

توسعه مدل پیش‌بینی آغاز خوردگی آرماتورهای تراورس بتنی B70 در خطوط راه‌آهن نواحی کویری (مطالعه موردی: خط راه‌آهن بم - زاهدان، بلاک رودشور- شورگز)

مرتضی اسماعیلی، استاد، دانشکده مهندسی راه‌آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران
صادق کاویانی*، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی راه‌آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران
محسن تدین، دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه بوعلی سینا، همدان

Email: Sadegh.Kaviani@gmail.com

دریافت: ۱۳۹۸/۰۷/۱۵ - پذیرش: ۱۳۹۸/۱۰/۱۰

چکیده

قریب به ۶۰۰ کیلومتر از خطوط ریلی ایران در نواحی ماسه‌گیر کویری قرار گرفته است. از جمله مشکلات روسازی خطوط ریلی در این نواحی، خوردگی ریل، ادوات ریل نظیر پیچ اتصال و پابند و نیز ترک خوردگی و شکست زود هنگام تراورس‌های بتنی در این مناطق است. بررسی‌های انجام شده، نشان‌دهنده نفوذ یون کلراید حاضر در خاک کویری در حضور رطوبت به تراورس بتنی است که این موضوع منجر به زنگ‌زدگی تاندون و در نهایت شکست تراورس بتنی می‌گردد. با این وجود، تحقیقات چندانی در مورد شکست و خوردگی زود هنگام این تراورس‌ها انجام نگرفته و در عین حال مدلی برای پیش‌بینی این موضوع توسعه داده نشده است. در این تحقیق، انتشار یون کلراید در بتن تراورس مورد بررسی میدانی و آزمایشگاهی قرار گرفته و بر اساس آن مدلی برای پیش‌بینی آغاز خوردگی و انتشار یون کلراید ارائه شده است. برای این منظور، ضرایب انتشار و مقادیر کلراید سطحی و اولیه با نمونه‌برداری از تراورس‌های قطعه‌ی رودشور - شورگز واقع در کیلومتر ۹۱ تا ۱۱۹ در مسیر راه‌آهن بم - زاهدان به دست آمده است. ضریب انتشار در سنین اولیه نیز با ساخت نمونه‌های مکعبی به دست آمده و مدل پیش‌بینی بر اساس این پارامترها توسعه یافته است. در ادامه، به منظور بررسی تأثیر هر یک از عوامل بر زمان آغاز خوردگی، تحلیل حساسیت صورت گرفته و زمان آغاز خوردگی برای بتن تراورس در شرایط پیش‌گفته، ۸/۵ ماه به دست آمده و ضریب انتشار و مقدار پوشش بتن اثرگذارترین عوامل بر زمان آغاز خوردگی تشخیص داده شده‌اند.

واژه‌های کلیدی: راه‌آهن نواحی کویری، خوردگی، تراورس بتنی، انتشار یون کلراید، پیش‌بینی آغاز خوردگی

۱. مقدمه

ماسه‌های روان است. از این وسعت، حدود ۵ میلیون هکتار آن را تلماسه‌های فعال تشکیل می‌دهند (کلینسلی، ۱۳۸۱). گذر خط‌آهن از این نواحی مشکلات بسیاری را در بهره‌برداری ایجاد نموده و حرکت ماسه‌های روان به سمت خطوط و انباشتگی آن‌ها روی خط منجر به اعمال

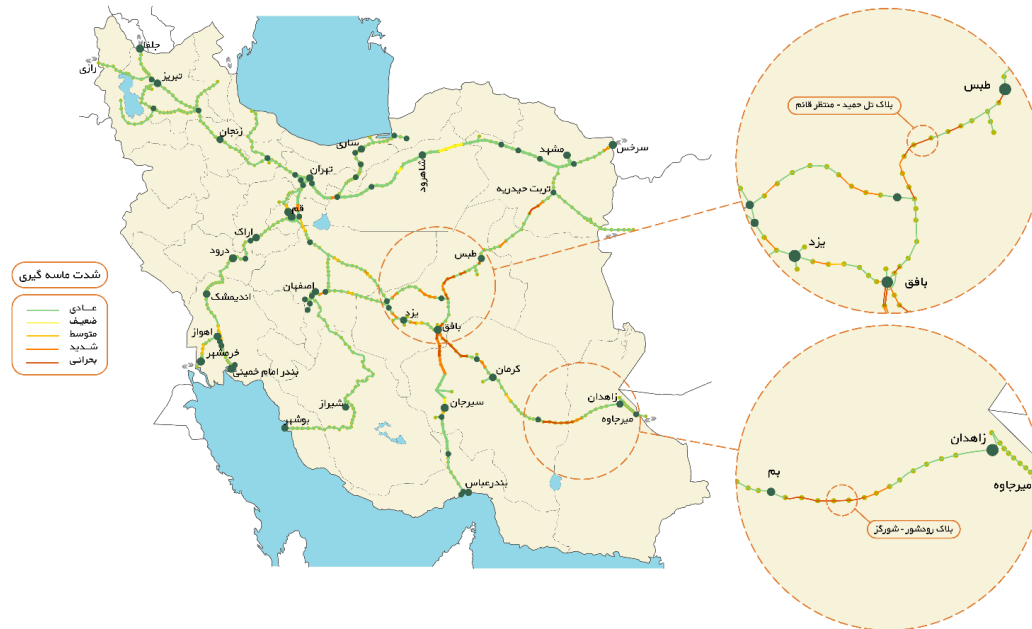
بر اساس گزارش‌های موجود، حدود ۳۰ میلیون هکتار از اراضی ایران را مناطق کاملاً بیابانی و کویری تشکیل می‌دهند که سطحی معادل ۱۲ میلیون هکتار آن در معرض

بحرانی‌ترین خطوط از دیدگاه معضلات ایجاد شده قلمداد می‌شوند. در این بلاک‌ها، شدت ماسه‌گیری منجر به تعمیر و نگهداری و مراقبت ۲۴ ساعته شده و عملیات تعمیر و نگهداری به منظور تعویض تراورس‌های بتنی شکسته در جریان است (ذاکری و فرقانی، ۲۰۱۲).

رسوب ماسه‌های روان روی روسازی خطوط ریلی اولاً باعث پر شدن خلل و فرج دانه‌های بالاست با ماسه (آلودگی بالاست توسط ماسه) می‌شود. این موضوع تبعات بسیاری را برای روسازی و زیرسازی خط ریلی به همراه دارد. ذاکری و همکاران (۲۰۱۱)، مشکلات وارده بر روسازی خطوط ریلی در نواحی ماسه‌گیر را به صورت زیر طبقه‌بندی نموده‌اند: ترک خوردگی پل‌ها و انسداد ورودی آن‌ها (شکل ۲-الف)، شکسته شدن و تخریب تراورس‌های بتنی (شکل ۲-ب)، فرسودگی زودرس تراورس‌های فلزی و پوسیدگی سریع تراورس‌های چوبی، فرسودگی زودرس ادوات اتصال، فرسودگی زودرس ریل‌ها (خوردگی و زنگ زدگی)، تخریب سازه‌ای پل ناشی از بارهای ضربه‌ای در اثر افزایش صلبیت لایه‌ی بالاست، برهم خوردن سریع هندسه‌ی خط، مدفون شدن روسازی خط در ماسه، اختلال در عملکرد سوزن بر اثر تجمع ماسه، کماتش ریل و جابجایی خط. مهم‌ترین مشکلات ایجاد شده به علت ماسه‌های روان در این خطوط را می‌توان انسداد خط و افزایش بیش از حد صلبیت خط ناشی از پر شدن حفرات بالاست با ماسه نام برد (شکل ۳). از بین رفتن خاصیت فنری روسازی خط و افزایش سختی خط منجر به تغییر الگوی بارگذاری تحت تراورس بتنی و افزایش نیروی دینامیک میان لایه بالاستی و تراورس بتنی شده، که این موضوع ممکن است حتی به شکست زود هنگام سازه‌ای تراورس بتنی نیز منجر شود (طلوع کیان و همکاران، ۲۰۱۸؛ طلوع کیان و همکاران، ۲۰۲۰؛ ذاکری و عباسی، ۲۰۱۲).

هزینه‌های گزاف تعمیر و نگهداری بر این خطوط شده است (ذاکری و فرقانی، ۲۰۱۲). البته این موضوع اختصاص به ایران ندارد. بیشترین طول خطوط واقع در منطقه‌ی ماسه‌گیر، مختص کشور چین با ۱۰۰۰۰ کیلومتر است. افزون بر این، کشورهای هند، عربستان سعودی، مراکش و نامیبیا نیز در خطوط در حال بهره‌برداری با مشکل ماسه‌های روان روبرو هستند. در عربستان سعودی، ساخت خط پرسرعت حرمین به علت انباشت ماسه‌های روان با وقفه روبرو بوده است. (برونو و همکاران، ۲۰۱۸)

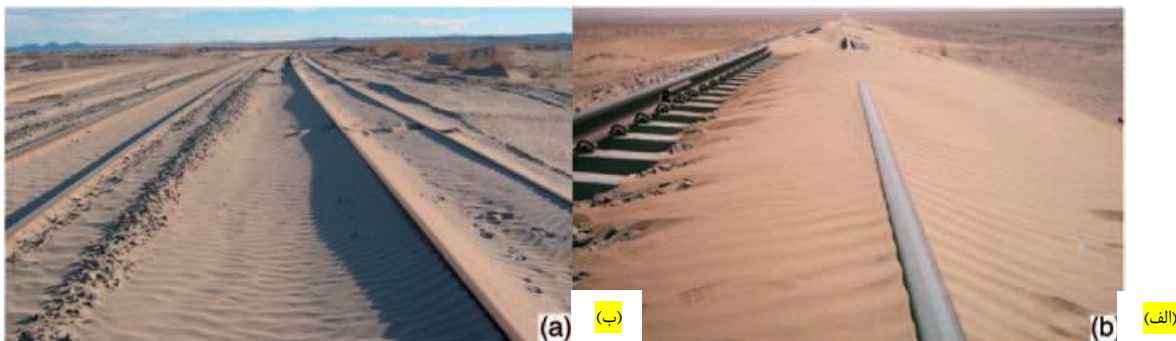
به دلیل معضلاتی که ماسه‌های روان برای خطوط راه‌آهن ایجاد می‌کنند، شناسایی این مقاطع در شبکه‌ی ریلی ضروری است. به همین منظور، در سالیان اخیر، کمیته‌ی ویژه‌ای به منظور شناسایی، دسته‌بندی و ثبت اطلاعات مقاطع ماسه‌گیر در اداره کل خط و ابنیه فنی راه‌آهن جمهوری اسلامی تشکیل شده است. این کمیته، شدت ماسه‌گیر بودن هر مقطع را به صورت ضعیف، متوسط، شدید و بحرانی دسته‌بندی نموده است (شکل ۱). همچنین، بر اساس گزارش سال ۱۳۹۴، بیش از ۵۴۸ کیلومتر از شبکه ریلی ایران در ناحیه ماسه‌گیر است که از این میان ۲۰۰ کیلومتر در حالت بحرانی قرار دارد (امراللهی، ۱۳۹۵). براساس آمار سال ۱۳۹۵، طول مناطق ماسه‌گیر کشور با افزایش ۲ درصدی به حدود ۶۰۱/۷۵ کیلومتر رسیده است (امراللهی، ۱۳۹۶). در طول حدود ۸۹۲۵ کیلومتر از شبکه ریلی کشور (۸۵ درصد) از تراورس‌های بتنی استفاده شده که در برخی مقاطع با شدت ماسه‌گیری بحرانی، ترک خوردگی و شکست آن گزارش شده است (امراللهی، ۱۳۹۵). اگر چه خطوط ماسه‌گیر تقریباً در تمامی کریدورهای شبکه‌ی ریلی کشور موجود هستند، اما عبور شبکه‌ی ریلی از کویر مرکزی ایران، بحرانی‌ترین خطوط را در این مناطق به وجود آورده است. بلاک تل حمید - منتظر قائم در خط بافق - طبس و بلاک رودشور - شورگز در خط بم - زاهدان،



شکل ۱. شدت ماسه‌گیری در خطوط ریلی ایران (امراللهی، ۱۳۹۶)



شکل ۲. نمونه‌ای از مشکلات خطوط راه‌آهن در نواحی سربری: الف) تخریب و انسداد ورودی پل‌ها و ب) تخریب تراورس بتنی (ذاکری و همکاران، ۲۰۱۱)



شکل ۳. مهم‌ترین مشکلات خطوط راه‌آهن در نواحی کویری: الف) انسداد خط و ب) صلبیت لایه بالاست (ذاکری و همکاران، ۲۰۱۱)

