Archive of SID

درس‌هایی از بررسی خوردگی سازه‌های بتنی در محیط خلیج فارس

محمد شکرچی‌زاده، رئیس مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، سرپرست انستیتو مصالح ساختمانی دانشگاه تهران،
shekarch@ut.ac.ir
محمدحسین تدین، دانشجوی دکترای سازه‌های دریایی، گروه مهندسی عمران، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران،
tadayon@ut.ac.ir

چکیده
گستردگی استفاده از سازه‌های بتن مسلح در زیرساخت‌ها و حتی ساختمان‌های معمولی، لزوم توجه به بررسی‌های بیشتر در زمینه خرابی‌های مرتبط با بتن مسلح و به‌ویژه خوردگی میلگرد در بتن را روشن می‌سازد. کشور ایران با داشتن مرزهای بسیار طولانی با دریاهای شور، از مستعدترین مناطق بروز خوردگی می‌باشد. در ضمن منطقه خلیج فارس و دریای عمان که منطقه‌ای استراتژیک از لحاظ ژئوپولیتیک و اقتصادی می‌باشد، دارای سازه‌های بتن مسلح بسیاری نظیر بنادر، اسکله‌ها، سکوهای دریایی و سایر تاسیسات و تجهیزات بندری می‌باشند. این منطقه دارای غلظت املاح بسیار زیاد و همچنین آب و هوای بسیار گرم و مرطوب می‌باشند که خود مزید بر علت خواهد بود.
خوردگی فولاد فقط در سازه‌های بتنی، سالانه، به‌طور متوسط، هزینه‌ای در حدود نیم درصد تولید ناخالص ملی در بر دارد که در ایران در حال حاضر بیش از ۲ میلیارد دلار برآورد می‌گردد، که خود نشان از اهمیت بررسی این موضوع برای کاهش هزینه‌های ناشی از خوردگی می‌باشد.
با توجه به علل مذکور، مساله خوردگی میلگرد در بتن در منطقه خلیج فارس از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در این مقاله، سعی بر این است که در ابتدا آشنایی کلی با بتن و خواص آن، فرآیند خوردگی فولاد در بتن، عوامل موثر بر بروز پدیده خوردگی در سازه بتنی، نحوه کاهش احتمال خوردگی در سازه جدید، و بررسی و کاهش سرعت خوردگی سازه آسیب‌دیده بحث می‌گردد و در ادامه چند نمونه از این بررسی‌ها و راهکارهای مربوط چند سازه در خلیج فارس که توسط انستیتو مصالح ساختمانی دانشگاه تهران صورت گرفته است ارائه می‌گردد و در انتها تحقیقات لازم در مورد پدیده خوردگی و افزایش طول عمر مفید سازه‌های بتنی و فعالیت‌های صورت گرفته برای شرایط خلیج فارس در انستیتو مصالح ساختمانی دانشگاه تهران بحث می‌گردد.

مقدمه
امروزه سازه‌های بتنی نقشی مهم و حیاتی در زیرساخت‌های هر جامعه‌ای دارند. بنابراین شرایط و عملکرد این سازه‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌باشد.
سالانه هزینه بسیار زیادی صرف تعمیر، نگهداری و تقویت سازه‌های موجود می‌گردد که پیش‌بینی می‌شود در آینده این هزینه‌ها نیز افزایش یابد. درصد بسیاری از این هزینه‌ها به‌علت دوام ناکافی سازه‌های بتنی می‌باشد. عملیات تعمیر و نگهداری سازه‌ها هزینه‌های دو چندانی در مقایسه با هزینه‌های ساخت اولیه سازه تحمیل می‌کند که می‌تواند اثرات نامطلوبی بر محیط زیست و سرمایه‌های جامعه داشته باشد.
در سال‌های اخیر، تحقیقات بسیار زیادی به‌منظور درک بهتر ساز و کار خرابی بتن، به‌ویژه خوردگی فولاد در بتن انجام گرفته است. در طراحی سازه‌ها، اغلب تاکید اصلی بر خواص و ظرفیت مکانیکی می‌باشد و طراحی دوام، کیفیت اجرا و مدیریت بهره‌برداری نادیده گرفته می‌شود و به‌ندرت الزامات خاصی برای دوام و عملکرد طولانی مدت سازه وضع می‌گردد. در عمل، تنها وقتی که سازه‌ها دچار

www.SID.ir

Archive of SID

مشکلات دوامی گسترده می‌شود، الزامات دوامی جدید در آیین‌نامه‌ها وارد می‌گردد که حتی این الزامات بسیار عقب‌تر از پیشرفت‌های فنی و علمی می‌باشد.
خوردگی فولاد در سازه‌های بتنی سالانه، به‌طور متوسط، هزینه‌ای در حدود نیم درصد تولید ناخالص ملی در بر دارد که در ایران علی‌رغم نبود آمار رسمی در این زمینه، در حال حاضر بیش از ۲ میلیارد دلار برآورد می‌گردد.
خوردگی فولاد در بتن از اصلی‌ترین عوامل خرابی سازه‌های بتن مسلح در محیط خلیج فارس می‌باشد. این خرابی معمولا به شکل ترک‌خوردگی و قلوه‌کن شدن پوشش بتنی به علت انبساط محصولات خوردگی اطراف میلگرد می‌باشد. در ضمن خوردگی میلگرد در بتن می‌تواند اتصال فولاد و بتن را تضعیف کند. بتن سالم، محافظ خوبی برای میلگرد به حساب می‌آید. محیط قلیایی بتن که معمولا دارای pH بیش از ۱۳ می‌باشد، منجر به ایجاد لایه انفعالی بر روی سطح میلگردها می‌گردد و سرعت خوردگی فولاد بسیار ناچیز می‌شود. پوشش بتنی روی میلگرد نیز حفاظت فیزیکی برای میلگرد به حساب می‌آید و سدی در برابر نفوذ مواد مضر می‌باشد.
برای شروع خوردگی میلگرد، لایه انفعالی محافظ باید به‌صورت موضعی یا عمومی تخریب گردد. از بین رفتن لایه انفعالی می‌تواند به دو دلیل کربناته شدن بتن نزدیک میلگرد (کاهش pH محیط تا حدود ۹) و یا افزایش غلظت یون کلرید تا بیش از حد بحرانی باشد.
امروزه برای طراحی سازه‌های بتنی مسلح در برابر خوردگی فولاد از بتن با نفوذپذیری کم با کاهش نسبت آب به سیمان و استفاده از مواد سیمانی جایگزین سیمان، و در نظر گرفتن ضخامت پوشش بتنی مناسب استفاده می‌شود. در حال حاضر، محققان هنوز برای تخمین میزان خوردگی فولاد در بتن و اثر آن بر دوام سازه بتنی به اجماع نرسیده‌اند زیرا عوامل بسیاری که هنوز کاملا شناخته نشده‌اند بر خوردگی تاثیرگذار می‌باشد. به‌طور مثال می‌توان به عدم قطعیت‌های مرتبط با مصالح و یا میزان خورندگی محیط و یا ساز و کار خوردگی اشاره نمود.
از آن‌جا که هزینه‌های تعمیر و نگهداری سازه‌های بتنی بسیار زیاد است، هنگام طراحی و اجرا، تخمین مقدار خرابی در طول عمر مفید سازه بسیار اهمیت دارد. مدل‌های تخمین عمر مفید سازه می‌توانند مهندسان را برای تصمیم‌گیری در مورد نوع مصالح و مشخصات سازه (همانند ضخامت پوشش بتنی) راهنمایی و کمک نمایند تا به عمر مفید مد نظر دست یابند. در ضمن این مدل‌ها کمک زیادی به برنامه‌ریزی تعمیر، نگهداری و تقویت سازه‌های ساخته شده می‌نمایند. درک ساز و کار و روند خوردگی و همچنین آهنگ خوردگی برای پیش‌بینی کمی عمر مفید سازه بتنی مسلح ضروری می‌باشد. در ضمن تعیین شرط پایان عمر مفید سازه نیز از اهمیت خاصی برخوردار است که باید مشخص گردد. در نتیجه، وجود مدلی برای تخمین عمر مفید سازه برای توسعه منطقی استانداردهای طراحی بر اساس دوام ضروری به‌نظر می‌رسد.

