

اهمیت یون کلر در تخریب بتن مسلح

امیر محمدی^۱، کیومرث ابراهیمی^{۲*}، عاطفه پرورش‌ریزی^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۲- دانشیار، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۳- استادیار، دانشگاه تهران، تهران، ایران

چکیده

یکی از مهمترین عوامل کاهش دهنده عمر سازه‌های بتن آرمه، خوردگی میلگردهای مسلح کننده آن است. بررسی نقش یون کلرید در تخریب بتن مسلح در کنار حفاظت همه جانبه از میلگردهای کار گذاشته شده در آن از اهداف اصلی مقاله حاضر است. خوردگی از یک سو با کاستن از سطح مقطع مفید میلگرد، منجر به کاهش مقاومت کششی شده و از سوی دیگر با تشکیل محصولات خوردگی در اطراف میلگرد، باعث افزایش حجم فولاد و ایجاد تنش‌های گسترده می‌شود. ترک خوردگی و پوسته شدن پوشش بتن نتیجه نهایی این فرآیند است. نفوذ پذیری بتن به واسطه حفرات و لوله‌های موئینه موجود در آن است. مواد مضر به ویژه یون کلرید برای رسیدن به میلگردها باید از پوشش بتنی روی آن بگذرد. محصولاتی نظیر سرباره کوره، خاکستر بادی و میکروسیلیس با کاهش نفوذپذیری نقش اساسی در بهبود ساختار بتن دارد. در مکان‌هایی که بتن در معرض تر و خشک شدن متوالی است کلریدها به تدریج به سمت میلگردهای داخل بتن مسلح رسوخ کرده و آنها را تحت تاثیر قرار می‌دهند. باید توجه داشت که همه کلریدها منجر به خوردگی و تخریب فولاد نمی‌شوند. برخی از کلریدها دارای محدودیت شیمیایی و برخی دارای محدودیت فیزیکی هستند. باقی کلریدها که کلریدهای آزاد نام دارند توانایی برقراری واکنش تهاجمی به فولاد را دارند. با این حال خوردگی نیاز به سه عنصر رطوبت، اکسیژن و یون کلر را دارد و وجود هر کدام به تنهایی نمی‌تواند خوردگی در میلگرد بتن به وجود آورد. از روش‌های متداول برای ارزیابی سریع نفوذپذیری بتن در برابر یون کلر روش $RCPT$ و $RCMT$ است که با ثبت میزان کلرید عبوری از نمونه بتن، به ارزیابی نفوذپذیری نمونه می‌پردازد.

کلمات کلیدی: پایداری، خوردگی، میلگرد، سیمان، کلرید

۱- مقدمه

بتن یک ماده متخلخل، ناهمگون و منحصر به فرد است. تنوع کاربرد، هزینه نسبتاً پایین، مقاومت بالا و دسترسی آسان به مواد خام برای تهیه بتن مسلح سبب شده که یکی از رایج‌ترین و پرکاربردترین مصالح در ساخت و سازه‌های انسان باشد. کلرید یکی از عوامل تاثیرگذار محیطی در تخریب بتن مسلح و خوردگی میلگرد به کار رفته در آن است که ممکن است منجر به کاهش مقاومت، کارایی و زیبایی سازه شود. تجمع

* نویسنده مسئول: کیومرث ابراهیمی، ebrahimik@ut.ac.ir

محصولات ناشی از خوردگی فولاد (اکسیدها و هیدروکسیدها) در مجاورت میلگرد سبب خواهد شد که بتن پوسته پوسته شده و ترک‌های ریزی در آن پدیدار شود که به نوبه خود باعث تسهیل نفوذ مجدد رطوبت، اکسیژن و کلرید به میلگردهای جاسازی شده در بتن خواهد شد و فرآیند تخریب میلگرد را سرعت می‌بخشد [۱].