تکنولوژی و تحقیقات دوام بتن و مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن تهیه شده است (اشرفی و رضانیان-پور، ۲۰۰۷). مدل fib بر اساس تحقیقات دو پروژه Duracrete و DARTS توسط فدراسیون بین‌المللی بتن سازه‌ای (گروه کاری fib، ۲۰۰۶) پیشنهاد شده و اصلاح آن در سال ۲۰۱۲ توسط رضانیان پور و همکاران (۲۰۱۲) بر اساس اطلاعات خلیج فارس ارائه شده است. همچنین مدل CHLODIF (جگوییچ و همکاران، ۱۹۹۵) و مدل DuraCrete (سیمس و ادواردسن، ۱۹۹۹؛ فن‌دروگن و فن‌بروگل، ۲۰۱۲) نیز از نخستین مدل‌هایی بود که جهت پیش‌بینی عمر مفید و آغاز خوردگی میلگرد توسعه یافت. در خصوص مکانیزم خوردگی آرماتورها در تراورس‌های بتنی و مدل‌های پیش‌بینی این موضوع در ایران و دنیا مطالعات چندانی انجام نشده است. به طور نمونه، برای اولین بار، محمدزاده و وهبی (۲۰۱۱) به بررسی شاخص قابلیت اعتماد تراورس بتنی B70 در اثر نفوذ یون کلراید پرداختند. در این تحقیق، نفوذ یون کلراید در شرایط کویری ایران عامل خوردگی تاندون فولادی عنوان شد و مقطع میانی تراورس آسیب‌پذیری بیشتری از خود نشان داده است. همچنین، افزایش ارتفاع در مقطع میانی تراورس، بهترین راهکار برای ارتقای شاخص قابلیت اعتماد تراورس بتنی به دست آمده است. در ادامه، تدین (۱۳۹۵) در یک گزارش فنی به علل شکست تراورس‌های بتنی در نواحی کویری ایران پرداخت. در این بررسی، ترک خوردگی تراورس‌های بتنی در این نواحی ناشی از زنگ‌زدگی میلگردهای پیش‌تنیدگی مشاهده شد. در این گزارش فنی، ترکیب بارگذاری دینامیک حاصل از ترافیک عبوری و نیز خوردگی تاندون‌های فولادی ناشی از نفوذ یون کلراید عامل تخریب زود هنگام تراورس‌های بتنی مورد مطالعه معرفی شده است.

همان‌گونه که مرور ادبیات فنی نشان می‌دهد ترک خوردگی زود هنگام تراورس‌های بتنی هم در ایران و هم در سایر نقاط دنیا مورد بررسی و مطالعه‌ی دقیق قرار نگرفته است و مشخصاً انتشار یون کلراید در تراورس

از سوی دیگر، یکی از مهم‌ترین معضلات خطوط ریلی در نواحی کویری ایران، ترک خوردگی و تخریب زود هنگام تراورس‌های بتنی است که منجر به کاهش شدید شاخص‌های هندسی خط شده است. بروز ترک خوردگی و تخریب سریع تراورس‌های بتنی در بلاک‌های ماسه‌گیر شبکه ریلی ایران در کمتر از ۵ سال از آغاز بهره‌برداری این خطوط گزارش شده و تعویض آن‌ها طی عملیات تعمیر و نگهداری خطوط، هزینه‌های بسیاری را به راه‌آهن ایران تحمیل کرده است.

تحقیقات نشان داده که اعضای بتنی پیش‌تنیده در برابر خوردگی حساس‌تر هستند. این اعضا، در زمان بهره‌برداری خود، ۵۵ تا ۶۵ درصد تاب نهایی خود را تحمل می‌کنند (ACI، ۲۰۱۴). روند خوردگی در آرماتور، هر گاه تحت تنش پیش‌تنیدگی و شرایط خوردگی قرار گیرد، سریع‌تر است و این سرعت با افزایش تنش پیش‌تنیدگی نیز افزایش می‌یابد (دای و همکاران، ۲۰۱۶؛ لی و همکاران، ۲۰۱۱؛ ACI، ۲۰۱۴). همچنین، از آنجا که این اعضا از فولاد پُر مقاومت ساخته می‌شوند، با سطح مقطع کمتری جوابگوی بارهای طراحی هستند. بنابراین، در فرایند خوردگی، زودتر سطح مقطع خود را از دست می‌دهند و گسیخته می‌شوند (ACI، ۲۰۱۴).

تا کنون تحقیقات زیادی در خصوص پیش‌بینی عمر مفید سازه‌های بتنی در شرایط دریایی و ساحلی انجام شده و مدل‌هایی جهت تخمین انتشار یون کلراید و زمان آغاز خوردگی پیشنهاد شده است. برای مثال، مدل DuraPGulf که توسط مؤسسه مصالح ساختمانی دانشگاه تهران و بر اساس داده‌های خلیج فارس توسعه یافته است (شکرچی و همکاران، ۲۰۰۸) و مدل Life 365™ که توسط کنسرسیومی متشکل از انجمن سیمان سرباره‌ای (SCA)، انجمن بازراندان‌های خوردگی بتن (CCIA)، انجمن ملی مخلوط آماده بتن (NRMCA) و انجمن دوده سیلیس (SFA) (بتنر و توماس، ۲۰۱۸) انتشار یافته است. همچنین، رویکرد شبکه عصبی به عنوان زیرمجموعه کاربردهای هوش مصنوعی در معادلات تعیین‌کننده (مدل CTDR و BHRC) استفاده می‌شود که توسط مرکز

شده است. پیش‌بینی آغاز خوردگی و تحلیل حساسیت هر یک از عوامل، گام نهایی این تحقیق است.

۲. بررسی میدانی شرایط تراورس‌های بتنی در

نواحی کویری ایران

بررسی میدانی تیم تحقیق در بلاک‌های رودشور - شورگزر و تل‌حمید - منتظر قائم (شکل ۱) نشان‌دهنده آن است که الگوی تخریب در این تراورس‌ها یکسان بوده است. همان‌گونه که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، اغلب خرابی‌ها به صورت ترک‌های طولی بر دو سطح جانبی تراورس و در نزدیکی تاندون پیش‌تنیده ظاهر شده‌اند.

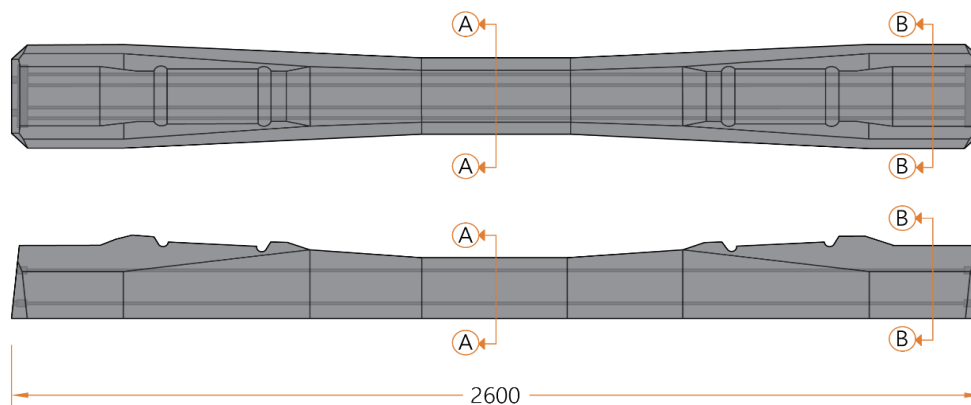
بتنی پیش‌تنیده، نرخ آن در شرایط محیطی کویری ایران و نیز آغاز خوردگی و عوامل موثر بر آن بررسی نشده است. لذا در این تحقیق، هدف اصلی، مدل‌سازی انتشار یون کلراید در تراورس بتنی پیش‌تنیده و بررسی عوامل موثر بر آن بوده است. از این رو، به منظور به دست آوردن عوامل مورد نیاز مدل انتشار، پروفیل یون کلراید از روی آزمایش‌های میدانی و آزمایشگاهی برای تراورس‌های بتنی ترک خورده که در معرض شرایط کویری ایران قرار گرفته بوده‌اند به دست آمده است. پس از آن، مدل مورد نظر روی عوامل به دست آمده از آزمایش‌ها توسعه داده



شکل ۴. تراورس‌های بتنی ترک خورده در یکی از کوپلاژهای تعویض شده

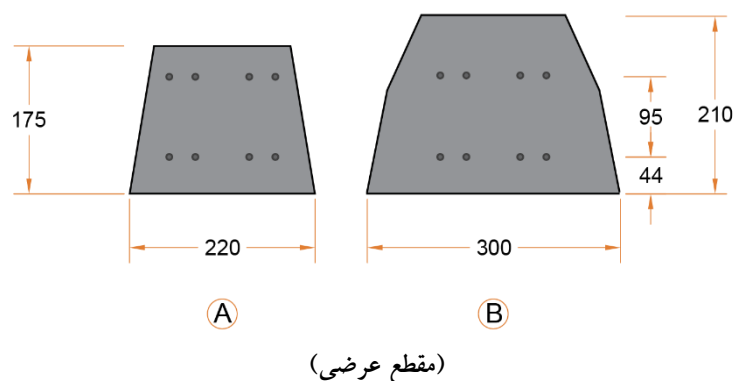
بوده است. شکل ۵، نمای قائم و جانبی و مقطع عرضی تراورس بتنی B70 را نشان می‌دهد.

تراورس‌های مورد استفاده در این خطوط از نوع B70 و ساخته‌ی کارخانه تراورس CBG واحد سیرجان



(نمای قائم و جانبی)

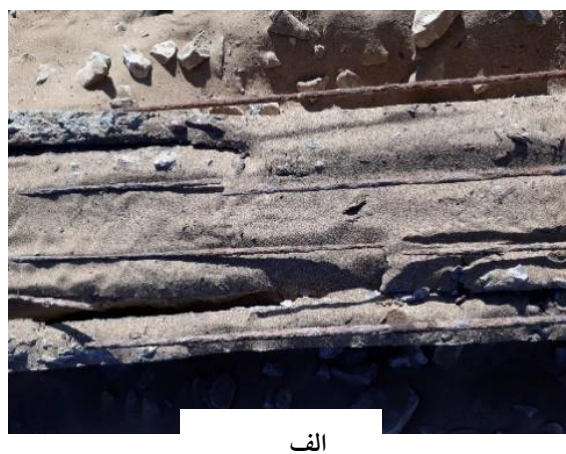
توسعه مدل پیش‌بینی آغاز خوردگی آرماتورهای تراورس بتنی B70 در خطوط راه‌آهن نواحی کویری (مطالعه موردی: خط راه آهن بم - زاهدان، بلاک رودشور- شورگز)



شکل ۵. نمای قائم و جانبی و مقطع عرضی تراورس بتنی B70

در شکل ۶ مشاهده می‌شود، آرماتور پیش‌تنیده، خوردگی شدیدی داشته و به علت کاهش سطح مقطع گسیخته شده است.

بر اساس این مشاهدات، ترک خوردگی و نهایتاً تخریب تراورس بتنی در این نواحی احتمالاً به علت خوردگی آرماتور پیش‌تنیده و زوال آن بوده است. همان گونه که



شکل ۶. خوردگی شدید فولاد پیش‌تنیده در یک تراورس تخریب شده

۲-۱. ظهور ترک طولی در مرکز تراورس در

مجاورت تار بالایی تاندونها:

ظهور ترک‌های طولی در سطوح جانبی تراورس‌ها اولین مرحله تخریب تراورس بتنی است. این ترک‌ها اغلب در مرکز تراورس به وجود می‌آیند و در مراحل بعدی به دو انتهای تراورس گسترش می‌یابند. همچنین، محل بروز ترک، در نزدیکی سطح سفره‌ی بالایی تاندونها است (شکل ۷).

ارزیابی میدانی نشان‌دهنده‌ی آن است که ترک خوردگی و تخریب تراورس در دو منطقه فوق‌روند مشابهی را طی می‌کند. به علت تشابه جهت و محل ترک‌ها، نمی‌توان این تخریب را از حیث ترک‌خوردگی دسته‌بندی نمود. اما به لحاظ روند تخریب، می‌توان سه مرحله‌ی زیر را در تخریب تراورس بتنی ارائه کرد:

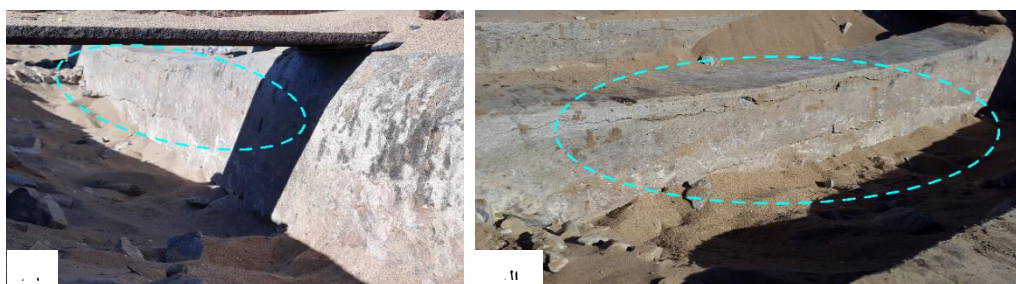


شکل ۷. ترک طولی در الف تار بالایی تاندون‌ها در مرکز تراورس ب

۸ مشاهده می‌شود، این ترک‌ها به صورت طولی و در هر دو سطح جانبی تراورس ظاهر می‌شود.