بتن و خواص آن

امروزه، بتن، پر مصرف‌ترین مصالح ساختمانی است. هر ساله، به ازای هر نفر، تقریبا یک تن بتن مصرف می‌شود. خوردگی میلگرد در بتن از جمله رایج‌ترین خرابی‌ها در سازه‌های بتن مسلح بوده و یکی از مهمترین مشکلاتی است که مهندسان عمران، امروزه در نگهداری سازه‌های بتن مسلح با آن مواجه می‌باشند. این موضوع سالیانه خسارات مالی زیادی در پی تعمیر، بازسازی و نگهداری از این سازه‌ها در

www.SID.ir

Archive of SID

بر دارد.
بتن، در ساده‌ترین حالت، مخلوطی از سیمان، سنگدانه و آب می‌باشد. پس از ترکیب و واکنش سیمان با آب، سنگدانه‌ها به‌عنوان یک پرکننده و خمیر سیمان نقش چسب برای چسباندن سنگدانه‌ها را ایفا می‌کند. محصول نهایی این مخلوط و واکنش، جسمی سخت‌شده می‌باشد. بنابراین می‌توان گفت که بتن به‌دلیل قابلیت شکل‌پذیری در قالب، مقاومت مناسب در برابر آب، آتش‌سوزی و عوامل جوی، در دسترس بودن و قیمن مناسب مصالح، امکان استفاده از مواد زاید صنعتی در آن، مقاومت فشاری مناسب و امکان کاربرد آن در ساخت اکثر سازه‌ها، به‌شکل گسترده‌ای در ساخت و ساز استفاده می‌گردد. البته مقاومت کششی ضعیف و ترد و شکننده بودن این ماده سرامیکی، از معایب آن به‌شمار می‌آید، به‌همین علت، برای استفاده از بتن در سازه‌ها، معمولا از کامپوزیت بتن و فولاد (به‌شکل میلگرد)، استفاده می‌گردد تا بتوان بتن مسلحی ایجاد نمود که مقاومت کششی را تحمل کند و به جسمی شکل‌پذیر تبدیل گردد.
همان‌طور که بیان شد، خاصیت چسبانندگی و مقاومتی بتن، ناشی از محصول ترکیب آب و سیمان می‌باشد. واکنش سیمان و آب که هیدراته‌شدن سیمان نامیده می‌شود، واکنشی گرمازا است و محصول آن ژل سیمان ($C\text{-}S\text{-}H$) و هیدروکسید کلسیم (CH) می‌باشد. ژل سیمان دارای خواص مقاومتی و مکانیکی بسیار مناسبی است و ساختار اصلی و مقاومتی بتن از آن ناشی می‌گردد. هیدروکسید کلسیم دارای خواص مکانیکی مناسبی نیست اما به علت خواص قلیایی، pH محیط بتن را بیش از ۱۳ نگه می‌دارد. این محیط قلیایی، می‌تواند محیط بسیار مناسبی برای حفاظت میلگرد داخل بتن باشد.
امروزه برای بهبود خواص مقاومتی و ساختاری بتن، موادی تحت عنوان افزودنی‌های معدنی یا پوزولان‌ها در بتن اضافه می‌گردد. از جمله این مواد می‌توان به دوده سیلیسی (ضایعات کارخانه‌های فروسیلیس)، خاکستر بادی (ضایعات کارخانه‌های دارای سوخت ذغال‌سنگ) و پوزولان‌های طبیعی اشاره نمود. این مواد در محیط مرطوب داخل بتن، با هیدروکسید کلسیم (CH) موجود واکنش می‌دهند و محصول این واکنش، ژل $C\text{-}S\text{-}H$ می‌باشد. بنابراین استفاده از این مواد می‌تواند ساختار و خواص مقاومتی بهتری برای بتن ایجاد کند. البته به‌علت حضور هیدروکسید کلسیم در این واکنش، pH محیط بتن حتی تا کمتر از ۱۰ کاهش پیدا خواهد کرد و قابلیت بتن در حفاظت از میلگرد داخل آن کاهش خواهد یافت [۱ و ۲].

ساز و کار خوردگی فولاد در بتن

خوردگی فولاد در بتن پدیده‌ای الکتروشیمیایی می‌باشد. برای اینکه واکنش الکتروشیمیایی رخ دهد (بدون وجود منبع الکتریکی خارجی)، باید دو واکنش نیم‌پیل وجود داشته باشد که یکی بتواند الکترون تامین کند (واکنش آندی، اکسید شدن آهن برای تشکیل یون) و دیگری الکترون را مصرف کند (واکنش کاتدی، احیا اکسیژن و تشکیل یون هیدروکسیل OH^-). وقتی دو واکنش در دو محل با فاصله زیاد از هم روی دهد، به واکنش، ماکروپیل گفته می‌شود، و وقتی دو واکنش نزدیک به هم یا در یک مکان انجام گیرد، میکروپیل نام دارد.
برای فولاد مدفون در بتن، واکنش نیم‌پیل شامل اکسید شدن یا حل شدن آهن می‌باشد:

$$Fe \rightarrow Fe^{++} + ۲e^- \qquad (۱\text{-الف})$$

$$۲Fe^{++} + ۴OH^- \rightarrow ۲Fe(OH)_۲ \qquad (۱\text{-ب})$$

$$۲Fe(OH)_۲ + ۰.۵O_۲ \rightarrow ۲FeOOH + H_۲O \qquad (۱\text{-ج})$$

www.SID.ir

Archive of SID

$$Fe + OH^- + H_2O \rightarrow HFeO_2^- + H_2 \qquad (۱-د)$$

و محتمل‌ترین واکنش‌های نیم‌پیل کاتدی:

$$2H_2O + O_2 + 4e^- \rightarrow 4(OH)^- \qquad (۲)$$

$$2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2 \qquad (۳)$$

هرکدام از این واکنش‌های آندی و کاتدی در شرایط خاصی اتفاق می‌افتد. این شرایط وابسته به دسترسی به اکسیژن و pH مایع منفذی خمیر سیمان در مجاورت فولاد می‌باشد. دیاگرام پوربه در شکل ۱، نواحی ترمودینامیکی که هرکدام از واکنش‌های فوق در آن پایدار هستند را نشان می‌دهد که تابع پتانسیل الکتروشیمیایی[1] و pH محیط می‌باشد. برای وقوع واکنش (۲)، پتانسیل باید کمتر از خط‌چین بالایی باشد و برای وقوع واکنش (۳)، پتانسیل باید کمتر از خط‌چین پایینی باشد. به‌طور کلی، اگر تمام عوامل ثابت باشد، هرچه دسترسی به اکسیژن بیشتر گردد، پتانسیل الکتروشیمیایی مثبت‌تر (آندی‌تر) خواهد شد.

در بتن سالم، pH مایع منفذی در حدود ۱۳/۰ تا ۱۳/۵ می‌باشد که در نتیجه واکنش‌های آندی (۱-الف) و (۱-ب) محتمل‌تر می‌باشند. در صورت نبود عوامل دیگر، اکسیدهای آهن، Fe_3O_4 و Fe_2O_3 یا هیدروکسیدهای این ترکیبات تشکیل فاز جامد می‌دهند و می‌توانند بر روی فولاد تشکیل لایه محافظ (انفعالی) دهند. اگر pH مایع منفذی کاهش یابد، مثلا با کربناته‌شدن یا واکنش پوزولانی، سیستم می‌تواند در ناحیه‌ای از دیاگرام پوربه قرار گیرد که این اکسیدها دیگر تشکیل لایه محافظ ندهند و امکان حل شدن فعال فولاد ایجاد گردد. از لحاظ نظری، با افزایش pH تا رسیدن به حدی که واکنش (۱-د) بتواند انجام شود و از نظر ترمودینامیکی $HFeO_2^-$ پایدار تشکیل گردد، امکان خوردگی فعال وجود دارد. واکنش (۱-ج) نیز در pH معمول بتن و در دمای زیاد (بیشتر از $60\,^{\circ}C$) انجام پذیر است. البته تا به‌حال گزارشی از انجام این واکنش در بتن منتشر نشده است.