خوردگی ناشی از کلرید در بتن مسلح بیش از چند دهه تحت شرایط صحرا و آزمایشگاه مورد بررسی قرار گرفته است [۸]. تخریب بتن زمانی حاد می‌شود که منبعی از کلرید وارد آن شود. نمک‌های یخ‌زدا و آب دریا از منابع اصلی کلریدها هستند. کلریدها همچنین می‌توانند در سواحل دریا از طریق قطرات ریز آب (در اثر تلاطم آب و انتقال آن به وسیله باد) به سمت ساحل حرکت کنند و بر روی بتن بنشینند و یا همین قطرات ریز با ذرات گرد غبار ترکیب شده و به شکل شبنم مرطوب در دوردست با بتن تماس پیدا کنند. یکی دیگر از منابع کلرید آب‌های زیرزمینی شور است که به سطح زمین راه پیدا کرده‌اند و با سازه‌های بتنی در تماس هستند. یون‌های کلرید فقط در آب وجود دارند از این جهت نفوذ کلرید مشروط به حضور آب در سیستم منفذی بتن می‌باشد. مکانیسم ورود یون کلرید به داخل بتن یا از طریق سیستم مکنده موئینه است که آب آلوده به کلر وارد بتن می‌شود، یا از طریق نفوذ ساده یون‌ها، وارد منافذ بتن می‌شود. حالت اول مختص بتن‌های خشک بوده که در آن آب وسیله‌ای جهت تسهیل حمل یون‌ها به داخل بتن است. حالت دوم مختص بتن اشباع شده یا نزدیک به اشباع است. در محیط‌های مملو از کلرید که بتن مکرراً در معرض تر و خشک شدن است هر دو مکانیسم اجرا شده و به بتن صدمات جدی وارد می‌شود. یکی از راه‌کارهای پیشگیری و کاهش این آسیب‌ها افزودن موادی نظیر: سرباره، خاکستر بادی و میکروسیلیس به ترکیب ملات بتن است که با کند کردن نفوذ کلرید به بتن باعث تاخیر در شروع خوردگی و افزایش عمر سازه می‌شود [۳].

محققین فرآیند نفوذ کلرید به داخل بتن را بسیار پیچیده ارزیابی می‌کنند که در ادامه به برخی از دلایل آن اشاره شده است:

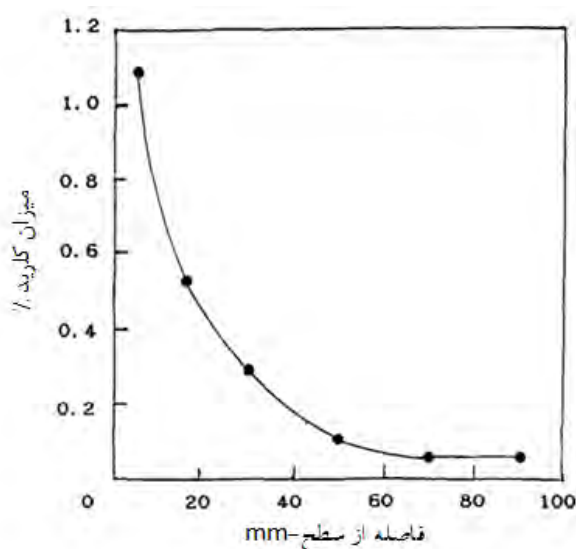
- ۱- اثر گذاری شرایط محیطی نظیر دما، رطوبت نسبی، میزان آستانه کلرید.
 - ۲- وابستگی فرآیند تخریب به پارامترهایی نظیر سطح هیدراتاسیون بتن، تخلخل، نوع ماده چسباننده.
 - ۳- پیچیدگی فعل و انفعالات صورت گرفته بین فرآیندهای فیزیکی و شیمیایی [۲].
- هدف اصلی مقاله حاضر ارائه اهمیت و نقش یون کلرید در تخریب بتن مسلح بر مبنای یک مرور منابع جامع و وسیع است.

۲- مکانیسم ورود یون کلرید به بتن

آب حاوی یون کلرید باعث جذب، انتشار و نفوذ کلر به داخل بتن می‌شود. هنگامی که بتن دائماً مستغرق است، کلریدها به میزان قابل توجهی در بتن نفوذ می‌کنند اما در غیاب اکسیژن، خوردگی صورت نمی‌گیرد. در مکان‌هایی که بتن در معرض تر و خشک شدن متوالی قرار دارد، کلریدها با روند رو به رشدی به داخل بتن نفوذ می‌کنند. بتن خشک آب شور را به خود جذب می‌کند و گاهی این عمل تا اشباع شدن کامل بتن ادامه پیدا می‌کند. همزمان با خشک شدن بتن جهت حرکت آب معکوس شده و آب از انتهای لوله‌های موئین تبخیر و به هوای محیط باز می‌گردد. نتیجه این فعل انفعالات تبخیر آب خالص و افزایش غلظت کلرید در آب باقی مانده در سطح بتن است. میزان تجمع نمک محلول در نزدیکی سطح بتن به مراتب بیشتر از داخل آن است. با توجه به رطوبت نسبی خارجی و طول دوره زمانی خشک شدن، ممکن است بخش زیادی از آب سطح بتن تبخیر شود به طوری که آب باقی مانده در داخل بتن اشباع شده و نمک اضافی به شکل بلوری رسوب کند. به این ترتیب مشاهده می‌شود که آب به خارج و نمک به سمت داخل بتن حرکت می‌کند [۳].