۲-۲. ظهور ترک طولی در مرکز تراورس در مجاورت تار پایینی تاندون‌ها

مرحله‌ی بعدی، ظهور ترک‌هایی در نزدیکی تار پایینی تاندون‌ها در مرکز تراورس است. همان‌گونه که در شکل



شکل ۸. ظهور ترک در مجاورت لایه پایینی تاندون‌ها در مرکز تراورس

است. گسترش ترک‌ها به دو انتهای تراورس‌ها و بروز ترک‌ها در جهات و سطوح دیگر منجر به تخریب کامل تراورس بتنی می‌شود. اغلب تراورس‌های مشاهده شده در منطقه، در این مرحله قرار داشتند که نشان‌دهنده‌ی آن است که فرایند تخریب روند نسبتاً سریعی دارد (شکل ۹).

۲-۳. گسترش ترک‌ها به دو انتهای تراورس و تخریب آن

ترک‌های پیش‌گفته در اثر بارهای عبوری سریعاً گسترش می‌یابند. در نتیجه ترک‌های بیشتری، که شکل‌های مختلف و نامنظمی دارند، پدید می‌آیند که این بی‌نظمی به علت شرایط مختلف محیطی تراورس‌ها و بارگذاری



شکل ۹. گسترش ترک‌ها و تخریب تراورس

که در آن C غلظت ماده و D نرخ انتشار آن است که می‌تواند نسبت به زمان، دما، غلظت و ... متغیر باشد. با جایگذاری شرط مرزی کلراید سطحی و شرط اولیه کلراید اولیه در معادله (۱)، این معادله دیفرانسیل در یک بعد به صورت زیر خواهد بود (بشیر و همکاران، ۲۰۰۱):

$$C(x,t) = c_s - (c_s - c_i) \operatorname{erf} \left(\frac{x}{\sqrt{4Dt}} \right) \quad (2)$$

که در آن c_s غلظت کلراید سطحی و c_i غلظت کلراید اولیه است. همچنین D ، ضریب انتشار یون کلراید در بتن، همان گونه که پیشتر گفته شد، ثابت نیست و به زمان و شرایط محیطی وابسته است. مدل‌های زیادی برای تأثیر این شرایط بر ضریب انتشار ارائه شده است. یکی از معروف‌ترین مدل‌ها، تأثیر زمان بر ضریب انتشار را به صورت زیر بیان می‌کند:

$$D = D_0 \left(\frac{t_0}{t} \right)^m \quad (3)$$

که در آن، t_0 زمان اندازه‌گیری D_0 ، t زمان مورد نظر برای به دست آوردن ضریب انتشار و m ضریبی ثابت موسوم به ضریب عمر است که به نسبت‌های اختلاط و عمل‌آوری بتن وابسته است. این ضریب از نتایج تحقیقات آزمایشگاهی روی سنین مختلف بتن (۳، ۹ و ...) به دست می‌آید (لوپینگ و گالیکرز، ۲۰۰۷؛ مانگات و همکاران، ۱۹۹۴).

پس از تعیین ضریب عمر، به منظور محاسبه‌ی زمان شروع خوردگی باید میزان کلراید در سطح فولاد تعیین و با میزان کلراید بحرانی مقایسه شود. زمانی که این میزان از میزان کلراید بحرانی تجاوز کند، خوردگی در فولاد آغاز می‌شود. از آنجا که در این محاسبه، میزان کلراید بحرانی معیار قرار می‌گیرد، این میزان در پیش‌بینی زمان خوردگی اهمیت زیادی پیدا می‌کند. محققان بسیاری بر روی اندازه‌گیری میزان کلراید بحرانی تحقیق کرده‌اند. از آنجا که عوامل بسیاری نظیر شرایط سطحی فولاد، سطح

همان‌گونه که اشاره شد، خرابی تراورس‌های بتنی در نواحی کویری در بلاک تل حمید - منتظر قائم در خط بافق - طبس و بلاک رودشور - شورگز در خط بم - زاهدان گزارش شده است. بر اساس گزارش‌ها، این موضوع در بلاک رودشور - شورگز در مدت زمان کمتری اتفاق افتاده و زودتر از بلاک تل حمید - منتظر قائم گزارش شده است. همچنین، ترافیک بسیار بالای خط بافق - طبس (با سرفاصله‌ای تقریبی ۳۰ دقیقه) به هیچ وجه امکان مسدودی خط و نمونه‌برداری از خط گرم را به تیم تحقیق نمی‌داد. بدین منظور، تحقیقات و نمونه‌برداری به بلاک رودشور - شورگز در خط بم - زاهدان محدود شد. بلاک انتخاب شده به منظور نمونه‌برداری در شکل ۳ مشاهده می‌شود.

۳. مبانی تحلیلی مدل انتشار یون کلراید در بتن

تراورس

خوردگی کلرایدی در بتن با از بین رفتن لایه محافظ فولاد مسلح آغاز می‌شود. برای این منظور، باید غلظت کلراید موجود، از مقدار معینی (میزان کلراید بحرانی) تجاوز کند (مهتا و مونتئیرو، ۱۳۹۵). لذا، برای پیش‌بینی زمان آغاز خوردگی لازم است روند انتشار یون کلراید در بتن مدل‌سازی ریاضی شود. محققان برای شرایط غیرپایدار از قانون دوم فیک برای بیان انتشار ماده ناشی از اختلاف غلظت در سه بعد استفاده می‌کنند (بشیر و همکاران، ۲۰۰۱):

$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial C}{\partial x} \right) \\ &+ \frac{\partial}{\partial y} \left(D \frac{\partial C}{\partial y} \right) \\ &+ \frac{\partial}{\partial z} \left(D \frac{\partial C}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (1)$$

رابطه‌ی ریاضی جایگذاری شده است. میزان کلراید سطحی (C_s)، اولیه (C_i)، بحرانی (C_{cp}) و ضریب انتشار در شرایط کویری از آزمایش‌های تراورس و ضریب انتشار در سنین اولیه از نمونه‌های مکعبی به دست آمده که در ادامه شرح داده خواهد شد.

۴. مطالعات آزمایشگاهی و میدانی

۴-۱. نمونه‌برداری از تراورس‌ها

همان گونه که اشاره شد، نمونه‌برداری از تراورس‌های بتنی ترک خورده به منظور محاسبه‌ی پروفیل یون کلراید در بلاک رودشور- شورگزر در خط بم- زاهدان انجام شد. نمونه‌های پودری از سه تراورس بتنی ترک خورده در سه نقطه با فاصله‌ی مساوی و ۶ عمق از هر یک، بر اساس استانداردهای ASTM C1152 (۲۰۱۲) و ASTM C42 (۲۰۱۸) برداشته شد (شکل ۱۰). این نمونه‌ها از دو مقطع وسط دهانه و شانه تراورس (شکل ۱۱) برداشته شده‌اند.

تماس فولاد و بتن، پتانسیل خوردگی فولاد، مشخصات بتن، سیمان و افزودنی‌ها، رطوبت، دما و pH بر میزان کلراید بحرانی اثرگذارند نمی‌توان مقدار معینی برای تمامی سازه‌ها و بالتبع مدل‌های پیش‌بینی مشخص نمود. به علت همین گوناگونی عوامل اثرگذار، بازه‌ی وسیعی برای میزان کلراید کل بحرانی در سازه‌ها، از ۰/۱ تا ۱/۹۶ درصد وزن چسباننده^۱ گزارش شده است (آنگست و همکاران، ۲۰۰۹). آیین‌نامه‌های مهم سیمان و بتن به منظور کاهش احتمال آغاز خوردگی، میزان کلراید اولیه‌ی مجاز را برای بتن پیش‌تنیده تعیین کرده‌اند. آیین‌نامه‌ی اروپایی EN 13230 (۲۰۱۶) که به بیان مشخصات تراورس بتنی پیش‌تنیده می‌پردازد، اشاره‌ای به میزان کلراید اولیه‌ی مجاز آن نکرده است. آیین‌نامه‌ی ACI 222 (۲۰۰۱) نیز حداکثر میزان کلراید محلول در اسید را ۰/۰۸ درصد وزن سیمان بیان می‌کند. همچنین، آیین‌نامه‌ی EN 206 (۲۰۱۳) نیز حداکثر میزان کلراید کل را از ۰/۱ تا ۰/۲ درصد ذکر کرده است. تکمیل مدل پیش‌گفته نیازمند نتایج آزمایش‌های تجربی بوده است. لذا، هر یک از عوامل این مدل از نتایج آزمایشگاهی استخراج و در

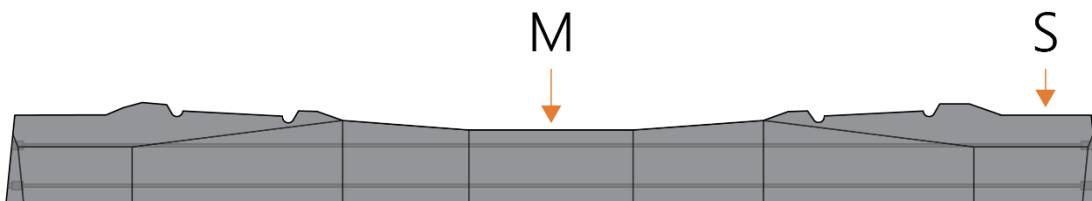


ج

ب

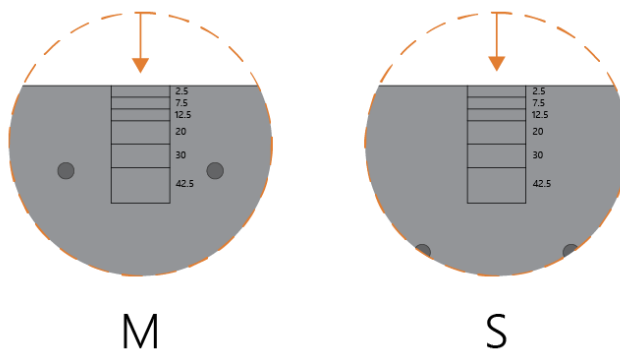
الف

شکل ۱۰. پودرگیری از تراورس‌های تخریب شده در بلاک



^۱- Binder

توسعه مدل پیش‌بینی آغاز خوردگی آرماتورهای تراورس بتنی B70 در خطوط راه‌آهن نواحی کویری (مطالعه موردی: خط راه آهن بم - زاهدان، بلاک رودشور- شورگز)



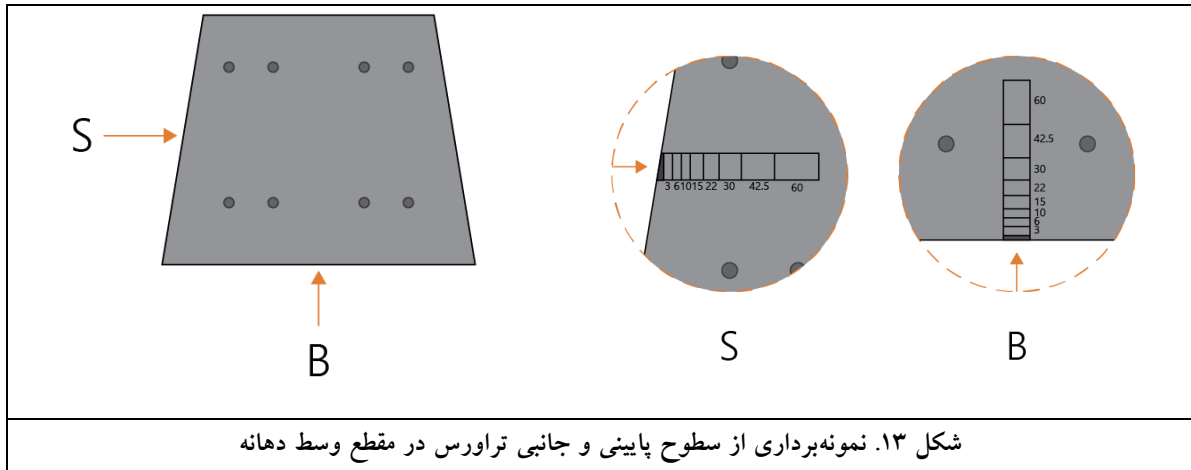
شکل ۱۱. مقاطع نمونه برداری در تراورس‌های منطقه‌ی رودشور- شورگز

همان‌گونه که گفته شد، مقطع بحرانی در خوردگی و تخریب، مقطع میانی تراورس‌ها مشاهده شده بود. از این جهت، پودرگیری محدود به مرکز دهانه شد. بدین منظور، سوراخ‌کاری روی سطوح جانبی و زیرین در وسط دهانه انجام شد (شکل ۱۳) و از ۸ عمق پودرگیری بر اساس استانداردهای ASTM C1152 (۲۰۱۲) و ASTM C42 (۲۰۱۸) انجام شد. از آنجایی که سطح تراورس‌ها شوره‌زدگی داشت، و احتمالاً بتن سطحی حاوی میزان بسیار زیادی نمک بود، از پودر یک میلی‌متر اولیه، آزمایش کلراید محلول در اسید به عمل نیامد.