متداول‌ترین عامل ایجاد شروع خوردگی فولاد در بتن، حضور یون کلرید می‌باشد. منشا کلرید می‌تواند مواد افزودنی، محیط دریایی، محلول‌های شور صنعتی، نمک‌های یخ‌زدا و یا آلودگی‌های دیگر باشد.

جزئیات ساز و کار واقعی شکست لایه انفعالی توسط کلرید هنوز شناخته شده نمی‌باشد زیرا بررسی مراحل آن در مقیاس اتم در لایه بسیار نازک انفالی بسیار سخت می‌باشد. عقیده بر این است که یون کلرید در نقاط ضعیف لایه‌های انفعالی ضخیم‌تر قرار می‌گیرد و باعث انتقال یونی آسان‌تر می‌گردد. در حالت انفعالی نازک‌تر از تک لایه، یون کلرید با یون هیدروکسیل برای قرارگیری در نقاط با فعالیت زیاد روی سطح فلز رقابت دارد و از انفعالی شدن این قسمت جلوگیری می‌کند.

در هر دو حالت، نتیجه ایجاد خوردگی فعال می‌باشد و به محض شروع این نوع خوردگی، واکنش‌ها خودبه‌خود ادامه می‌یابند. واکنش یون‌های کلریدی و آهنی محلولی تشکیل می‌دهند که از محل آندی به‌وسیله انتشار، خارج می‌گردد. وقتی این محلول به منطقه‌ای با pH زیاد می‌رسد، هیدروکسید آهن غیر محلول ته‌نشین شده و کلرید آزاد می‌گردد و مجددا به سمت میلگرد حرکت می‌کند. علاوه بر آن، به‌علت این‌که محل شکست موضعی لایه انفعالی تبدیل به آند می‌شود، یون‌های کلرید بیشتری به آن

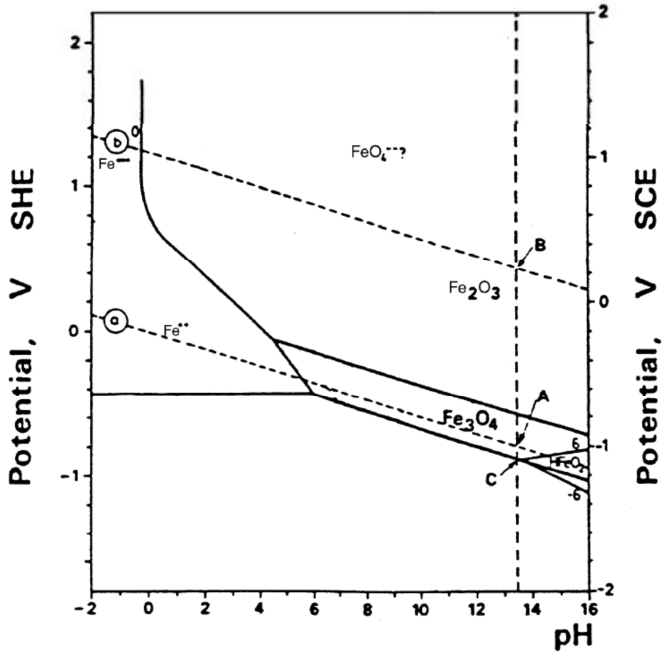
---

[1] پتانسیل الکتروشیمیایی مقدار سهولت انتقال بار الکترون بین فلز و محیط اطراف آن می‌باشد که در این‌جا بین فولاد و مایع منفذی خمیر سیمان است. این پتانسیل خاصیتی از فصل مشترک فولاد-بتن است و فقط به فولاد وابسته نمی‌باشد. تعیین مقدار مطلق این پتانسیل امکان‌پذیر نیست بنابراین اختلاف پتانسیل سطح فولاد و الکترود مرجع اندازه‌گیری می‌شود. این الکترود می‌تواند الکترود استاندارد هیدروژن (*SHE*)، الکترود کالومل اشباع (*SCE*) و یا الکترود مس/سولفات مس (*CSE*) باشد. مقدار پتانسیل در سیستم با واکنش خوردگی آزاد را پتانسیل خوردگی، پتانسیل مدار باز یا پتانسیل آزاد می‌نامند.

www.SID.ir

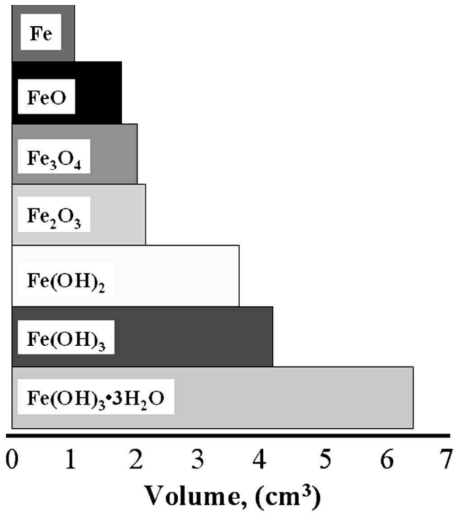
Archive of SID

سمت فولاد جذب شده و در نتیجه غلظت یون کلرید نسبت به نقاط کاتدی اطراف افزایش می‌یابد.



شکل ۱- دیاگرام ساده‌شده پوربه برای پایداری فازهای مختلف آهن در محلول‌های آبی

هیدروکسید ته‌نشین‌شده اولیه، حالت (عدد) اکسایش کمی دارد و تمایل بیشتری به واکنش با اکسیژن برای تشکیل اکسیدهای بالاتر دارد. گواه این ساز و کار را با شکستن بتن در حالت خوردگی فعال می‌توان مشاهده نمود؛ نزدیک فولاد اغلب محصول واکنش نیمه‌جامدی به رنگ سبز روشن مشاهده می‌گردد که در تماس با هوا سیاه‌رنگ شده و سپس به‌رنگ زنگ‌آهن در می‌آید. هیدروکسیدهای آهن حجم‌مخصوص بیشتری نسبت به فولاد اولیه دارند که در شکل ۲ مشاهده می‌گردد. در نتیجه، پیشرفت بیشتر واکنش‌ها منجر به افزایش حجم بیشتر می‌گردد و منجر به ایجاد تنش‌های داخلی در بتن شده و حتی ممکن است باعث ترک‌خوردگی و قلوه‌کن شدن پوشش بتنی گردد. عامل دیگری که در ساز و کار خوردگی در مقابل قلوه‌کن شدن معمولا نادیده گرفته می‌شود، افزایش خاصیت اسیدی در نواحی آندی می‌باشد که می‌تواند به حل‌شدن موضعی خمیر سیمان منتهی گردد [۱، ۲ و ۳].



www.SID.ir

Archive of SID

شکل ۲- نسبت احجام آهن و محصولات خوردگی

انتشار کلرید از محیط به داخل بتن سخت‌شده

انتشار کلرید می‌تواند از طریق ساختار حفرات مویینه خمیر سیمان به داخل بتن سالم انجام شود. بنابراین وجود ترک، شرط ورود کلرید به داخل بتن مسلح نمی‌باشد. سرعت انتشار به عواملی نظیر نسبت آب به مواد سیمانی، نوع سیمان، نوع کاتیون یون کلرید، دما و میزان بلوغ بتن بستگی دارد. علاوه بر آن، شواهدی وجود دارد که یون کلرید نفوذی، فعل و انفعالات شیمیایی با خمیر سیمان دارد و محصولات آن ته‌نشین شده و در نتیجه پوکی فاز خمیر کاهش می‌یابد.

