند لذا در پروژه حاضر که عامل اصلی خرابی، محیط خورنده اطراف ستونها است، گزینه مناسبی جهت جبران ضعف ناشی از خوردگی آرماتورها میباشند. مواد مرکب که دور تا دور ستونها به وسیله چسبهای مخصوص اپوکسی چسبانده می‌شوند علاوه بر نقش محصورکنندگی برای بتن قدیم ستون، در افزایش مقاومت و شکل‌پذیری ستونها نقش بسزایی خواهد داشت. مضاف بر اینکه در تغییر سختی ستونها و به تبع آن سختی کلی سازه که اثرات نامطلوبی بر کارایی سازه‌ای پل دارد اثری نخواهد گذاشت. [۵] سرعت اجرای بالاتر و نمای زیباتر از دیگر مزایای استفاده از این مصالح در پروژه حاضر می‌باشد.

لذا پس از مقایسه فنی اجرایی و اقتصادی گزینه‌ها و با توجه به مزیت‌های موجود در آن گزینه سوم یعنی استفاده از نوارهای کامپوزیتی FRP به دور ستونها در ناحیه ترمیم شده به عنوان استراتژی بهسازی مورد استفاده قرار گرفت.

#### ۸-۱- طراحی و اجرای نوارهای FRP

پس از انتخاب گزینه FRP و با توجه به اطلاعات بدست آمده از مشاهدات محلی و نتایج آزمایشات در مورد مقاومت بتن و فولاد بکارگرفته شده در پلها و تعداد و محل قرارگیری آنها و بر اساس راهنمای طراحی و ضوابط اجرایی بهسازی ساختمانهای بتنی موجود با استفاده از مصالح تقویتی FRP (نشریه ۳۴۵ سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی) اقدام به طراحی نوارهای تقویتی به شرح زیر گردید.

با توجه به مشاهدات محلی، میزان خوردگی خاموتها به طور متوسط حدود ۲۰٪ سطح مقطع خاموت موجود می‌باشد. لذا تعداد لایه‌های ورقهای FRP به نحوی انتخاب شدند که بتوانند این ظرفیت از دست رفته را تأمین کنند. بر این اساس و با توجه به ضوابط نشریه ۳۴۵ سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی [۶]، از ۳ لایه الیاف FRP با مشخصات خاص استفاده شد. این الیاف به صورت دورپیچ و در جهت عمود بر محور طولی ستون قرار داده می‌شوند. تعداد لایه‌های الیاف همچنین باید به نحوی باشد که بتواند حداقل فشار محصورکنندگی ۴ مگاپاسکال را تأمین کند. [۵] با این تعداد الیاف و برای بتن با مقاومت ۲۴ مگاپاسکال، حداقل فشار محصورکنندگی ۴/۳ مگاپاسکال در ستونها تأمین

گردید.

همچنین بر اساس مشاهدات عینی، میزان خوردگی آرماتورهای اصلی ستونها به طور متوسط ۱۵٪ سطح مقطع آرماتور می‌باشد. لذا تعداد لایه‌های ورقهای FRP به نحوی انتخاب شدند که بتوانند این ظرفیت از دست رفته را تأمین کنند تا ظرفیت خمشی ستون بدون FRP و ستون تقویت شده با FRP با هم برابر شود. بر این اساس و با توجه به ضوابط نشریه ۳۴۵ از ۲ لایه الیاف FRP با مشخصات خاص استفاده شد. این الیاف در جهت محور طولی ستون و دور تا دور ستون قرار داده می‌شوند. [۶]

شکل ۷ یک نمونه از نقشه‌های مربوط به تقویت ستونها با FRP را نشان می‌دهد.

۹- آزمایش اولتراسونیک جهت کنترل کیفیت ملات تعمیری این آزمایش بر روی ملات اجرا شده در ستونها انجام گردید تا از کیفیت ملات مورد استفاده و همچنین چسبندگی آن به بتن قدیم و عدم وجود ناحیه ناپیوسته قبل از اتصال FRP اطمینان حاصل شود. شکل ۸ تعدادی از نمودارهای مربوط به آزمایش را نشان می‌دهد. بر اساس نتایج حاصل، تغییر شیب در نتیجه تغییرات سرعت در اکثر نمودارها بسیار کم بوده و نمودارها وجود شکستگی ناگهانی که نشان دهنده وجود فاصله یا حباب در درون ملات باشد را نشان نمی‌دهند. لذا نصب FRP بر روی این قسمت از ملات بلامانع است.

با این حال در مواردی نیز میزان شکست (تغییر سرعت) در برخی نقاط زیاد بود که نشان دهنده جداسازی و عدم پیوستگی ملات تعمیری در آن نقاط می‌باشد. با بررسی و بازرسی محلهای یاد شده در سایت مشخص گردید که کلیه نقاط دارای شکستگی، پوک بوده و لذا در این بخشها کلیه قسمتهای پوک تخریب و دوباره با ملات مناسب جایگزین شدند.