پس از انجام آزمایش کلراید محلول در اسید روی نمونه‌های پودری به دست آمده از خط، به منظور کسب دقت بیشتر و همچنین بررسی غیرمخرب تراورس‌های بتنی، با همکاری و هماهنگی اداره کل راه‌آهن ناحیه‌ی جنوب شرق، دو عدد تراورس بتنی انتخاب و به آزمایشگاه منتقل شد. در انتخاب این تراورس‌ها (شکل ۱۲) که از تراورس‌های تعویض شده در عملیات تعمیر و نگهداری و نزدیک به یکدیگر بودند، سعی شد از تراورس‌هایی که در مرحله اول تخریب بودند، انتخاب شوند تا هم جهت حمل مناسب باشد و هم برای آزمایش‌های غیرمخرب بازگویی شرایط اولیه تخریب باشند.



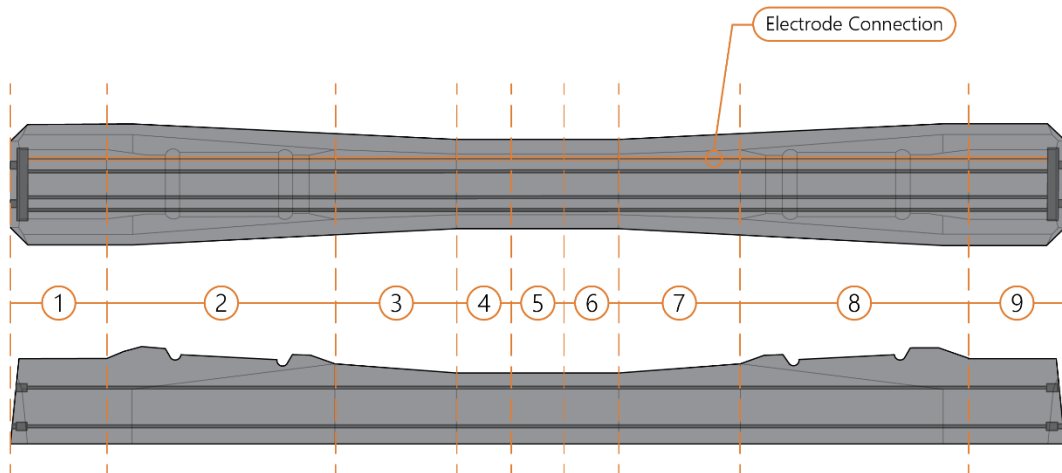
شکل ۱۲. تراورس‌های انتقالی به آزمایشگاه



به مدت ۱۰ ثانیه اعمال گردید. با دریافت بازتاب این پالس توسط دستگاه، می‌توان مقادیر شدت خوردگی، مقاومت الکتریکی تک الکتروود، مقاومت الکتریکی پلاریزه شده و همچنین اختلاف پتانسیل پیل خوردگی را اندازه‌گیری، محاسبه و ارائه نمود. در شکل‌های ۱۴ و ۱۵، مقاطع انجام آزمایش و اتصال الکتروود مشاهده می‌شود. از آنجا که پیش‌بینی می‌شد تاندون سفره‌ی بالایی و نزدیک به سطح وضعیت بحرانی‌تری در خوردگی داشته باشد، لذا آزمایش پتانسیل خوردگی با اتصال الکتروود دستگاه به این تاندون انجام شد.

۲-۴. تعیین پتانسیل و شدت خوردگی

برای تعیین پتانسیل و زمان شروع خوردگی از دستگاه گالوپالس^۱ (به روش پالس گالوانواستاتیک، که یک روش سریع و غیرمخرب پلاریزاسیون آزمایشگاهی و در محل است) بر اساس استاندارد ASTM C876 (۲۰۱۵)، روی تراورس‌های بتنی انتقالی به آزمایشگاه استفاده شد. در این روش، برای اندازه‌گیری اختلاف پتانسیل بین بتن و میلگرد، الکتروود (در اینجا از نوع Ag/AgCl) روی سطح بتن قرار می‌گیرد و اختلاف پتانسیل میان آن و میلگرد توسط یک ولت‌متر اندازه‌گیری می‌شود. یک جریان توسط پروب در محدوده ۴۰ تا ۱۰۰ میکروآمپر و پالس



شکل ۱۴. مقاطع انجام آزمایش شدت و پتانسیل نیم‌پیل خوردگی و نیز اتصال الکتروود به تاندون فولادی

^۱- Galvapulse™

توسعه مدل پیش‌بینی آغاز خوردگی آرماتورهای تراورس بتنی B70 در خطوط راه‌آهن نواحی کویری (مطالعه موردی: خط راه آهن بم - زاهدان، بلاک رودشور- شورگن)

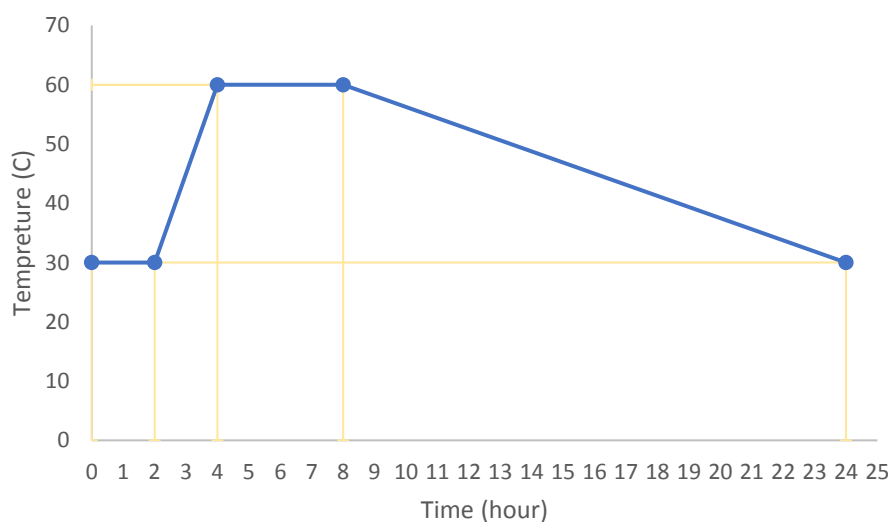


شکل ۱۵. انجام تست شدت خوردگی روی تراورس ها با دستگاه GalvaPulse

چسباننده ۴۵۰ کیلوگرم در متر مکعب) و مصالح سنگی، مشابه تراورس‌های بتنی مذکور استفاده شد (کارخانه تراورس CBG). همچنین، عمل‌آوری تسریع شده‌ی یک روزه بر اساس استاندارد ملی ایران به شماره ۱-۲۱۴۹۸ (۱۳۹۶)، که تراورس بتنی پیش‌تنیده نیز به همان صورت عمل‌آوری می‌شود (شکل ۱۶)، انجام شد.

۳-۴. نمونه‌برداری از نمونه مکعبی آزمایشگاهی

به منظور تعیین ضریب انتشار یون کلراید در سنین اولیه در بتن، نمونه‌های مکعبی ساخته و تحت آزمایش مغروق‌سازی کلراید قرار گرفتند. برای کسب حداکثر مشابهت میان این نمونه‌ها و تراورس بتنی پیش‌تنیده، از طرح اختلاط (نسبت آب به چسباننده ۰/۳۲ و میزان



شکل ۱۶. نمودار افزایش دما در عمل‌آوری تسریع شده نمونه‌های مکعبی (ایران، ۱۳۹۶)



شکل ۱۷. نمونه برداری از نمونه مکعبی

۴-۴. تعیین پروفیل یون کلراید و ضریب انتشار آزمایش کلراید محلول در اسید به روش تیتراسیون و بر اساس استاندارد ASTM C1152 (۲۰۱۲) روی نمونه‌های پودری از تراورس‌های موجود در سایت، تراورس‌های انتقالی به آزمایشگاه و نمونه‌های مکعبی انجام شد (شکل ۱۸). تفاوت اصلی این آزمایش با کلراید محلول در آب، آن است که آزمایش کلراید محلول در اسید به علت شکست ذرات خمیر بتن توسط اسید، کلراید مقید - یا کلراید ترکیب شده با خمیر سیمان - را آزاد کرده و اندازه‌گیری می‌کند. لذا، مقادیر کلراید اندازه‌گیری شده در این آزمایش، بیش از آزمایش کلراید محلول در آب بوده و کلراید کل، شامل کلراید مقید و کلراید آزاد را به دست می‌دهد. پس از تعیین درصد یون کلراید در هر یک از نمونه‌ها با استفاده از رابطه‌ی (۲) و برازش نتایج اصلاح شده از آزمایش (حذف ناحیه همرفت و نقاط ناهمخوان) مقادیر D و C_s بر اساس ASTM C1556 (۲۰۱۶) به دست می‌آید.

پس از اتمام عمل‌آوری، آزمایش مقاومت فشاری برای مقایسه با استاندارد ملی ایران به شماره ۱ - ۲۱۴۹۸ (۱۳۹۶) و آیین‌نامه‌ی EN 13230 (۲۰۱۶) انجام شد. سپس، آزمایش مغروق‌سازی در نمک بر اساس استاندارد ASTM C1556 (۲۰۱۶) انجام شد. بر این اساس، پس از باز کردن و خشک شدن نمونه‌ها تمام وجوه نمونه‌ها در هوای آزاد، غیر از وجه پرداخت شده^۱، با اپوکسی دوجزئی، پوشیده شد. پس از خشک شدن اپوکسی دوجزئی، نمونه‌ها در ظرف حاوی محلول ۱۶۵ گرم بر لیتر NaCl در دمای ۲۶ درجه در محیط آزمایشگاه قرار داده شد. پس از ۹۰ روز، نمونه‌ها از حوضچه مغروق، خارج و سطح پرداخت شده جهت آزمایش آماده شد. سپس، پودرگیری از ۸ عمق بر اساس استاندارد ASTM C1556 (۲۰۱۶) انجام و ۲ میلی‌متر اولیه، از آنجا که ممکن بود با مقادیر زیاد نمک پروفیل را تحت تأثیر قرار دهد، دور ریخته شد (شکل ۱۷).

^۱ - Finished Surface



شکل ۱۸. آزمایش کلراید محلول در اسید

قبل از آن شماره تراورس مورد نظر را بیان می‌کند. همچنین، تراورس‌های انتقالی به آزمایشگاه نیز بر اساس سطح نمونه‌برداری نام‌گذاری شده‌اند. به این صورت که برای سطح کناری از حرف اول S، Side و سطح زیرین از حرف اول B، Bottom استفاده شده است. شماره‌ی بعد از حرف نیز مربوط به شماره تراورس است. در جدول ۱، نتایج به‌دست آمده از پروفیل‌های یون کلراید برای تراورس‌های سایت آمده است.