تمام یون‌های کلرید موجود در بتن در خوردگی فولاد شرکت نمی‌کنند. بعضی از یون‌های کلرید با اجزای سیمان (نظیر آلومینات‌های کلسیم) واکنش شیمیایی داده و به‌طور موثر از محلول منفذی خارج می‌شوند. وقتی بتن کربناته شود، کلریدها آزاد شده و در خوردگی فولاد شرکت می‌کنند. تحقیقات نشان می‌دهد که بعضی یون‌های کلرید به‌صورت فیزیکی (به‌وسیله جذب سطحی یا در منافذ غیر مرتبط) نیز مقید می‌شوند. مقدار کلرید موجود در محلول منفذی برای شکستن لایه انفعالی روی فولاد، که درصدی از کلرید کل است، تابع عواملی مانند مقدار تری‌کلسیم آلومینات (C_3A) و تتراکلسیم آلومینوفریت (C_4AF)، pH، نسبت آب به سیمان و نوع کلرید (در ابتدا به مخلوط بتن اضافه شده یا بعدا به بتن سخت نفوذ کرده است) می‌باشد.

مقدار بحرانی غلظت کلرید که غلظت کمتر از آن منجر به خوردگی شدید نمی‌گردد نیز به چند پارامتر مشابه وابسته است اما گاهی اثر آن‌ها معکوس می‌باشد. به‌طور مثال، در pH بیشتر، مقدار کلرید بحرانی برای خوردگی حفره‌ای افزایش می‌یابد اما مقدار کلرید حاضر در محلول برای مقدار ثابت کلرید کل نیز افزایش می‌یابد. کمیته اروپایی بتن (CEB) مقدار کلرید بحرانی ۰/۴ درصد وزن سیمان (تقریبا ۱/۴ کیلوگرم بر مترمکعب) را پیشنهاد داده است که مقدار بیشتری نسبت به مقدار بحرانی کلرید محلول در اسید معمول در آمریکا (۰/۶ تا ۰/۹ کیلوگرم بر مترمکعب بتن) دارد.

بعضی محققان نشان داده‌اند که شروع خوردگی فولاد در بتن تنها به غلظت یون کلرید وابسته نیست بلکه به غلظت OH^- و به‌طور مشخص‌تر به نسبت یون کلرید به هیدروکسیل (Cl^-/OH^-) وابسته است. حداکثر مقدار Cl^-/OH^- قابل تحمل توسط لایه محافظ برای pH معادل ۱۲/۶ برابر ۰/۲۹ و برای pH معادل ۱۳/۳ برابر ۰/۳ به‌دست آمده است [۳].

خوردگی پس از آغاز

از بین رفتن حالت انفعالی موضعی یا کلی برای آغاز خوردگی فعال لازم است اما کافی نیست. برای پیشرفت خوردگی با سرعت زیاد، حضور رطوبت و اکسیژن ضروری می‌باشد.

از آن‌جا که عامل اصلی شروع خوردگی، کلریدها می‌باشند، اما در تعیین سرعت خوردگی پس از شروع آن، تنها نقش غیر مستقیم دارند. مهم‌ترین عوامل کنترل‌کننده سرعت خوردگی شامل وجود اکسیژن، مقاومت ویژه الکتریکی، رطوبت نسبی، پارامترهای وابسته به این عوامل، pH و دما می‌باشند. همان‌طور که ذکر شد، وجود یون کلرید می‌تواند بر pH، هدایت الکتریکی و پوکی اثر گذارد. به‌طور مشابه، کربناته‌شدن باعث از بین رفتن لایه انفعالی می‌گردد اما بر سرعت خوردگی بی‌تاثیر است. پس از شروع خوردگی، وجود بازدارنده‌های خوردگی می‌تواند سرعت خوردگی را کاهش دهد.

خشک‌شدن بتن سخت‌شده نیازمند انتقال آب به سطح و تبخیر آن می‌باشد. تر شدن بتن خشک به‌وسیله مکش مویینه اتفاق می‌افتد و به‌طور قابل توجهی سریع‌تر از خشک‌شدن می‌باشد. به‌همین دلیل به‌ندرت

www.SID.ir

Archive of SID

بتن کاملا خشک می‌شود و فقط لایه سطحی نازکی آن ممکن است کاملا خشک گردد. زیر این لایه خشک طبیعتا یک لایه رطوبت روی دیواره‌های مویینه وجود دارد و دهانه‌های منافذ نیز پر خواهد بود. از آن‌جا که انتشار اکسیژن محلول چهار مرتبه (10^4) کندتر از گاز اکسیژن می‌باشد، انتشار اکسیژن محلول در منافذ، کنترل‌کننده سرعت واکنش‌ها در بتن در رطوبت نسبی معمولی می‌باشد. مطالعات آزمایشگاهی نشان می‌دهد که یک مقدار بحرانی برای رطوبت نسبی داخل بتن در حدود ۷۰ تا ۸۵ درصد وجود دارد که در رطوبت نسبی کمتر از آن، خوردگی فعال اتفاق نمی‌افتد. به‌طور مشابه، مقاومت ویژه الکتریکی زیاد می‌تواند مانع عبور جریان خوردگی در بتن گردد. این امر در مورد خوردگی ماکروپیل که فاصله قابل‌توجهی بین محل واکنش‌های کاتدی و آندی وجود دارد، دارای اهمیت خاصی می‌باشد.

سازه‌های بتنی مغروق در آب به علت کمبود اکسیژن در برابر خوردگی محافظت می‌شوند. بنابراین به‌جز حالتی که سازه آلوده به غلظت زیاد کلرید باشد، سازه‌هایی که به‌طور مداوم در آب دریا مغروق هستند، در معرض خوردگی شدید قرار ندارند. قسمتی از سازه که در منطقه پاشش قرار دارد، شرایط شدیدی را تجربه می‌کند. این قسمت از سازه معمولا اشباع از آب و دارای غلظت زیاد نمک بوده و به‌قدر کافی نزدیک به بخش‌های در معرض است که به آسانی ماکروپیل در آن‌ها ایجاد می‌گردد. غلظت زیاد نمک به دلیل جذب مویینه آب شور و حرکت به سمت داخل (بالا) بتن و تبخیر از سطح و باقی‌ماندن نمک‌ها می‌باشد [۲ و ۳].

حفاظت سازه جدید در برابر خوردگی

اقداماتی که می‌توان برای حفاظت میلگرد در سازه بتنی در نظر گرفت، به سه دسته تقسیم می‌شود؛

الف) طراحی و روش اجرای صحیح برای ایجاد حداکثر ظرفیت حفاظت بتن: در این رابطه می‌توان به مواردی نظیر کاهش نفوذپذیری بتن در برابر یون کلرید، افزایش ضخامت بتن روی میلگرد، کاهش درز و ترک در پوشش بتنی روی میلگرد، انتخاب مناسب نوع میلگرد و شرایط سطحی آن، اعمال پوشش سطحی روی بتن، استفاده از پوشش حفاظتی روی میلگرد، توجه به مشخصات شرایط محیطی، رعایت حداکثر یون کلرید در بتن اولیه و مصالح مصرفی توصیه شده در آیین‌نامه‌های طراحی و تدابیر حفاظت کاتدی اشاره نمود. البته مهم‌ترین عامل، کاهش نفوذپذیری بتن در برابر عوامل مخرب می‌باشد که مستقیما به کیفیت انتخاب مصالح، و طراحی و اجرای مخلوط بتن وابسته می‌باشد.