در چرخه بعدی که بتن مجدداً با آب حاوی یون کلرید تماس پیدا می‌کند، نمک‌های محلول بیشتری از خلل و فرج موئینه به داخل بتن نفوذ می‌کند. میزان دقیق حرکت نمک در بتن به طول دوره تر و خشک شدن بستگی دارد. باید به خاطر داشت که فرآیند خیس شدن به سرعت صورت می‌پذیرد حال آنکه خشک شدن مستلزم صرف زمان بسیار بیشتری است و حتی گاهی بخش‌های داخلی بتن هرگز خشک نمی‌شوند. همچنین باید توجه داشت که انتشار یون‌ها در طول دوره‌های مرطوب بودن به نسبت آهسته‌تر است.

نمودار غلظت کلرید در برابر فاصله از سطح در شکل (۱) به نمایش در آمده است. این نمودار به وسیله آنالیز گرد نمونه حاصل از حفر سوراخ‌های متعدد در اعماق مختلف بتن است. گاهی اوقات در نزدیکی عمق ۵ میلیمتری از سطح بتن غلظت کلریدها کمتر می‌شود. چرا که حرکت سریع آب باعث می‌شود نمک‌ها به سرعت به داخل بتن نفوذ کنند. این یک واقعیت مهم است که با گذشت زمان مقدار کافی از یون کلرید به سطح فولاد کار گذاشته شده در بتن مسلح می‌رسد [۳]. آنچه که به منزله یک مقدار کافی خواهد بود در بخش بعد توضیح داده شده است.



شکل ۱: نمودار میزان یون کلرید در مقابل فاصله از سطح یک نمونه توده بتن [۳].

تاکنون به نقش مهم تر و خشک شدن متوالی بتن در نفوذ کلریدها اشاره کردیم. این توالی از محلی به محل دیگر می‌تواند متفاوت باشد و به عواملی مثل نوسان‌های آب دریا، وزش باد، قرار گرفتن در معرض تابش خورشید، مواد مورد استفاده در ساخت سازه‌ها و مشخصات هر منبع حاوی کلرید وابسته است. بنابراین حتی قطعات مختلف با ساختار مشابه نیز، ممکن است یک الگوی متفاوت در تر و خشک شدن داشته باشند. همین نکته باعث می‌شود درک اینکه چرا گاهی از اوقات در میزان آسیب خوردگی تنوع قابل توجهی وجود دارد برای ما آسان‌تر شود [۳].

۳- شروع خوردگی و مقادیر آستانه یون کلرید

پیش از این گفته شد برای آغاز خوردگی به یک حداقل غلظت معین از یون کلرید در سطح فولاد نیاز است. پیرامون مقادیر آستانه کلریدها که باعث آغاز خوردگی فولاد در داخل بتن می‌شود مطالعاتی صورت گرفته است. در رابطه با مقدار آستانه کلرید (C_{th}^1) دو تعریف از دو دیدگاه

¹ chloride threshold

مختلف وجود دارد. در تعریف اول که از نقطه نظر علمی به موضوع می‌نگرد مقدار آستانه کلرید برابر است با مقدار کلرید مورد نیاز برای فعالسازی فولاد جهت تخریب در صورتی که از دیدگاه مهندسی (C_{th}) به میزانی از کلرید گفته می‌شود که باعث تخریب قابل قبول و رویت پذیر فولاد می‌شود [۹].

مقدار آستانه کلرید و شروع خوردگی به عواملی نظیر: pH محلول رابط بتن و فولاد، پتانسیل (خوردگی) فولاد، نوع بتن، وضعیت سطحی فولاد، میزان رطوبت، در دسترس بودن اکسیژن، نسبت آب به سیمان، مقاومت، درجه هیدراتاسیون، نوع فولاد، دما، منبع کلریدها، کاتیون همراه یون کلرید، بازدارنده‌ها و واکنش‌های الکتروشیمیایی وابسته است [۴].