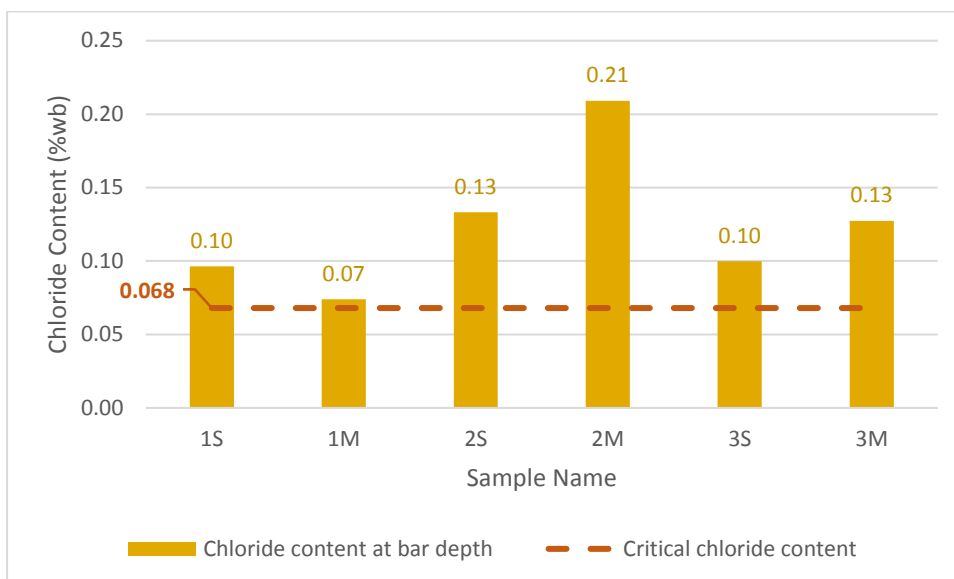
۵. بحث در خصوص نتایج و توسعه مدل

انتشار

همان گونه که اشاره شد، ضرایب انتشار و میزان کلراید سطحی از برازش پروفیل یون کلراید روی رابطه‌ی (۲) به دست آمده است. همچنین، از آنجا که در تراورس‌های موجود در سایت از دو قسمت میان دهانه و شانه تراورس نمونه‌برداری شده است، نام‌گذاری آن‌ها بر اساس حرف اول S، Shoulder و M، Midspan انجام شده است. عدد

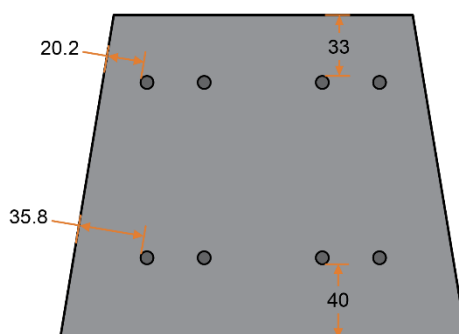
جدول ۱. نتایج به‌دست آمده از پروفیل‌های یون کلراید برای تراورس‌های سایت

میانگین	3M	3S	2M	2S	1M	1S	
۳/۶۳	۱/۶۷	۷/۰۱	۱/۲۳	۳/۲۷	۲/۳۸	۴/۴۱	ضریب انتشار یون کلراید ($10^{-12} \frac{m^2}{s}$)
۰/۳۳	۰/۳۵	۰/۲۳	۰/۴۲	۰/۵۰	۰/۱۴	۰/۳۴	مقدار کلراید سطحی (%)



شکل ۱۹. میزان کلراید در عمق تاندون‌های فولادی (۳۳ میلی‌متر برای نمونه‌های وسط دهانه (M) و ۶۰ میلی‌متر برای

نمونه‌های شانه تراورس (S))



شکل ۲۰. پوشش بتن در مقطع وسط دهانه در تراورس بتنی B70

همان‌گونه که در جدول ۱ مشاهده می‌شود، مقادیر ضریب انتشار، گوناگونی زیادی را نشان داده و در بازه $1/67$ تا $7/01$ ($10^{-11} \frac{m^2}{s}$) قرار دارد. این بازه وسیع احتمالاً به علت کم بودن نقاط نمونه‌برداری و خطای نمونه‌برداری در سایت به وجود آمده است. به همین علت، دو اصله تراورس بتنی ترک خورده به آزمایشگاه منتقل شد تا از مقاطع در معرض نفوذ کلراید، نمونه‌برداری شود. نتایج آزمایش پروفیل یون کلراید در جدول ۲ آمده است.

ضرایب انتشار یون کلراید در این آزمایش‌ها (جدول ۲) مقادیری از $3/48$ تا $4/04$ ($10^{-11} \frac{m^2}{s}$) داشتند

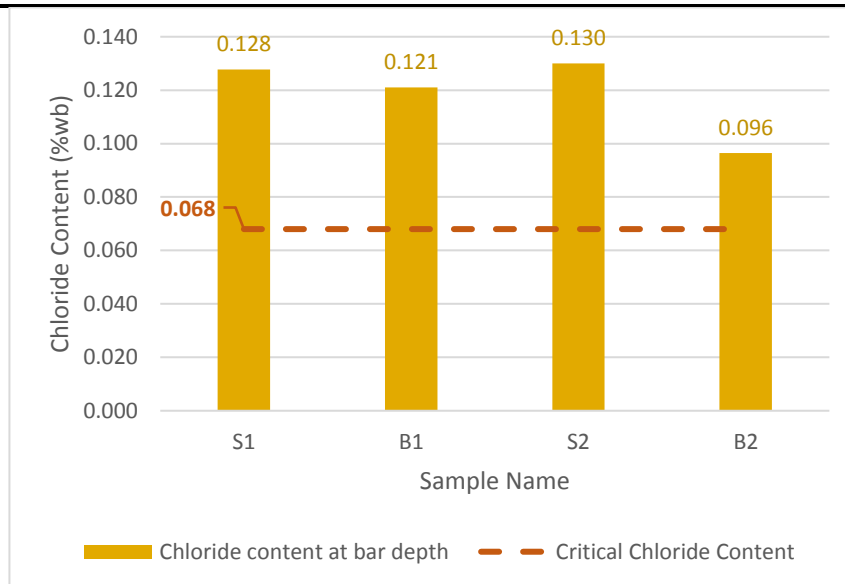
میزان کلراید در عمق تاندون‌های فولادی در شکل ۱۹ نشان داده شده است. از آنجا که نمونه‌برداری از سطح بالا انجام شده است، عمق متناظر با میلگرد برای مقطع وسط تراورس، ۳۳ میلی‌متر و برای مقطع شانه، ۶۰ میلی‌متر (شکل ۲۰) در نظر گرفته شده است. همچنین خط قرمز رنگ میزان کلراید بحرانی را نشان می‌دهد که در جدول ۲ به دست آمده و توضیح آن در بخش‌های بعدی خواهد آمد. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، در تمامی نمونه‌ها، میزان یون کلراید از میزان کلراید بحرانی فراتر رفته که آغاز خوردگی در این مقاطع را نشان می‌دهد.

توسعه مدل پیش‌بینی آغاز خوردگی آرماتورهای تراورس بتنی B70 در خطوط راه‌آهن نواحی کویری (مطالعه موردی: خط راه آهن بم - زاهدان، بلاک رودشور- شورگن)

که بازه‌ی کمتری نسبت به آز‌مایش‌های قبلی بود. همان‌طور که انتظار می‌رفت، از آنجا که این بلاک در یک زمان ساخته شده و تراورس‌ها طرح اختلاطی تقریباً مشابه یکدیگر داشتند باید ضرایب انتشار یون کلراید نیز نزدیک به یکدیگر به‌دست آید. همچنین، ممکن است دور ریختن پودر ۲ میلی‌متر اولیه و نیز پودرگیری از ۸ عمق بر دقت بیشتر نتایج تأثیرگذار بوده باشد. نکته‌ی دیگر، مقدار کلراید سطحی در پروفیل‌ها بود. کلراید سطحی در سطوح پایینی مقادیر بیشتری (۰/۳۲ و ۰/۳۳ در صد) از سطوح جانبی (۰/۲۱ در صد) دارد که حاکی از شرایط محیطی نسبتاً بدتر در سطوح پایینی تراورس‌ها است.

جدول ۲. نتایج آزمایش پروفیل یون کلراید برای تراورس‌های انتقالی به آزمایشگاه

میانگین	تراورس شماره دو		تراورس شماره یک		
	سطح زیرین (B2)	سطح جانبی (S2)	سطح زیرین (B1)	سطح جانبی (S1)	
۳/۷۷	۳/۴۸	۳/۶۱	۳/۴۹	۴/۰۴	ضریب انتشار یون کلراید ($10^{-12} \frac{m^2}{s}$)
۰/۲۷	۰/۳۳	۰/۲۱	۰/۳۲	۰/۲۱	مقدار کلراید سطحی (%)



شکل ۲۱. میزان کلراید در عمق تاندون‌های فولادی ۲۰/۲ میلی‌متر برای سطح جانبی (S) و ۳۵/۸ میلی‌متر برای سطح زیرین تراورس (B)

در سایت، در این نمونه‌ها نیز مقادیر کلراید در عمق میلگرد بیش از میزان کلراید بحرانی است که نشان‌دهنده آغاز خوردگی در تراورس است. برای این تراورس‌ها، میزان کلراید اولیه با نمونه‌برداری عمیق از دو تراورس به دست آمد که در جدول ۳ مشاهده می‌شود. اعداد آیین‌نامه بر حسب

میزان کلراید در عمق تاندون‌های فولادی برای تراورس‌های انتقالی به آزمایشگاه در شکل ۲۱ نشان داده شده است. در این نمونه‌ها، که نمونه‌برداری از سطح جانبی و سطح زیرین انجام شده، عمق متناظر با تاندون فولادی به ترتیب ۲۱/۵ و ۳۵/۸ میلی‌متر برای آن‌ها (شکل ۲۰) در نظر گرفته شده است. همانند تراورس‌های موجود

تراورس، میزان یون کلراید اولیه در محدوده مجاز بوده و از این بابت نگرانی خاصی وجود ندارد.

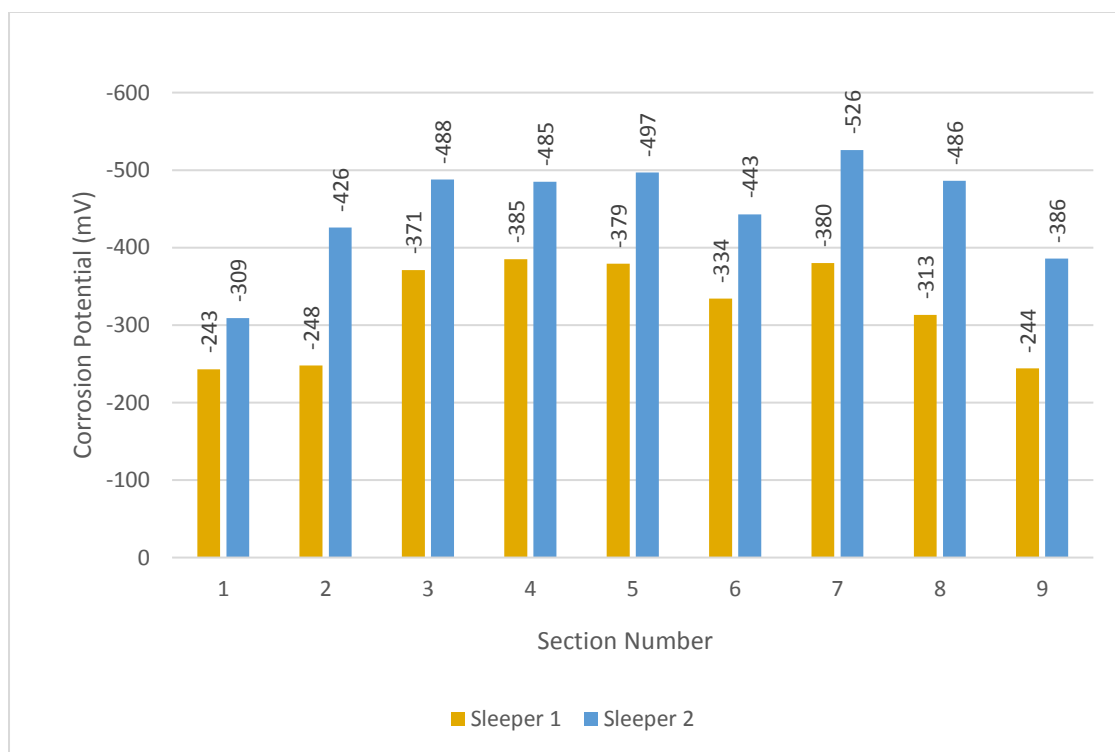
درصد وزنی سیمان بوده که با فرض میزان چسباننده ۴۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب، در ۰/۲ ضرب شده است. همان گونه که در جدول ۳ مشاهده می شود، در این دو

جدول ۳. میزان کلراید اولیه برای هر یک از تراورس های انتقالی به آزمایشگاه

تراورس شماره	تراورس شماره	حداکثر مقدار مندرج در	حداکثر مقدار مندرج در
۱	۲	ACI 222 (۲۰۰۱)	EN 206 (۲۰۱۳)
۰/۰۱۳	۰/۰۱۵	۰/۰۱۶	۰/۰۲۰