ب) اعمال پوشش‌های نفوذگر یا سطحی بر سطح اعضای بتنی مسلح برای جلوگیری از ورود یون کلرید

ج) روش‌های مستقیم جلوگیری از خوردگی میلگرد فولادی (فولاد مقاوم در برابر خوردگی یا خنثی‌سازی اثرات کلرید بر میلگرد حفاظت‌نشده)

باز هم تاکید می‌گردد که با طراحی و اجرای صحیح و با کیفیت بتن (شامل در نظر گرفتن شرایط محیطی، انتخاب مصالح، طراحی نسبت اختلاط اجزای بتن، ساخت بتن، حمل و ریختن آن، تراکم و عمل‌آوری صحیح)، می‌توان حفاظت بسیار مناسبی در برابر خوردگی میلگرد در بتن ایجاد نمود و عمر مفید سازه را افزایش داد [۱، ۲ و ۳].

کاهش خوردگی و تعمیر سازه آسیب‌دیده

در ابتدا، برای تخمینی از کیفیت بتن و شرایط خوردگی میلگرد در آن نیاز به بررسی کیفیت و وضعیت سازه بتن مسلح می‌باشد. برای این کار با توجه به شرایط و نوع سازه و محیط اطراف، می‌توان از آزمایش‌های زیر بهره جست؛

www.SID.ir

Archive of SID

آزمایش جذب آب حجمی اولیه نیم‌ساعته یا بیشتر (کوتاه مدت) و نهایی ۲۴ساعته یا بیشتر (دراز مدت) بتن طبق *ASTM C۶۴۲*
آزمایش جذب آب سطحی اولیه (*ISAT*) بتن طبق *BS* ۱۸۸۱-۲۰۸
آزمایش جذب آب موئینه بتن طبق *ASTM C*۱۵۸۵
آزمایش مقاومت الکتریکی بتن
آزمایش نیم‌پیل (پتانسیل خوردگی) *ASTM C۸۷۶*
آزمایش پتانسیل و شدت خوردگی به روش گالوانی *ASTM G*۱۰۹
آزمایش درجه نفوذ یون کلر بتن *ASHTOO T*۲۵۹
آزمایش پروفیل یون کلر و ضریب انتشار طبق *ASTM C*۱۱۵۲, *C*۱۲۱۸, *C*۱۱۴
آزمایش شاخص الکتریکی توانایی بتن برای مقابله با نفوذ یون کلر *ASTM* ۱۲۰۲
آزمایش نفوذپذیری آب تحت فشار طبق *EN* ۱۲۳۹۰-۸
آزمایش نفوذپذیری هوا تحت فشار طبق *RILEM TC*-۱۱۶
آزمایش تعیین عمق نفوذ یون کلر در بتن
آزمایش شدت خوردگی به روش *GalvaPulse*

سپس اقداماتی که ممکن است برای کاهش خوردگی، موثر باشد به قرار زیر است؛

جداسازی سطح بتن از محیط خورنده (پوشش سطحی و روکش، اشباع‌سازی با پلیمر، استفاده از بتن پلیمری تعمیری، بتن حاوی دوده سیلیسی، بتن اصلاح‌شده با لاتکس)

بهبود محیط اطراف برای کاهش خورندگی آن (بهبود سیستم زهکشی، حذف اکسیژن از محیط آبی، حذف کلرید با روش الکتروشمیایی، نفوذ عمیق پلیمر، حذف جریان سرگردان (قطار برقی و کارخانه الکتروپلیتینگ))

کنترل واکنش‌های خوردگی فولاد (قرارگیری در منطقه ایمن نمودار پوربه (حفاظت کاتدی)، ایجاد آند و اتصال به میلگرد و اعمال ولتاژ ضعیف، آند جدید با فعالیت بیشتر (منیزیم، آلومینیوم، روی): آند گالوانیکی، و اعمال جریان الکتریکی)

در برخورد با سازه آسیب‌دیده معمولا چند گزینه پیش‌رو است که با توجه به شرایط موجود، از موارد زیر انتخاب می‌گردد [۱، ۲ و ۳].

رها کردن سازه
حذف بتن تخریب شده و آسیب‌دیده و تعمیر موضعی آن
حذف بتن حاوی کلرید و بتن کربناته‌شده و اجرای بتن جایگزین
حفاظت کاتدی
روش خروج الکتروشمیایی کلرید (*ECE*) از سطح میلگرد
روش قلیایی‌کردن مجدد برای بازگرداندن *pH* طبیعی بتن
اعمال بازدارنده‌های خوردگی به سطح و کاهش سرعت خوردگی

چند مثال از ارزیابی و تعمیر سازه‌های آسیب‌دیده توسط انستیتو مصالح ساختمانی دانشگاه تهران

در این قسمت، به معرفی چند سازه موجود در ناحیه خلیج فارس که عملیات ارزیابی آن توسط انستیتو

www.SID.ir

Archive of SID

مصالح ساختمانی دانشگاه تهران انجام شده است، پرداخته می‌شود [۴، ۵، ۶ و ۷].
برای ارزیابی یک سازه، ابتدا بازدیدها و ارزیابی‌های چشمی انجام می‌گیرد. این ارزیابی‌ها، منجر به تهیه نقشه محل خرابی‌ها و ترسیم الگوهای ترک می‌شود. سپس آزمایش‌هایی در دو دسته برای ارزیابی میزان خوردگی و پیشرفت آن، و ارزیابی کیفیت بتن سازه انجام می‌گردد. مهم‌ترین این آزمایش‌ها شامل آزمایش عمق کربناته‌شده بتن، تعیین پروفیل غلظت یون کلرید، تعیین مقاومت فشاری بتن، آزمایش جذب آب بتن، تعیین جرم‌مخصوص بتن، اندازه‌گیری مقاومت ویژه الکتریکی بتن، آزمایش پتانسیل نیم‌پیل و تعیین سرعت خوردگی میلگردها (روش *GalvaPulse*)، می‌باشد.

هتل آسیب‌دیده در جزیره کیش

این هتل در فاصله حدوده ۲۰۰ متری از دریا ساخته شده است و قدمتی در حدود ۳۵ سال دارد. به‌علت مشاهده خرابی‌های گسترده، این هتل یک بار در سال ۱۳۷۴ بازسازی شده است که به علت اصولی نبودن تعمیرات انجام شده، خرابی‌ها باز هم گسترش یافته است.

شکل ۳- نمای کلی هتل

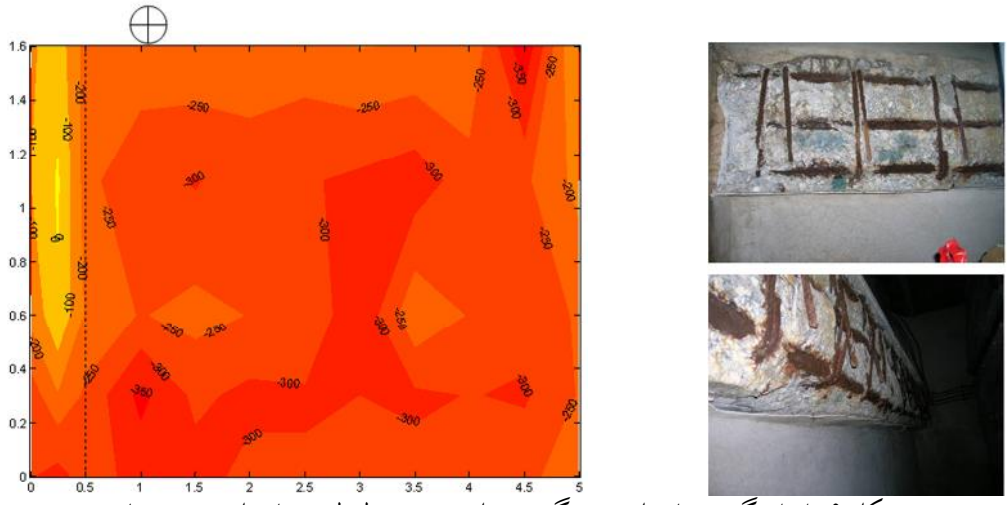
شکل ۴- ارزیابی چشمی دال سقف

نتایج حاصل از ارزیابی‌ها و آزمایش‌ها نشان می‌دهد که کیفیت مکانیکی بتن چندان مشکلی ندارد اما میزان یون کلرید اولیه در بتن نسبتا زیاد است که منجر به ایجاد اثرات نامطلوب بر نفوذپذیری (جذب آب زیاد بتن) و عملکرد نامناسب حفاظتی بتن در برابر خوردگی شده است. عمق کربناته‌شدن بتن در بیشترین حالت (طبقه همکف) هم هنوز با سطح میلگرد فاصله زیادی دارد.