۴- اثر ترکیب سیمان در خوردگی

ترکیب سیمان از موارد مهمی است که نقش به‌سزایی در پیشگیری از ورود عناصر مخرب به داخل بتن را دارد. ترکیب ملات بتن، در ساختار منافذ آن تاثیر گذاشته و به تبع آن مقاومت به نفوذ آن نیز تغییر می‌کند. در ادامه جنبه‌هایی از مواد مختلف سیمانی که بر روی حرکت یون کلرید اثر می‌گذارد، بررسی می‌شود. البته ذکر این نکته نیز ضروری است که علاوه بر خصوصیات خمیر سیمان نباید تاثیر دسترسی به اکسیژن و رطوبت کافی برای وقوع پدیده خوردگی را نادیده گرفت.

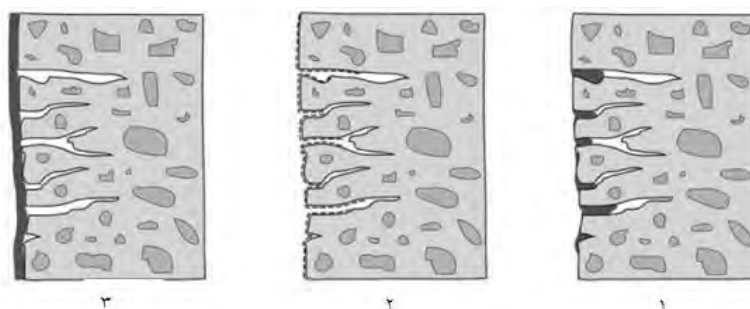
همزمان با گسترش مصرف فولاد در سازه‌های آبی میزان مصرف محصولات فرعی نظیر سرباره کوره در ترکیب بتن افزایش پیدا کرده است [۱۰]. از دیگر مصالح افزودنی پرکاربرد در ترکیب بتن مسلح می‌توان به خاکستر بادی اشاره کرد. تاکنون محققین زیادی نقش خاکستر بادی را در کاهش نفوذپذیری بتن مورد مطالعه قرار داده‌اند [۱۱-۱۳].

۵- نقش میکروسیلیس‌ها در بهبود ساختار بتن و افزایش مقاومت آن در برابر نفوذ

میکروسیلیس که به شکل پودر یا ژل به بتن اضافه می‌شود وظیفه اصلاح مشخصه‌های فیزیکی بتن جهت استفاده در شرایط خاص محیطی را بر عهده دارد. میکروسیلیس را می‌توان یک پوزولان دانست. پوزولان‌ها که به هر دو شکل طبیعی و مصنوعی یافت می‌شوند، نوع خاصی از خاکستر آتشفشانی‌اند که به تنهایی خاصیت چسبندگی نداشته و در صورت اختلاط با سیمان کارایی دارد. میکروسیلیس‌ها علاوه بر افزایش مقاومت و ماندگاری بتن، باعث کاهش نفوذ یون‌های کلر نیز می‌شوند که منجر به کاهش خوردگی میلگردها خواهد شد. شیوه محافظت میکروسیلیس‌ها به این شکل است که با افزایش تراکم بتن، خلل و فرج و منافذ موئین موجود در سطح بتن را به حداقل می‌رساند و در پی آن راه برای نفوذ عناصر مخرب می‌بندد. تحقیقات صورت گرفته توسط Bleszynski و همکاران در سال (۲۰۰۲) نشان داد که بتن حاوی ۲۵٪ سرباره و ۳٫۸٪ میکروسیلیس پس از هشت سال قرار گرفتن در محیط‌های کلریدی در مقایسه با بتن شاهد نفوذ عمقی کمتری دارد. همچنین ضریب نفوذ کلرید در بتن مرکب رقم کمتری را نسبت به بتن معمولی نشان می‌دهد [۱۴]. اثرات افزودنی‌های مختلف به سیمان آنقدر قابل توجه است که در بعضی مناطق که بتن در معرض خوردگی قرار دارد، سیمان پرتلند نباید به تنهایی مورد استفاده قرار بگیرد و استفاده از افزودنی‌ها ضروری است.