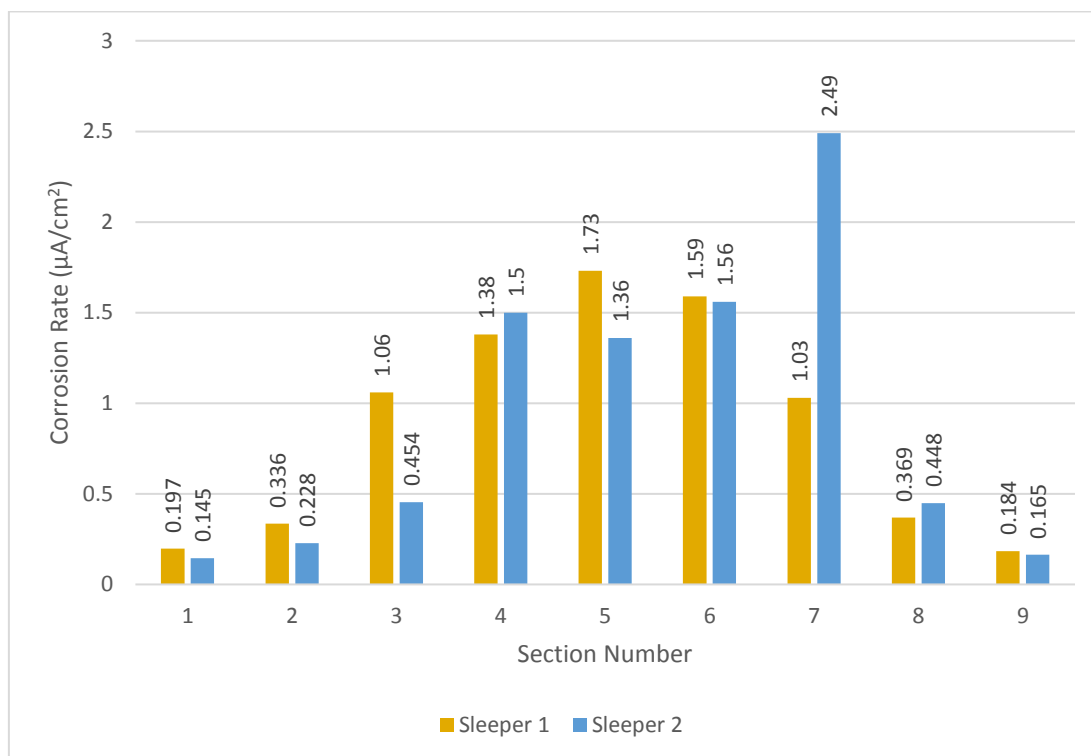
شده است. همچنین، همان گونه که در این نمودار مشاهده می شود، پتانسیل نیم پیل خوردگی در وسط دهانه تراورس مقادیر کمتری را نسبت به شانه ها و نشیمن گاه ریل نشان می دهد که بیانگر پیشرفت خوردگی در وسط دهانه نسبت به طرفین است. این نتیجه را نمودار نرخ خوردگی در شکل ۲۳ نیز تأیید می کند. در این نمودار، شدت جریان خوردگی، برای هر دو تراورس در مقاطع میانی، مقادیر بیشتری دارد.

نتایج آزمایش پتانسیل نیم پیل روی تراورس های بتنی انتقالی به آزمایشگاه در شکل ۲۲ مشاهده می شود. یکی از منابع مقدار پتانسیل نیم پیل خوردگی، از ۳۵۰ تا ۵۰۰ میلی ولت را به عنوان ۹۵٪ احتمال وقوع خوردگی در آرماتور مورد نظر در نظر گرفته است. همچنین، حداقل شدت جریان برای آغاز خوردگی را $0.5 \mu A/cm^2$ می داند (خان، ۲۰۰۲). با در نظر گرفتن این موضوع، به جز مقاطع ۱، ۲، ۸ و ۹ از تراورس شماره یک و مقطع ۱ از تراورس شماره دو، در سایر مقاطع، خوردگی به احتمال ۹۵٪ آغاز



شکل ۲۲. آزمایش پتانسیل نیم پیل روی دو تراورس منتقل شده به آزمایشگاه

توسعه مدل پیش‌بینی آغاز خوردگی آرماتورهای تراورس بتنی B70 در خطوط راه‌آهن نواحی کویری (مطالعه موردی: خط راه آهن بم - زاهدان، بلاک رودشور- شورگن)



شکل ۲۳. آزمایش شدت خوردگی نیم‌پیل روی دو تراورس منتقل شده به آزمایشگاه

همچنین، با دقت در نمودار شکل ۲۲ برای تراورس شماره یک، نخسین مقطعی که از میزان پتانسیل -350 میلی‌ولت تجاوز نموده‌اند مقاطع ۳ و ۷ هستند. با فرض این عدد به عنوان نقطه‌ی احتمالی آغاز خوردگی، از این دو مقطع به عنوان مقاطع میزان کلراید بحرانی استفاده شد. در نمودار شکل ۲۳، در تراورس شماره یک هم همین دو مقطع اولین مقطعی بوده‌اند که از میزان $0.5 \mu A/cm^2$ تجاوز نموده‌اند که نتایج قبلی را تأیید می‌کند. لذا، از این دو مقطع از مجاورت آرماتورها اقدام به نمونه‌برداری پودری بتن شد که نتایج کلراید محلول در اسید آن در جدول ۴ آمده است. از این میزان به عنوان میزان کلراید بحرانی، که در آن احتمالاً خوردگی آغاز می‌شود، استفاده خواهد شد.

جدول ۴. میزان کلراید حد آستانه خوردگی در تراورس شماره ۱ بر اساس داده‌های آزمایش نرخ و پتانسیل نیم‌پیل خوردگی

میانگین	مقطع شماره ۳	مقطع شماره ۷	میزان کلراید محلول در اسید (درصد وزن بتن)
۰/۰۶۸	۰/۰۶۹	۰/۰۶۷	

همچنین، در جدول ۵، مقایسه میزان کلراید بحرانی در تحقیق حاضر با برخی دیگر از تحقیقات مشاهده می‌شود.

جدول ۵. مقایسه مقادیر کلراید اولیه با مقادیر ادبیات فنی

تحقیق	میزان کلراید بحرانی (درصد وزن بتن)	مرجع
نتیجه حاصل از آزمایش حاضر	۰/۰۶۸	
خلیج فارس	۰/۰۵	(شکرچی و همکاران، ۲۰۰۸)
بتن حاوی صفر تا ۳۵ درصد خاکستر بادی	۰/۰۷	(چالی و همکاران، ۲۰۰۹)
	۰/۰۲۸ تا ۰/۰۴۱	(چئونگ و کایل، ۱۹۹۶)
اسکله در خلیج فارس	۰/۰۷۳	(شکرچی و همکاران، ۲۰۱۱)
بتن معمولی	۰/۰۶	(لامبرت و همکاران، ۱۹۹۱)

پس از اتمام دوره‌ی عمل‌آوری تسریع شده، آزمایش مقاومت فشاری روی نمونه‌های مکعبی ۱۵×۱۵ سانتی‌متر انجام شد و نتایج آن در جدول ۶ آمده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، مقاومت فشاری این نمونه‌ها با میانگین ۴۷/۲۵ مگاپاسکال، بیش از ۴۵ مگاپاسکال، معیار لازم برای پذیرش تراورس‌های بتنی پس از دوره‌ی عمل‌آوری تسریع شده، را کسب کرده است.

همان‌گونه که اشاره شد، عوامل بسیاری نظیر شرایط سطحی فولاد، سطح تماس فولاد و بتن، پتانسیل خوردگی فولاد، مشخصات بتن، سیمان و افزودنی‌ها، رطوبت، دما و pH بر میزان کلراید بحرانی اثرگذارند (آنگست و همکاران، ۲۰۰۹). همان‌طور که در جدول ۵ ملاحظه می‌شود، این میزان مقادیر مختلفی در تحقیقات مختلف داشته است. با این حال، میزان اندازه‌گیری شده در آزمایش حاضر در بازه‌ی نتایج سایر تحقیقات بوده است.

جدول ۶. نتایج مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی تحت عمل‌آوری تسریع شده‌ی یک روزه

میانگین	نمونه ۱	نمونه ۲
مقاومت فشاری (مگاپاسکال)	۴۸	۴۶/۵
		۴۷/۲۵

ضرایب انتشار یون کلراید و مقادیر کلراید سطحی برای نمونه‌های مکعبی در جدول ۷ آمده است.

جدول ۷. مقادیر ضریب انتشار یون کلراید و میزان کلراید سطحی در نمونه‌های مغروق شده‌ی ۹۰ روزه

میانگین	نمونه ۱	نمونه ۲
ضریب انتشار یون کلراید $(10^{-12} \frac{m^2}{s})$	۷/۵۴	۷/۸۰
مقدار کلراید سطحی (%)	۰/۹۰	۰/۹۴
		۷/۶۲

علت شرایط تسریع شده مقادیر بالایی یافته است. حال، به منظور مدل‌سازی تغییر ضریب انتشار در طول زمان، از رابطه (۳) استفاده می‌شود. با جایگذاری ضریب انتشار از جدول ۲ (که دقت بیشتری نیز داشته است) و ضریب انتشار در سنین اولیه از جدول ۷ در رابطه‌ی پیش‌گفته،

همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، مطابق انتظار، ضریب انتشار یون کلراید در نمونه‌های مغروق شده با سن ۹۰ روزه بسیار بیشتر از ضریب انتشار تراورس‌ها است. علت این امر، کاهش ضریب انتشار در طول زمان به علت رشد هیدراسیون و بلوغ بتن است. مقدار کلراید سطحی نیز به

توسعه مدل پیش‌بینی آغاز خوردگی آرماتورهای تراورس بتنی B70 در خطوط راه‌آهن نواحی کویری (مطالعه موردی: خط راه آهن بم - زاهدان، بلاک رودشور- شورگن)

که در آن، تابع erf^{-1} معکوس تابع خطا یا erf است. حال، با جایگذاری $C_s = 0.27$ و $C_{cr} = 0.68$ و $C_i = 0.14$ و $C_i = D = 7.622 \left(\frac{0.25}{t}\right)^m$ و ساده سازی، رابطه‌ی (۴) را می‌توان به صورت زیر بازنویسی کرد:

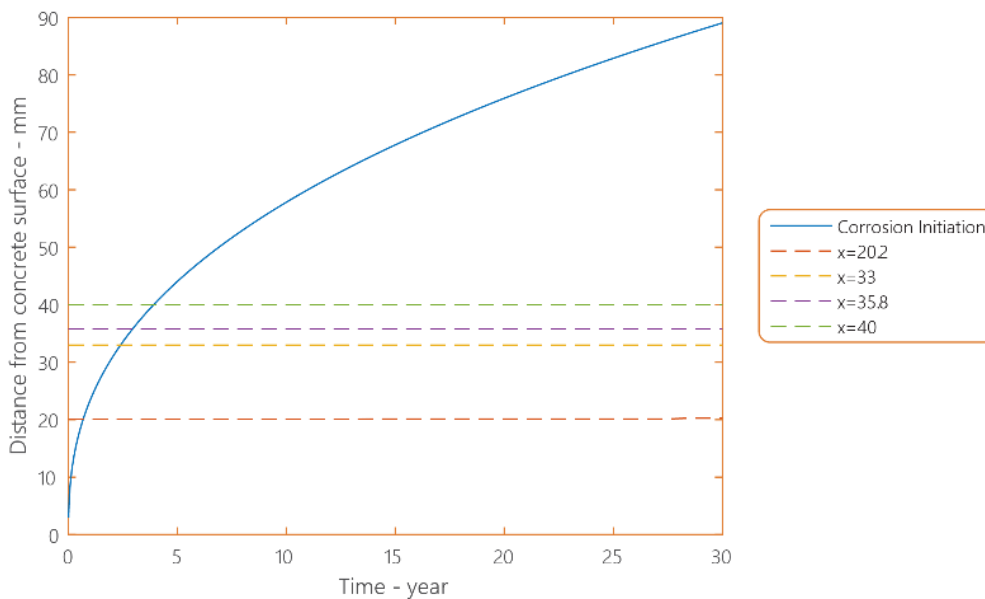
$$x = 1.76\sqrt{181.88 t^{0.8}}$$

که در آن، t زمان آغاز خوردگی بر حسب سال و x پوشش بتن بر حسب میلی‌متر است. نمودار شکل ۲۴، نمودار رابطه‌ی (۵) (۵) بوده و نشان‌دهنده نقاطی است که به مرحله‌ی آغاز خوردگی رسیده‌اند.

ضریب عمر برابر با 0.2 به دست می‌آید که تقریباً برابر با ضریب عمر در مدل ACI Life 365 (بتنر و توماس، ۲۰۱۸) است.