www.SID.ir

Archive of SID

شکل ۵- ارزیابی چشمی سقف و ترک‌های موجود در تراس



شکل ۶- اندازه‌گیری پتانسیل خوردگی نیم‌پیل و رسم خطوط هم‌پتانسیل بر روی سازه

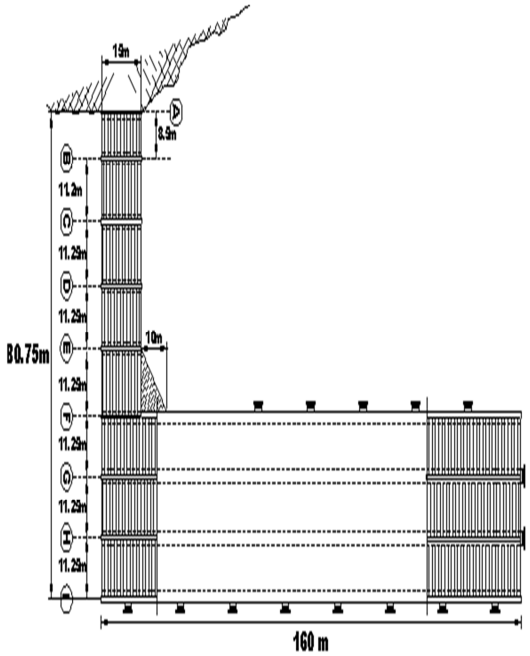
در داخل ساختمان به‌علت نبود رطوبت کافی، خوردگی مشاهده نشد. اما در سقف‌ها و بالکن‌ها به‌دلیل نشت آب تاسیسات و وجود آب باران و شستشوی بالکن‌ها، خوردگی مشاهده می‌گردد. در پی ساختمان هتل، علی‌رغم وجود رطوبت و غلظت کلرید زیاد، به‌علت نبود اکسیژن، خوردگی مشاهده نمی‌شود. قابل ذکر است که در گوشه نمای هتل، به‌علت انتشار یون کلرید از دو جهت، خوردگی تشدید شده است.

اسکله آسیب‌دیده در بندر امام خمینی

این اسکله در فاصله سال‌های ۱۳۵۴ تا ۱۳۵۵ در بندر امام خمینی احداث شده است و در سال‌های ۱۳۶۸ تا ۱۳۶۹ به‌طور کلی تعمیر گشته است. اجزای اصلی این اسکله شامل تیرهای اصلی، تیرهای پیش‌ساخته دال سقف و شمع‌های فلزی است.

www.SID.ir

Archive of SID



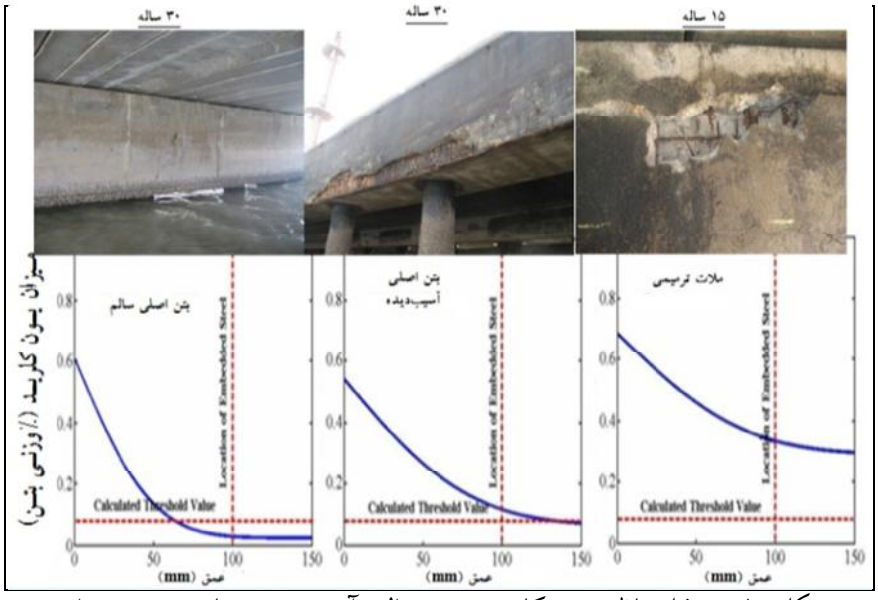
شکل ۷- شکل نمای کلی اسکله و ابعاد آن

شکل ۸- تیرهای اصلی سازه

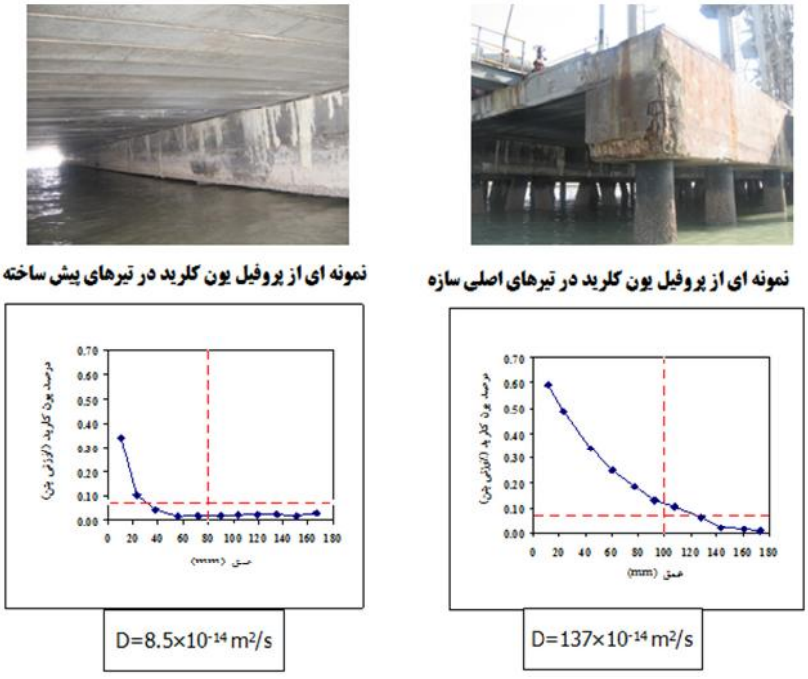
شکل ۹- تیرهای پیش‌ساخته سقف

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۱۰- پروفیل علظت یون کلرید در بتن سالم، آسیب‌دیده و ملات ترمیمی سازه



شکل ۱۱- پروفیل علظت یون کلرید در بتن تیرهای اصلی درجا اجرا شده و تیرهای پیش‌ساخته

نتایج حاصل از ارزیابی‌ها، آزمایش‌ها و مشخصات بتن اجرا شده نشان می‌دهد که کیفیت مکانیکی بتن‌ها چندان مناسب نیست و زیاد بودن نسبت آب به سیمان منجر به نفوذپذیری زیاد و عملکرد حفاظتی ضعیف بتن در برابر خوردگی شده است.

اجرای ملات ترمیمی ناسازگار با بتن سازه اصلی و کیفیت نامناسب آن، از عوامل ادامه تخریب و حتی تشدید آن پس از ترمیم سازه می‌باشد.