۶- نقش پوشش مناسب در افزایش مقاومت بتن در برابر نفوذ

یکی از عوامل کنترل نفوذ کلریدها به داخل بتن استفاده از پوشش با ضخامت مناسب است. کیفیت بتن (از نظر مقاومت به نفوذ) و ضخامت پوشش متأثر از یکدیگرند به طوری که اگر بتن مقاومت به نفوذ بالایی داشته باشد می‌توان از لایه پوشش دهنده نازک‌تری استفاده کرد. به همین دلیل اغلب استانداردها ضخامت پوشش را بر اساس مقاومت به نفوذ بتن تعیین می‌کنند. با این حال استفاده از پوشش دهنده‌ها با محدودیت‌هایی نیز مواجه است. برای مثال اگر بتن نفوذپذیری بسیار بالایی داشته باشد، عملاً پوشش دهنده‌ها با وجود ضخامت بالا نیز کارایی نخواهند داشت. علاوه بر این، وظیفه پوشش‌ها نه تنها حفاظت از آرماتور در برابر نفوذ عوامل مخرب است بلکه وظیفه حفاظت از بتن در برابر سایش و آتش‌سوزی را نیز بر عهده دارند [۳]. یکی از راه‌های مطمئن و کلیدی برای افزایش عمر بتن در محیط‌های کلریدی استفاده از حفاظت سطحی است. مواد محافظ سطحی را می‌توان در سه گروه زیر جای داد.



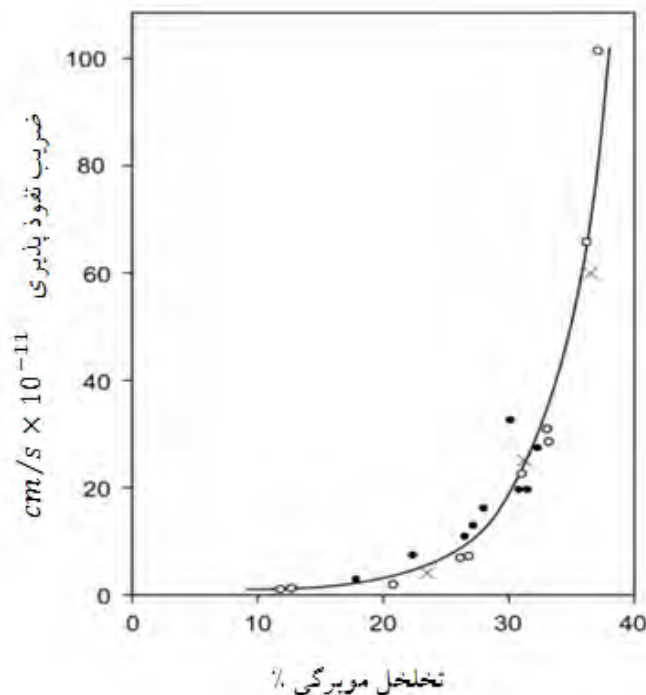
شکل ۳: روش‌های حفاظت سطحی - (۱) مسدود کننده منافذ (۲) پوشش دهنده منافذ (۳) روکش فیزیکی [۱۵].

استفاده از روکش و بتونه به عنوان یک مانع فیزیکی در برابر عوامل مهاجم خارجی بسیار کاربردی است. این پوشش‌ها نیاز به بستر صاف و همگن دارد و برای منافذ عرض کمتر از ۰,۱ میلیمتر توصیه می‌شود [۱۶]. پوشش دهنده منافذ با ایجاد یک لایه محافظ در ترک‌های بتن از ورود عوامل مخرب ممانعت به عمل می‌آورد. در ترکیب بتن گاهی از سیلیکات سدیم جهت مسدود نمودن منافذ استفاده می‌شود. یکی از راه‌های متراکم نمودن طبقات سطحی بتن استفاده از الیاف‌های گیاهی است [۱۷].

۷- دوام (ماندگاری) فولاد بتن مسلح در محیط کلریدی

اندازه‌گیری نفوذ کلرید به بتن:

عوامل خورنده در هر دو فاز مایع و گاز ممکن است از طریق جذب مویرگی، فشار هیدرواستاتیک و یا انتشار به داخل بتن نفوذ کنند. گازها و یون‌های محلول در آب عمدتاً از طریق خلل و فرج بتن، فواصل اتصال دانه‌ها و ترک‌های ریز به داخل بتن نفوذ می‌کنند. در تعیین دوام بتن اعتقاد بر این است که نفوذ به عوامل ساختاری مهمی از جمله اندازه، نحوه توزیع و شکل اتصال منافذ بستگی دارد. در شکل (۲) ارتباط بین نفوذپذیری آب و درز مویرگی نشان داده شده است. در این شکل نمادهای متفاوت نمایانگر گونه‌های خاصی از ترکیب بتن است و با افزایش درز و ترک‌های ریز میزان نفوذ آب و دیگر عناصر مخرب افزایش می‌یابد.