اکنون اگر در رابطه‌ی (۲)، C_{cr} را به عنوان حد آستانه‌ی خوردگی در طرف چپ معادله قرار داده و آن را بر حسب t حل کنیم، رابطه‌ی (۴) معادله‌ی نقاطی از مقطع بتن بر حسب زمان خواهد بود که به حد آستانه‌ی خوردگی رسیده‌اند و در صورت وجود آرماتور فولادی، خوردگی در آن نقاط آغاز خواهد شد.

$$x = erf^{-1} \left(\frac{C_s - C_{cr}}{C_s - C_i} \right) \sqrt{4Dt} \quad (۴)$$



شکل ۲۴. نمودار پیش‌بینی خوردگی براساس مدل توسعه داده شده

۶-۱. تحلیل حساسیت روی پارامترهای مدل

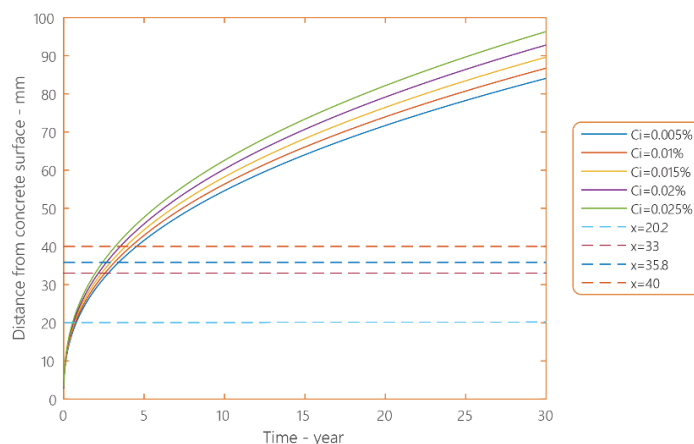
در این بخش، حساسیت نتایج مدل، با تغییر هر یک از عوامل اثرگذار روی مدل بررسی خواهد شد. ضرایب اثرگذار روی مدل انتشار یون کلراید شامل C_i ، میزان کلراید اولیه، C_s ، میزان کلراید سطحی، D ، ضریب انتشار یون کلراید در بتن و x فاصله از سطح بتن، در این تحلیل، بررسی خواهند شد.

به منظور درک بهتر آغاز خوردگی در مقطع تراورس بتنی، پوشش بتن (فاصله سطح بتن تا سطح نزدیک‌ترین آرماتور) در مقطع بحرانی تراورس بتنی B70، یعنی میان دهانه (شکل ۲۰) در نمودار شکل ۲۴ نشان داده شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، در مقطع میانی تراورس، برای نخستین آرماتور در سفره‌ی بالایی، خوردگی آغاز سریعی داشته و حدوداً در سن ۸/۵ ماه به مرحله‌ی آغاز خوردگی می‌رسد.

۶-۱-۱. میزان کلراید اولیه

درصد وزنی بتن اندازه‌گیری شد که تقریباً برابر با حد مجاز آیین‌نامه ACI 222 است. لذا، احتمالاً کاهش این میزان کلراید اولیه چندان مقدور نباشد. با این حال، منحنی آغاز خوردگی برای مقادیر ۰/۰۰۵، ۰/۰۱، ۰/۰۱۴ و ۰/۰۲ درصد در شکل ۲۵ مشاهده می‌شود.

همان‌گونه که در جدول ۳ مشاهده شد، میزان کلراید اولیه در این تراورس‌ها در حد مجاز قرار داشت. همچنین، میزان کلراید اولیه در نمونه‌های مکعبی هم حدود ۰/۰۱۷



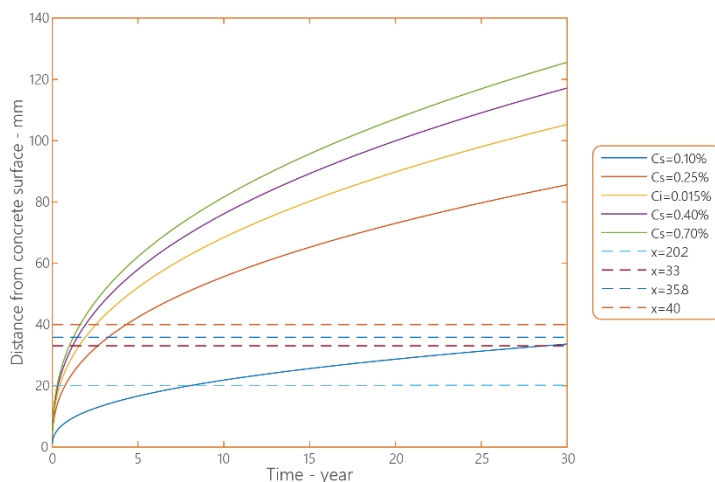
شکل ۲۵. تأثیر میزان کلراید اولیه بر آغاز خوردگی

این میزان به علت شرایط مختلف هر تراورس در مقادیر مختلفی از ۰/۱۴ تا ۰/۵۰ درصد اندازه‌گیری شد. همچنین، مشاهده شد که این میزان در زیر تراورس مقدار بیشتری نسبت به سطوح کناری داشته است. تأثیر میزان کلراید سطحی بر زمان آغاز خوردگی در بازه‌ی ۰/۱۰ تا ۰/۶۰ درصد در شکل ۲۶ نشان داده شده است.

همان‌گونه که مشاهده می‌شود، کاهش میزان کلراید اولیه از ۰/۰۱۴ به ۰/۰۰۵ منجر به کاهش ناچیز زمان آغاز خوردگی، به ویژه در پوشش بتن ۲۰/۲ میلی‌متر، شده است.

۶-۱-۲. میزان کلراید سطحی

میزان کلراید سطحی توسط شرایط محیطی، یعنی غلظت نمک، میزان رطوبت و نیز ویژگی‌های بتن تغییر می‌کند.



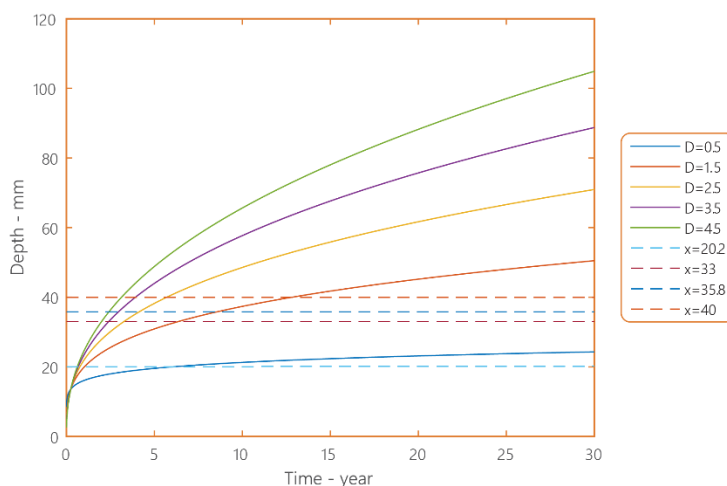
شکل ۲۶. تأثیر میزان کلراید سطحی بر آغاز خوردگی

توسعه مدل پیش‌بینی آغاز خوردگی آرماتورهای تراورس بتنی B70 در خطوط راه‌آهن نواحی کویری (مطالعه موردی: خط راه آهن بم - زاهدان، بلاک رودشور- شورگز)

۳-۱-۶. ضریب انتشار یون کلراید

ضریب انتشار یون کلراید در نمونه‌های مورد بررسی در سایت مقادیری از $1/67$ تا $7/10$ ($10^{-12} \frac{m^2}{s}$) پذیرفته است که به طور میانگین این ضرایب برای تراورس‌های موجود در سایت $(10^{-12} \frac{m^2}{s})$ $3/36$ و تراورس‌های انتقالی به آزمایشگاه $(10^{-12} \frac{m^2}{s})$ $3/77$ اندازه‌گیری شد. نمودار شکل ۲۷ تأثیر ضرایب انتشار $0/5$ ، $1/5$ ، $2/5$ ، $3/5$ و $4/5$ ($10^{-12} \frac{m^2}{s}$) بر آغاز خوردگی را نمایش می‌دهد.

همان‌گونه که مشاهده می‌شود، شروع خوردگی در درصدهای کم کلراید سطحی بسیار دیرتر اتفاق می‌افتد. برای مثال، خوردگی با کلراید سطحی $0/10$ درصد وزنی بتن، برای نزدیک‌ترین تاندون فولادی حدوداً ۸ سال پس از شروع قرارگیری در معرض شرایط آغاز می‌شود. از آنجا که کلراید سطحی وابستگی زیادی به شرایط محیطی دارد، در کنترل بهره‌بردار نبوده و لذا کاهش کلراید سطحی راهکار مناسبی جهت ارتقاء دوام تراورس‌های بتنی در نواحی کویری نخواهد بود.



شکل ۲۷. تأثیر ضریب انتشار یون کلراید بر آغاز خوردگی

می‌یافت. با بررسی شکل ۲۰ مشاهده می‌شود که این موضوع به علت پوشش بتن اندک ($20/2$ میلی‌متر) در سفره‌ی بالایی برای اولین تاندون فولادی است. در نمودار شکل ۲۸، تأثیر مقادیر مختلف پوشش از ۲۰ تا ۴۰ میلی‌متر بر زمان آغاز خوردگی مشاهده می‌شود. همان‌گونه که در شکل ۲۸ مشاهده می‌شود، افزایش پوشش بتن تأثیر به‌سزایی بر افزایش زمان خوردگی دارد. تنها با افزایش ۱۰ میلی‌متر پوشش بتن، از ۲۰ به ۳۰ میلی‌متر، زمان آغاز خوردگی بیش از یک سال به تأخیر می‌افتد. البته ناگفته پیداست که با توجه به داده‌های نمودار شکل ۲۸، تأثیر افزایش پوشش بتن به تنهایی جوابگوی

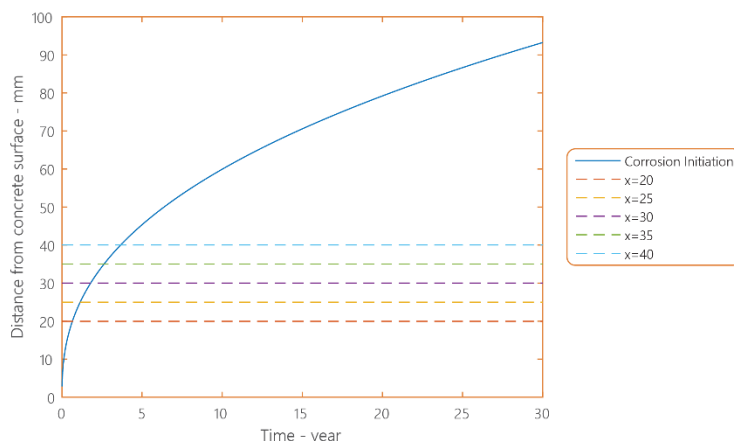
مقادیر کم ضریب انتشار، تأثیر چشم‌گیری بر کاهش زمان خوردگی داشته است. برای مثال، خوردگی در ضریب انتشار $(10^{-12} \frac{m^2}{s})$ $0/5$ در پوشش بتنی $20/2$ میلی‌متر پس از ۶ سال، و ضریب $(10^{-12} \frac{m^2}{s})$ $1/5$ در پوشش ۳۳ میلی‌متر پس از $6/5$ سال آغاز شده است.

۴-۱-۶. پوشش بتن

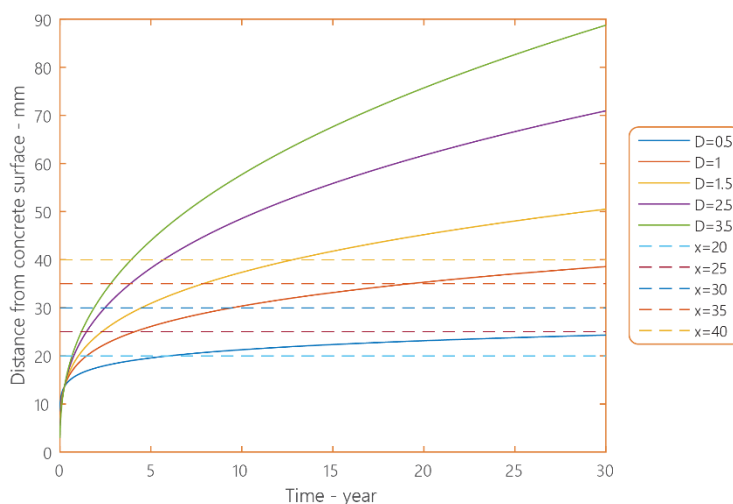
پوشش بتن نیز از عوامل مهم تأثیر گذار بر روی زمان آغاز خوردگی است. در تراورس‌های بتنی در نواحی کویری همان‌گونه که مشاهده شد، ترک خوردگی از وسط دهانه در سفره‌ی بالایی آغاز، و به طرفین گسترش

و کاهش ضریب انتشار در نمودار شکل ۲۹ آمده است. در این نمودار، به خوبی مشاهده می شود که به منظور کسب زمان مناسب برای آغاز خوردگی، هم کاهش ضریب انتشار و هم افزایش پوشش بتنی الزامی است.