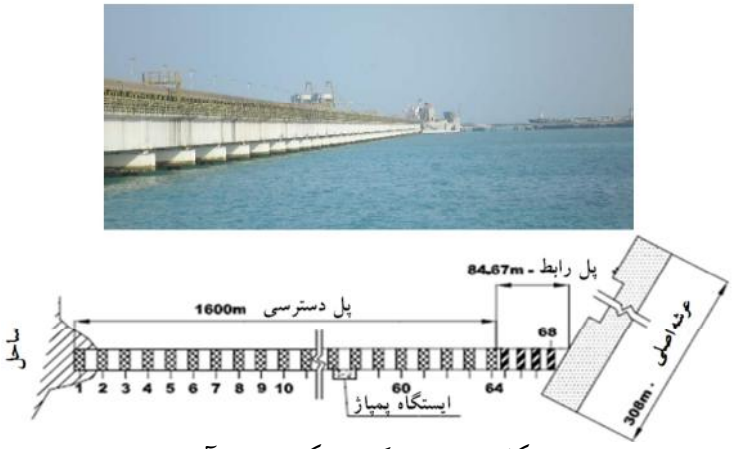
نکته قابل توجه در این سازه، عملکرد بسیار بهتر تیرهای پیش‌ساخته و تیرهای درجا اجرا شده می‌باشد، که نشان از تاثیر کیفیت و نحوه اجرا و تاثیر عمل‌آوری بهتر بر خواص و کیفیت بتن نهایی دارد.

www.SID.ir

Archive of SID

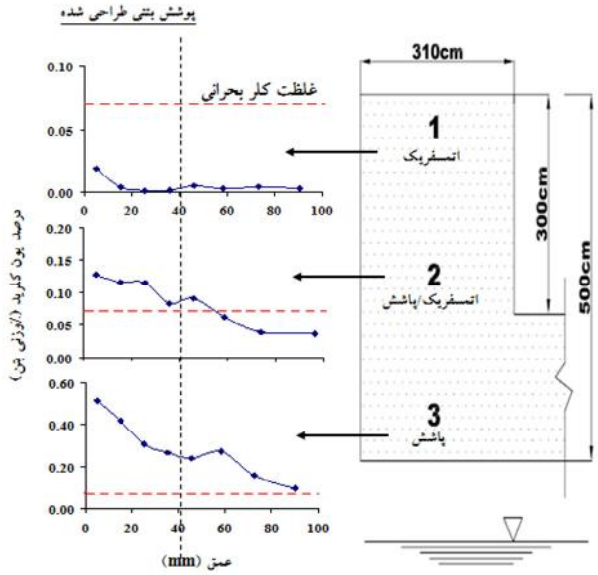
اسکله آسیب‌دیده در بندرعباس

این اسکله در فاصله سال‌های ۱۳۶۹ تا ۱۳۷۴ در بندرعباس احداث شده است. با وجود طراحی ویژه این اسکله، در سال ۱۳۷۷ علائمی از خرابی جدی ناشی از خوردگی در این سازه مشاهده شد و ترمیم آن از سال ۱۳۷۹ آغاز گشت.



شکل ۱۲- نمای کلی اسکله و ابعاد آن

شکل ۱۳- سازه عرشه اصلی اسکله

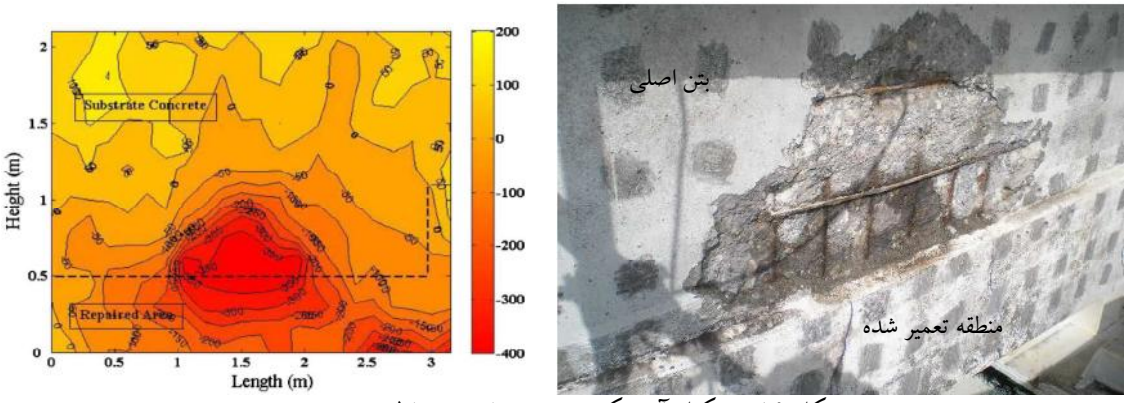


شکل ۱۴- پروفیل یون کلرید در نقاط مختلف رویارویی

www.SID.ir

Archive of SID

شکل ۱۵- آسیب‌دیدگی بتن ترمیمی



شکل ۱۶- تشکیل آند تکوینی در مجاورت مناطق ترمیم‌شده

عامل اصلی خرابی این سازه در اثر خوردگی میلگردها، پوشش بتنی ناکافی روی میلگردها هم در طراحی و هم هنگام اجرا می‌باشد.

اجرای بتن ترمیمی ناسازگار با بتن سازه اصلی (بتن با کیفیت بسیار بهتر از بتن اصلی)، منجر به ایجاد آند تکوینی در کنار ناحیه ترمیمی شده است و خرابی سازه را تشدید نموده است.

نکته قابل توجه در این سازه، اختلاف مشهود نفوذ یون کلرید در مناطق اتمسفر و ناحیه پاشش می‌باشد. در ناحیه پاشش به علت، تر شدن مداوم و خشک شدن در اثر باد و تابش آفتاب، غلظت یون در بتن بسیار افزایش می‌یابد.

تحقیقات انجام شده برای مطالعه پدیده خوردگی در سازه‌های بتن مسلح در محیط خلیج فارس

در تمامی موارد مذکور و همچنین در سازه‌های دیگر، هم در مرحله طراحی، هم در مرحله اجرا و حتی در مرحله بهره‌برداری و نگهداری سازه، فقدان و یا کمبود دانش خوردگی به‌وضوح مشاهده می‌گردد.

به‌همین منظور، انستیتو مصالح ساختمانی دانشگاه تهران، از بدو تاسیس در اوائل دهه ۱۳۸۰، فعالیت اصلی خود را متمرکز بر بحث دوام و به‌ویژه مبحث خوردگی میلگرد در بتن قرار داده است. به‌علت پیچیدگی این موضوع و تاثیر عوامل متعدد بر پدیده خوردگی و خصوصا خوردگی میلگرد در بتن، تحقیقات در این زمینه علاوه بر مباحث پیچیده علمی، مشکلات خاص خود از قبیل زمان‌بر و پرهزینه بودن را داراست.

همانطور که بیان شد، خرابی ناشی از خوردگی در سازه بتنی مسلح را می‌توان به سه مرحله تقسیم‌بندی کرد؛ مرحله نفوذ یون کلرید و کربناته‌شدن بتن تا آغاز خوردگی، مرحله توسعه و گسترش خوردگی