#### ۱۰- جمع بندی

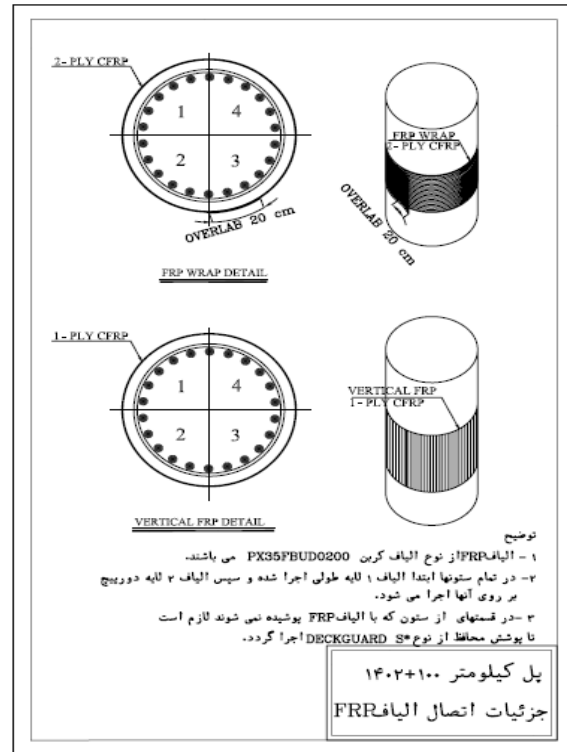
در مقاله حاضر روند بررسی و ترمیم ۸ پل از پلهای مسیر راه‌آهن بافق- بندر عباس در محدوده ایستگاههای فین و زادمحمود مورد بررسی قرار گرفت. بررسی نتایج آزمایشهای مخرب و غیرمخرب علت اصلی ترک خوردگی بتن ستونها را نفوذ یون کلراید و خوردگی آرماتور در ستونها نشان می‌داد. به همین علت در مورد تمامی ستونهای آسیب‌دیده کاهش باربری ستونها به علت کم شدن سطح مقطع ستون و خوردگی آرماتورها مشاهده می‌شد.

برای تعمیر ستونها ابتدا پوشش آلوده در ستونها برداشته شد و پس از آماده سازی سطح و آرماتورها، محل تخریب شده با چند لایه ملات تعمیراتی پر شد. سپس چند لایه الیاف FRP از نوع الیاف کربن در جهت لازم بر روی ستون پیچیده شد تا ضعف

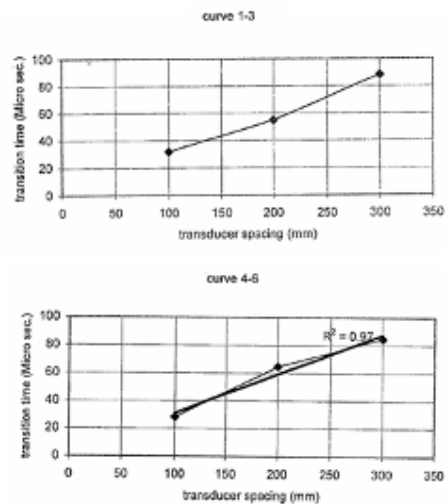
سازه‌ای را جبران کند. در نهایت برای جلوگیری از نفوذ مجدد کلراید یک لایه محافظ با نام تجاری Dekguard S\* بر روی ستونها اجرا شد. در قسمتهای زیر خاک ستون به جای ماده فوق از قطران اپوکسی استفاده شد.

#### ۱۱- مراجع

- [۱]- "آیین‌نامه بتن ایران"، سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی، دفتر تحقیقات و معیارهای فنی تجدید نظر اول، ۱۳۸۲.
- [۲]- رهایی علیرضا، فیروزی افشین، "بررسی عملکرد آسیب‌پذیری و بهسازی پلها" انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ۱۳۸۴.
- [۳]- صوفزاده، ریموند "تعمیر و مقاوم‌سازی زیر سازه پلها" معاونت آموزشی و تحقیقات فناوری وزارت راه و ترابری، ۱۳۸۵.
- [۴]- اکبری رضا، صباغ زاده مجید "ترک خوردگی در بتن و پلهای بتنی" انتشارات دانش پژوهان برین، ۱۳۸۳.
- [۵]- رهایی علیرضا، زمریدیان آرش "ترمیم و تقویت سازه‌های بتن مسلح با الیاف پلیمری مرکب FRP" انتشارات دانش نگار، ۱۳۸۴.
- [۶]- "راهنمای طراحی و ضوابط اجرایی بهسازی ساختمانهای بتنی موجود با استفاده از مصالح تقویتی FRP، نشریه ۳۴۵" دفتر امور فنی، تدوین معیارها و کاهش خطرپذیری ناشی از زلزله، ۱۳۸۵.
- [۷]- رضانیانپور. علی اکبر، حمیدیان محمدرضا "آزمایشهای غیرمخرب بتن، مغزه‌گیری" مرکز تحقیقات ساختمان مسکن، ۱۳۷۳.
- [۸]- رضانیانپور. علی اکبر، صارمی منصور "بررسی علل کاهش عمر مفید سازه‌های بتنی مسلح" مرکز تحقیقات و مطالعات راه و ترابری، ۱۳۷۵.



شکل ۷: نمونه ای از نقشه های اجرای الیاف FRP



شکل ۸ نتایج آزمایش اولتراسونیک : نمونه‌های بدون شکستگی همچنین محاسبات مربوط به تعیین عمر مفید نشان می دهد که پس از تعمیر ستونها عمر مقید سازه به ۵۰ سال افزایش می‌یابد.