ارتقای دوام تراورس های بتنی در نواحی کویری نیست. این تأثیر، آن گاه که با کاهش ضریب انتشار همراه گردد اثر کافی بر ارتقاء دوام این تراورس ها خواهد داشت. برای درک بهتر موضوع، تأثیر همزمان افزایش پوشش بتن



شکل ۲۸. نمودار تأثیر پوشش بتن بر آغاز خوردگی



شکل ۲۹. تأثیر افزایش پوشش بتن و کاهش ضریب انتشار بر زمان آغاز خوردگی

خواهد بود. نتایج این تحقیق می تواند در خصوص اصلاح تراورس بتنی در برابر شرایط محیطی کویرهای ایران مورد استفاده قرار گیرد. یافته های تحقیق فوق می تواند به صورت زیر فهرست شود:

۷. نتیجه گیری

در این تحقیق، انتشار یون کلراید در تراورس های بتنی در نواحی کویری مورد بررسی قرار گرفت و مدلی جهت تبیین و همچنین پیش بینی زمان آغاز خوردگی پیشنهاد شد. مدل مورد نظر از یافته های تجربی تراورس های بتنی در این نواحی توسعه یافته و در همین چارچوب معتبر

توسعه مدل پیش‌بینی آغاز خوردگی آرماتورهای تراورس بتنی B70 در خطوط راه‌آهن نواحی کویری (مطالعه موردی: خط راه آهن بم - زاهدان، بلاک رودشور- شورگن)

اختلاط و افزودن مصالح مکمل سیمانی نظیر سوپرزولان دوده سیلیس قابل دستیابی خواهد بود. - افزایش پوشش بتنی نیز به عنوان یک عامل مهم تأثیر گذار بر زمان آغاز خوردگی دیده شد. افزایش این عامل از ۲۰ به ۳۵ میلی‌متر، زمان آغاز خوردگی را از ۸/۵ ماه به ۲ سال و ۸/۵ ماه به تأخیر می‌اندازد. این عامل اگرچه به تنهایی کافی نیست، اما اگر با عامل کاهش ضریب انتشار همراه شود می‌تواند به عنوان یک راهکار عملیاتی و مطمئن دوام تراورس بتنی را از نقطه نظر نفوذ یون کلراید و خوردگی کلرایدی تضمین نماید.

۸. سپاس و قدردانی

از اداره کل خط و سازه‌های ریلی، کارخانه تراورس CBG، راه‌آهن ناحیه جنوب شرق، راه‌آهن ناحیه شرق، که در روند تحقیقات کمک شایانی داشتند تشکر و قدردانی می‌شود.

- عامل ترک خوردگی و خرابی زودهنگام تراورس‌های بتنی در نواحی کویری، خوردگی تاندون‌های پیش‌تنیده در اثر نفوذ یون کلراید از محیط به ساختار بتن است. - تخریب و ترک خوردگی در اثر زوال تاندون پیش‌تنیده از سفره‌ی بالایی آرماتورها در مقطع میانی تراورس بتنی B70 آغاز و به اطراف گسترش می‌یابد. - با توسعه‌ی مدل و اعمال ضرایب، مشخص شد که خوردگی در بحرانی‌ترین مقطع و نزدیک‌ترین تاندون فولادی تنها حدود ۸/۵ ماه پس از در معرض قرارگیری آغاز شده است.

- کاهش ضریب انتشار یون کلراید تأثیر بسیار زیادی بر تأخیر خوردگی بتن داشت. با کاهش این ضریب از $(10^{-12} \frac{m^2}{s})$ به $(10^{-11} \frac{m^2}{s})$ شروع خوردگی از ۸/۵ ماه به حدود ۶ سال برای نخستین آرماتور با پوشش ۲۰/۲ میلی‌متر به تأخیر می‌افتد. این کاهش با اصلاح طرح

۹. مراجع

- امراللهی، ع. ۱۳۹۵. "آمار نواحی ماسه‌گیر و کویری سال ۱۳۹۴".
امراللهی، ع. ۱۳۹۶. "آمار نواحی ماسه‌گیر و کویری سال ۱۳۹۵".
تدین، م. ۱۳۹۵. "بررسی علل خرابی تراورس‌های آسیب دیده مناطق ماسه‌گیر کویری".
سازمان ملی استاندارد ایران. ۱۳۹۶. "راه‌آهن - خط - تراورس‌های بتنی و تیرهای حامل، قسمت ۱: الزامات عمومی". استاندارد ملی ایران، ۲۱۴۹۸.
کلینسلی، د. ۱۳۸۱. "کویرهای ایران و خصوصیات ژئومورفولوژیکی و پالئوکلیماتولوژی آن". (ع. پاشایی، ترجمه). سازمان جغرافیایی نیروهای مسلح، تهران.
مهتا، پ. و مونته‌تیرو، پ. ۱۳۹۵. "ریزساختار، خواص و اجزای بتن (تکنولوژی بتن پیشرفته)". دانشگاه صنعتی امیرکبیر.
American Concrete Institute. 2001. "Protection of metals in concrete against corrosion". ACI 222R-01.
American Concrete Institute. 2014. "Report on corrosion of prestressing steels". ACI222.2R-14.
Angst, U., Elsener, B., Larsen, C. and Vennesland, Ø. 2009. "Critical chloride content in reinforced concrete—a review". Cement Concrete Res., 39: 1122-1138. doi:10.1016/j.cemconres.2009.08.006
Ashrafi, H. R. and Ramezani-pour, A. A. 2007. "Service life prediction of silica fume concretes". Int. J. Civ. Eng., 5(3): 182-197. Retrieved from <http://ijce.iust.ac.ir/article-1-323-en.html> <http://ijce.iust.ac.ir/article-1-323-en.pdf>.
ASTM International. 2012. "Standard test method for acid-soluble chloride in mortar and concrete (ASTM C1152)". Retrieved from <https://www.astm.org/Standards/C1152>.
ASTM International. 2015. "Standard test method for corrosion potentials of uncoated reinforcing steel in concrete (ASTM C876-15)". Retrieved from <https://www.astm.org/Standards/C876.htm>

- ASTM International. 2016. "Standard test method for determining the apparent chloride diffusion coefficient of cementitious mixtures by bulk diffusion (ASTM C1556-11a)". Retrieved from <https://www.astm.org/Standards/C1556.htm>.
- ASTM International. 2018. "Standard test method for obtaining and testing drilled cores and sawed beams of concrete (ASTM C42/C42M-18)". Retrieved from <https://www.astm.org/Standards/C42.htm>.
- Basheer, L., Kropp, J. and Cleland, D. J. 2001. "Assessment of the durability of concrete from its permeation properties: A review". *Constr. Build. Mater.*, 15(2): 93-103. doi:[https://doi.org/10.1016/S0950-0618\(00\)00058-1](https://doi.org/10.1016/S0950-0618(00)00058-1).
- Bentz, E. C. and Thomas, M. D. A. 2018. "Life-365 service life prediction model". 2.2.3 ed., Life-365™ Consortium III.
- Bjegović, D., Krstić, V., Mikulić, D. and Ukrainczyk, V. 1995. "C-D-c-t diagrams for practical design of concrete durability parameters". *Cement Concrete Res.*, 25(1): 187-196. doi:[https://doi.org/10.1016/0008-8846\(94\)00126-J](https://doi.org/10.1016/0008-8846(94)00126-J).
- British Standards. 2013. "Concrete: Specification, performance, production and conformity (BS EN 206)". Retrieved from <https://shop.bsigroup.com/ProductDetail/?pid=000000000030326195>.
- British Standards. 2016. "Railway applications, track, concrete sleepers and bearers, general requirements Part 1: General requirements (BS EN 13230-1)". Retrieved from <https://shop.bsigroup.com/ProductDetail/?pid=000000000030292280>.
- Bruno, L., Horvat, M. and Raffaele, L. 2018. "Windblown sand along railway infrastructures: A review of challenges and mitigation measures". *J. Wind Eng. and Indus. Aerodyn.*, 177: 340-365. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jweia.2018.04.21>.
- CBG Concrete Sleeper Factory. Retrieved from <http://www.cbg-co.ir/en/>.
- Chalee, W., Jaturapitakkul, C. and Chindapasirt, P. 2009. "Predicting the chloride penetration of fly ash concrete in seawater". *Marine Struct.*, 22(3): 341-353. doi:<https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2008.12.001>.
- Cheung, M. S. and Kyle, B. R. 1996. "Service life prediction of concrete structures by reliability analysis". *Constr. Build. Mater.* 10(1): 45-55. doi:[https://doi.org/10.1016/0950-0618\(95\)00055-0](https://doi.org/10.1016/0950-0618(95)00055-0).
- Dai, L., Wang, L., Zhang, J. and Zhang, X. 2016. "A global model for corrosion-induced cracking in prestressed concrete structures". *Eng. Failure Anal.*, 62: 263-275. doi:<https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2016.01.013>.
- Group, F. T. 2006. "Model code for service life design". FIB Bull. No. 34.
- Khan, A. A. 2002. "Guidebook on non-destructive testing of concrete structures". International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria.
- Lambert, P., Page, C. and Vassie, P. 1991. "Investigations of reinforcement corrosion. 2. Electrochemical monitoring of steel in chloride-contaminated concrete". *Mater. Struct.*, 24(5): 351-358 .
- Li, F., Yuan, Y. and Li, C. Q. 2011. "Corrosion propagation of prestressing steel strands in concrete subject to chloride attack". *Constr. Build. Mater.*, 25(10): 3878-3885. doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.04.011>.
- Luping, T. and Gulikers, J. 2007. "On the mathematics of time-dependent apparent chloride diffusion coefficient in concrete". *Cement Concrete Res.*, 37(4): 589-595. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.01.006>.
- Mangat, P. S. and Molloy, B. T. 1994. "Prediction of long term chloride concentration in concrete". *J. Mater. Struct.*, 27(6): 338. doi:10.1007/bf02473426.
- Mohammadzadeh, S. and Vahabi, E. 2011. "Time-dependent reliability analysis of B70 pre-stressed concrete sleeper subject to deterioration". *Eng. Fail. Anal.*, 18(1): 421-432. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.engfailanal.2010.09.030>.
- Ramezaniapour, A., Jahangiri, E., Ahmadi, B. and Moodi, F. 2012. "Evaluation and Modification of the FIB Service-Life Design Model for the Persian Gulf region". International Conference on Coasts, Ports and Marine Structures (ICOPMAS), Ports and Maritime Organization, Tehran, Iran.
- Shekarchi, M., Ghods, P., Alizadeh, A., Chini, M. and Hoseini, M. 2008. "Duragulf, a local service life model for the durability of concrete structures in the south of Iran". *Arab. J. Sci. Eng.*, 33.
- Shekarchi, M., Moradi-Marani, F. Pargar, F. 2011. "Corrosion damage of a reinforced concrete jetty structure in the Persian Gulf: A case study". *Struct. Infrastruct. Eng.*, 7(9): 701-713 .
- Siemes, A. and Edvardsen, C. 1999. "Duracrete: Service life design for concrete structures". NRC Research Press., Ottawa.

توسعه مدل پیش‌بینی آغاز خوردگی آرماتورهای تراورس بتنی B70 در خطوط راه‌آهن نواحی کویری (مطالعه موردی: خط راه‌آهن بم - زاهدان، بلاک رودشور- شورگن)

- Tolou Kian, A. R., Sadeghi, J. and Zakeri, J. A. 2020. "Influences of railway ballast sand contamination on loading pattern of pre-stressed concrete sleeper". *Constr. Build. Mater.*, 233: 117324. doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117324>.
- Tolou Kian, A. R., Zakeri, J. A. and Sadeghi, J. 2018. "Experimental investigation of effects of sand contamination on strain modulus of railway ballast". *Geomech. Eng.*, 14: 563-570. doi:10.12989/gae.2018.14.6.563.
- Van der Wegen, G., Polder, R. B. and van Breugel, K. 2012. "Guideline for service life design of structural concrete- a performance based approach with regard to chloride induced corrosion. *Heron*, 57(3): 153-168.
- Zakeri, J., Esmaeili, M. and Fathali, M. 2011. "Evaluation of humped slab track performance in desert railways". *Proc. Inst. Mech. Eng., Part F: J. Rail Rapid Transit*, 225: 566-573. doi:10.1177/0954409711403677.
- Zakeri, J. A. and Abbasi, R. 2012. "Field investigation of variation of loading pattern of concrete sleeper due to ballast sandy contamination in sandy desert areas". *J. Mech. Sci. Technol.*, 26(12): 3885-3892. doi:10.1007/s12206-012-0886-5.
- Zakeri, J. and Forghani, M. 2012. "Railway route design in desert areas". *Am. J. Environ. Eng.*, 2: 13-18. doi:10.5923/j.ajee.20120202.03.