www.SID.ir

Archive of SID

میلگرد و مرحله ایجاد ترک ناشی از انبساط محصولات خوردگی در بتن تا قلوه‌کن شدن بتن سطح.
انستیتو مصالح ساختمانی دانشگاه تهران برای مطالعه رفتار بتن در شرایط حاد خلیج فارس، در سال ۱۳۸۲ شمسی با حمایت سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی، اقدام به تاسیس سایت تحقیقاتی در بندرعباس نمود. هدف از احداث این سایت تحقیقاتی، مطالعه انواع بتن (نسبت آب به سیمان مختلف ۰/۳۵ تا ۰/۵) و استفاده از دوده سیلیسی با درصد جایگزینی مختلف (۰ تا ۱۲/۵ درصد) و عملکرد بتن در نواحی مختلف رویارویی (خاک، اتمسفر، مغروق، جزر و مد و پاشش) و اثر این عوامل بر نفوذ یون کلرید در بتن در طول زمان بود. اندازه‌گیری‌ها تا سن ۷ سال نیز انجام شده است.
پس از احداث سایت تحقیقاتی بندرعباس و نتایج ارزشمند آن، در سال ۱۳۸۶، انستیتو مصالح ساختمانی دانشگاه تهران، با حمایت منطقه آزاد قشم اقدام به احداث سایت تحقیقاتی دیگر در بندر کاوه جزیره قشم نمود. هدف از احداث این سایت تحقیقاتی، مطالعه رفتار انواع بتن انواع بتن (نسبت آب به سیمان مختلف ۰/۳۵ تا ۰/۵) و استفاده از پوزولان‌های مختلف (دوده سیلیسی، متاکائولن و زئولیت) با درصد جایگزینی‌های مختلف (۰ تا ۱۰ درصد برای دوده سیلیسی، ۰ تا ۱۵ درصد برای متاکائولن و ۰ تا ۳۰ درصد برای زئولیت) و عملکرد بتن در نواحی مختلف رویارویی (خاک، اتمسفر، جزر و مد و پاشش) و اثر این عوامل بر نفوذ یون کلرید در بتن در طول زمان و همچنین مطالعه خوردگی و پارامترهای مرتبط میلگرد در بتن بود. برای مطالعه خوردگی در این سایت تحقیقاتی، آزمایش‌های پتانسیل نیم‌پیل، جریان ماکروپیل، مقاومت ویژه الکتریکی بتن و سرعت خوردگی (به روش *GalvaPulse*) در فواصل زمانی مشخص انجام می‌گیرد. اندازه‌گیری‌ها هم اکنون تا سن ۵ سال نیز انجام شده است.

شکل ۱۷- به‌ترتیب از بالا به پایین: نواحی اتمسفر و خاک، پاشش، جزر و مد

www.SID.ir

Archive of SID

نتایج حاصل از این دو سایت تحقیقاتی منجر به ایجاد دو نرم‌افزار محاسبه زمان شروع خوردگی با قابلیت محاسبه احتمالاتی زمان شروع خوردگی به نام‌های *DuraPGulf* و *DuraQeshm* می‌باشد. این نرم‌افزارها با دریافت مشخصات اولیه بتن، شرایط دمایی و رطوبتی محیط، خصوصیات هندسی قطعه بتنی مسلح و همچنین شرایط رویارویی سازه، زمان شروع خوردگی قطعه بتنی مسلح را در شرایط تعریف شده هم به روش قطعی و هم به روش احتمالاتی ارائه می‌کنند [۸].

شکل ۱۸- محیط نرم‌افزارهای *DuraPGulf* و *DuraQeshm*

قابل ذکر است که تحقیقات مشابهی در حاشیه خلیج فارس توسط مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی و دانشگاه صنعتی امیرکبیر نیز در حال انجام می‌باشد

جمع‌بندی

- به‌علت هزینه سرسام‌آور خوردگی در سازه‌های بتن مسلح به‌ویژه در منطقه خلیج فارس، و همچنین برای پیش‌بینی عمر مفید سازه بتنی، تحقیقات گسترده‌ای در مورد پدیده خوردگی باید انجام گیرد.
- اصلی‌ترین عوامل ایجاد خوردگی میلگرد در بتن، پدیده‌های انتقال یون کلرید در بتن و کربناته‌شدن بتن می‌باشد.
- پس از ایجاد شرایط شروع خوردگی، برای توسعه آن نیاز به حضور همزمان رطوبت و اکسیژن در محل میلگرد مستعد خوردگی می‌باشد.

www.SID.ir

Archive of SID

- مهم‌ترین عامل حفاظت سازه‌های بتی در برابر خوردگی میلگرد، استفاده از پوشش بتنی با کیفیت مناسب روی میلگرد با طراحی صحیح ضخامت پوشش، ارائه طرح مخلوط مناسب برای بتن، استفاده از مصالح با کیفیت برای ساخت آن، اجرای صحیح بتن، و عمل‌آوری و نگهداری مناسب آن می‌باشد.
- قطعات و سازه‌هایی که در معرض نفوذ یون کلرید، رطوبت و اکسیژن از چند جهت هستند (همانند لبه سازه‌ها) پدیده خوردگی تشدید می‌گردد.
- هنگام تعمیر و ترمیم سازه‌ها دقت گردد که بتن جدید تا جای ممکن مشابه با بتن اولیه باشد تا علاوه بر سازگاری مکانیکی، منجر به ایجاد آند تکوینی نگردد و خوردگی را تشدید نکند.
- نواحی مختلف رویارویی می‌تواند اثرات گسترده‌ای بر عوامل ایجاد خوردگی (میزان نفوذ یون کلرید، اکسیژن و رطوبت) داشته باشد. بنابراین هنگام طراحی سازه و ارائه طرح اختلاط، حتما به ناحیه قرارگیری سازه توجه کافی صورت گیرد.
- شرایط حاد دمایی و غلظت زیاد املاح در محیط خلیج فارس، و همچنین تعدد سازه‌های بتنی مسلح و حتی فولادی در حواشی خلیج فارس، این منطقه را به یک کارگاه عظیم تخصصی خوردگی تبدیل نموده است.
- با کسب تجربیات حاصل از خرابی‌های سازه‌های موجود و درس گرفتن از آنها، گذشته را چراغ راه آینده قرار داده تا خسارات گسترده ناشی از خوردگی کاهش یابد.

تشکر و قدردانی

از زحمات همه افرادی که از بیش از ده سال پیش در پروژه‌های مختلف، موضوع دوام سازه‌های بتنی را در انستیتو مصالح ساختمانی مطالعه کرده‌اند همچنین مدیران سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی سابق و سازمان منطقه آزاد قشم که امکانات ایجاد سایت تحقیقاتی را در بندرعباس و جزیره قشم برای انستیتو مصالح ساختمانی دانشکده فنی فراهم آورده اند تشکر و سپاسگزاری می‌شود.

منابع و مراجع

۱- Neville, A.M. (۲۰۰۲), "Properties of Concrete", Pearson Publishing, ۴th edition, London, UK.

۲- Mehta, P.K., Monteiro, P.J.M. (۲۰۰۶), "Concrete: Microstructure, Properties, and Materials", McGraw-Hill, ۳rd edition, US.

۳- ACI Committee ۲۲۲ (۲۰۱۰), "ACI ۲۲۲R-۰۱: Protection of Metals in Concrete Against Corrosion", American Concrete Institute, US.

۴- Moradi, F., Shekarchi, M., Dousti, A., Mobasher, B. (۲۰۱۰), "Investigation of corrosion damage and repair system in a concrete jetty", Structure Journal of Performance of Constructed Facilities, ASCE, ۲۴(۴), ۲۹۴-۳۰۱.

۵- Shekarchi, M., Moradi Marani, F., Pargar, F. (۲۰۱۱), "Corrosion damage of a reinforced concrete jetty structure in the Persian Gulf: a case study", Structure and Infrastructure Engineering, ۷(۹), ۷۰۱-۷۱۳.

www.SID.ir

Archive of SID

۶- Moradian, M., Shekarchi, M., Aabdollah, M., Alidadi, R. (۲۰۱۲) "Assessment of Long Term Performance of a ۵۰ Year Old Jetty in South of Iran", J. of Performance of Constructed Facilities, ASCE, ۲۶(۵), ۶۳۳-۶۴۳.

۷- Dousti, A., Moradian, M., Taheri, S. R., Rashetnia, R. and Shekarchi M. (۲۰۱۲), "Corrosion assessment of reinforced concrete deck in a jetty structure damaged by chloride attack", J. of Performance of Constructed Facilities, ASCE.

۸- Shekarchi, M., Alizadeh, R., Ghods, P., Chini, M., and Hosseini, M. (۲۰۰۸), "DuraPGulf, a local service life model for the durability of concrete structures in the south of Iran", AJSE, The Arabian Journal for Science and Engineering, Saudi Arabic, ۳۳(۱B), ۷۷-۸۸.

www.SID.ir