شکل ۲: رابطه بین درز مویرگی و نفوذپذیری آب [۱۸]

نفوذ کلرید به بتن به عنوان یک ویژگی ذاتی از بتن به رسمیت شناخته می‌شود. تحقیقات اخیر نشان داده بین نفوذ کلریدها در بتن و خلل و فرج ریز آن و همین طور ترکیب شیمیایی بتن، رابطه برقرار است. ورود کلریدها به بتن و سایر مواد سیمانی یک پدیده پیچیده بوده که دارای مکانیسم‌های متعددی است. در این رابطه طیف وسیعی از آزمون‌ها برای ارزیابی مقاومت نفوذ یون کلرید به بتن توسط Stanish و همکاران (۱۹۹۷) انجام گرفت [۵].

برای تعیین ضریب انتشار کلرید در بتن دو نوع آزمایش نفوذ طبیعی وجود دارد.

۱. آزمایش نفوذ حالت پایدار: در این روش برای جدا کردن محلول کلرید از محلول آزاد از یک نمونه بتن استفاده شده است. اندازه‌گیری دوره‌ای یون کلرید تا زمان رسیدن به شرایط حالت پایدار ادامه خواهد داشت.
۲. آزمایش نفوذ حالت ناپایدار: این روش شامل غوطه‌ور سازی نمونه‌های بتنی در یک زمان معین و اندازه‌گیری عمق نفوذ یون کلرید است. این آزمون با ASTM¹ C 1543 , AASHTO T 259 [۱۹] استاندارد سازی شده است. این آزمون شامل تجزیه و تحلیل دشوار محتوای کلرید در عمق‌های مختلف نمونه بعد از ۹۰ روز از غرق‌سازی است [۱].

تست نفوذ طبیعی بر اساس استانداردهای ASTM بسیار زمان‌بر هستند به ویژه برای اندازه‌گیری نفوذ کلرید در مخلوط بتن با کیفیت بالا. این آزمون نفوذ حداقل ۳-۱ سال پس از قرار گرفتن نمونه در شرایط آب و هوایی شبیه سازی شده به نتیجه می‌رسد [۶].

یکی از راه‌های افزایش سرعت نفوذ کلرید به بتن، انجام دادن آزمایش در حالت تحت فشار است. تاکنون تحقیقات زیادی در رابطه با نفوذ محلول کلرید به بتن در شرایط تحت فشار صورت نگرفته است. در شرایط تحت فشار کلریدها به هر دو شکل همرفت و نفوذ طبیعی به

¹American Society for Testing Materials

داخل بتن رانده می‌شوند [۷]. به این شکل از انتقال یون کلرید، همرفت اجباری نیز گفته می‌شود. در این شیوه انتقال، سیال تحت گرادیان فشاری قرار می‌گیرد و طبق قانون مکانیک شاره‌ها وادار به حرکت می‌شود. همرفت ناشی از این حرکت را همرفت اجباری می‌نامند.

به تازگی شیوه‌های سریع و قابل اعتمادی برای تعیین مقاومت بتن به نفوذ یون کلر که نهایتاً منجر به خوردگی میلگرد خواهد شد، به وجود آمده است که در ادامه به چند مورد آن اشاره شده است.

آزمون تسریع شده نفوذ یون کلر به داخل بتن (RCPT)

یکی از روش‌های متداول برای ارزیابی سریع نفوذپذیری بتن در برابر یون کلر روش RCPT است. این روش بر اساس استاندارد ASTM C1202 یا AASHTO T277 [۲۰] بوده و با ثبت میزان کلرید عبوری از نمونه بتن، به ارزیابی نفوذپذیری نمونه می‌پردازد. از دلایل مهم کاربرد گسترده روش RCPT زمان کوتاه لازم برای انجام این آزمایش است. در این آزمایش مقدار کل جریان عبوری از یک نمونه اشباع شده بتن تحت ولتاژ ۶۰ ولت در طی مدت ۶ ساعت اندازه‌گیری می‌شود. نتایج این آزمایش نمایانگر میزان مقاومت بتن در مقابل نفوذ یون‌های کلر بوده و نمی‌تواند شاخصی برای نفوذپذیری بتن به حساب آید.

مزایای روش RCPT:

- روش ساده‌ای بوده و به راحتی راه‌اندازی می‌شود.
- نتایج آزمایش قابل درک بوده و به راحتی تفسیر می‌شود.
- با نتایج آزمایش استغراق ۹۰ روزه رابطه مستقیم دارد.

محدودیت‌های روش RCPT:

- ممکن است برای بتنی که شامل مواد سیمانی مکمل و یا مواد افزودنی شیمیایی باشد، نفوذ پذیری واقعی را نشان ندهد.
- ممکن است باعث شود اندازه‌گیری قبل از یک حالت پایدار رخ دهد.
- ممکن است سبب تغییرات فیزیکی و شیمیایی در نمونه شده و نتایج غیر واقعی ارائه کند.

آزمون تسریع شده انتقال یون کلر به داخل بتن (RCMT)

برای رفع ایرادهای وارد شده به روش RCPT و توسعه روش‌های تسریع شده جدید، تلاش‌های زیادی به وسیله محققان انجام شده است. یکی از روش‌هایی که انطباق مناسبی با نتایج روش‌های طولانی مدت از خود نشان داده است، روش تسریع شده انتقال یون کلر به داخل بتن می‌باشد.

این روش که استانداردهای [21] AASHTO TP64 و [22] NT Build492 را دارد، به صورت کلی مشابه روش RCPT است، در این روش برای جلوگیری از گرم شدن نمونه ولتاژ اعمال شده به نمونه با توجه به جریان عبوری از نمونه تغییر یافته و حجم محلول نمک در تماس با نمونه به میزان قابل توجهی افزایش پیدا کرده است همچنین در روش RCMT برای جلوگیری از تأثیر یون‌های دیگر موجود در

¹Rapid Chloride Penetration Test

² Rapid Chloride Migration Test

محلول منفذی روی نتیجه آزمایش به جای اندازه‌گیری جریان عبوری، عمق نفوذ یون کلر به داخل نمونه بتنی از راه شکافتن نمونه پس از اتمام آزمایش و پاشش محلول معرف به سطح آن تعیین می‌شود.

نتایج آزمایش RCPT میزان بهبود مقاومت بتن در برابر نفوذ یون کلر را به میزان قابل توجهی بیشتر از نتایج آزمایشهای RCMT و مقاومت الکتریکی نشان می‌دهد. در طی آزمایش RCPT افزایش در جریان عبوری ناشی از افزایش دمای نمونه رخ می‌دهد. میزان افزایش دما برای آزمون‌های با جریان عبوری زیاد بیشتر است. در این صورت استفاده از این آزمایش برای ارزیابی و مقایسه نفوذپذیری مخلوطهای مختلف در برابر یون کلرید می‌تواند تفاوت بیشتری نسبت به آنچه در واقع بین مخلوطها وجود دارد، نشان دهد [۲۳].

۸- نتیجه‌گیری

مطالعه‌ی فرآیند تخریب میلگرد در بتن مسلح و آشنایی با عوامل تاثیرگذار آن سبب خواهد شد، تا محققین بتوانند سازه‌هایی مقاوم در برابر نفوذ عوامل مخرب طراحی کنند. میلگرد و بتن در کنار هم ترکیب بسیار مطمئن و کارآمدی را ایجاد می‌کند ولی باید توجه داشت که در صورت تقابل این مصالح ساختمانی اثرات فاجعه باری ایجاد خواهد شد. به این مفهوم که اگر بتن نتواند از نفوذ عوامل مخربی نظیر کلرید ممانعت به عمل آورد و این عناصر به فولاد حفاظت نشده به کار رفته داخل بتن راه یابند در آنصورت علاوه بر میلگردها، خود بتن نیز متحمل آسیبهای جدی می‌شود. از این رو بهترین راه حل حفاظتی جهت افزایش عمر بتن مسلح در محیط‌هایی که حاوی یون کلرید محلول در آب هستند در وهله اول استفاده از پوشش‌های عایق کارآمد است. همچنین استفاده از تیپ‌های خاصی از سیمان (پوزولانی) که مقاومت بالایی در برابر نفوذ مایعات دارند نیز راهگشا خواهد بود. نهایتاً اگر سازه‌ها در معرض تنش‌های شدید کلریدی هستند استفاده از فولادهای زنگ نزن دو فازی که مقاوم به خوردگی در محیط‌های کلریدی هستند راهکار مناسبی خواهد بود.

سپاسگزاری

بدینوسیله از دانشگاه تهران که امکانات این مطالعه و تهیه مقاله مربوطه را فراهم نموده است تشکر می‌شود.

مراجع

- [1] Shi, X., Xie, N., Fortune, K., & Gong, J.; "Durability of steel reinforced concrete in chloride environments: An overview"; *Construction and Building Materials*, 30, (2012) 125-138.
- [2] Muthulingam, S., & Rao, B. N.; "Non-uniform corrosion states of rebar in concrete under chloride environment"; *Corrosion Science*, 93, (2015) 267-282.
- [3] Neville, A.; "Chloride attack of reinforced concrete: an overview"; *Materials and Structures*, 28(2), (1995). 63-70.
- [4] Angst, U., Elsener, B., Larsen, C. K., & Vennesland.; "Critical chloride content in reinforced concrete -a review"; *Cement and Concrete Research*, 39(12), (2009) 1122-1138.
- [5] Stanish, K. D., Hooton, R. D., & Thomas, M. D. A.; "Testing the chloride penetration resistance of concrete: a literature review" *FHWA contract DTFH61*, (1997) 19-22.
- [6] Husain, A., Al-Bahar, S., Salam, S. A., & Al-Shamali, O.; "Accelerated AC impedance testing for prequalification of marine construction materials"; *Desalination*, 165, (2004) 377-384.
- [7] Shi, X., Liu, Y., Mooney, M., Berry, M., Hubbard, B., Fay, L., & Leonard, A. B.; "Effect of chloride-based deicers on reinforced concrete structure"; (2010) (No. WA-RD 741.1).
- [8] Nilsson, L. O., & Ollivier, J. P. (Eds.); "Chloride threshold levels for corrosion induced deterioration of steel"; *International Workshop on Chloride Penetration into Concrete* (1995). (pp. 429-440).
- [9] Silva, Nelson.; "Chloride Induced Corrosion of Reinforcement Steel in Concrete"; *Threshold Values and Distributions at the Concrete-Steel Interface ISRJournals and Publications*(2013).Page 48.

- [10] Ehrenberg A.; "Granulated blastfurnace slag state of the art and potentials for the future"; *6th European slag conference, Madrid*, 2010.
- [11] Polder, R. B., & Peelen, W. H.; "Characterisation of chloride transport and reinforcement corrosion in concrete under cyclic wetting and drying by electrical resistivity"; *Cement and Concrete Composites*, 24(5), (2002). 427-435.
- [12] Basheer, P. A. M., Gilleece, P. R. V., Long, A. E., & Mc Carter, W. J.; "Monitoring electrical resistance of concretes containing alternative cementitious materials to assess their resistance to chloride penetration"; *Cement and Concrete Composites*, 24(5), (2002). 437-449.
- [13] L. Bertolini, R.B. Polder.; "Concrete resistivity and reinforcement corrosion rate as a function of temperature and humidity of the environment"; *Building and Construction Research*, TNO report 97- BT-R0574, TNO, Delft, The Netherlands, 1997.
- [14] Bleszynski, R., Hooton, R. D., Thomas, M. D., & Rogers, C. A.; "Durability of ternary blend concrete with silica fume and blast-furnace slag: laboratory and outdoor exposure site studies"; *ACI Materials Journal*, (2002) 99(5).
- [15] J. G. Keer.; "Steel Corrosion in Concrete"; *Fundamentals and Civil Engineering Practice*, E&FN SPON, London: (1992) 150.
- [16] P. Helene.; "Handbook diagnosis and intervention of reinforced concrete structures"; (2000) 87.
- [17] Medeiros, M. H. F., Castro-Borges, P., Aleixo, D. M., Quarcioni, V. A., Marcondes, C. G. N., & Helene, P.; "Reducing Water and Chloride Penetration Through Silicate Treatments for Concrete as a Mean to Control Corrosion Kinetics"; *International Journal of Electrochemical Science*, 7(10), (2012). 9682.
- [18] Powers, T. C.; "Structure and physical properties of hardened Portland cement paste"; *Journal of the American Ceramic Society*, 41(1), (1958). 1-6.
- [19] AASHTO T 259.; "Resistance of concrete to chloride ion penetration"; AASHTO ,(2007).
- [20] Shi C.; "Effect of mixing proportions of concrete on its electrical conductivity and the rapid chloride permeability test (ASTM C1202 or ASSHTO T277) results"; *Cement and Concrete Research*, Vol. 34 ,(2004) pp. 537-545
- [21] AASHTO TP 64. "Predicting chloride penetration of hydraulic cement concrete by the rapid migration procedure" American Association of state highway and transportation officials,(2007).
- [22] Build, N. 492. Concrete, mortar and cement-based repair materials: Chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments. *Nordtest method*, 492(10). (1999)

[۲۳] باقری، ع؛ «مقایسه عملکرد روش RCMT برای ارزیابی سریع مقاومت بتن در برابر نفوذ یون کلر با روش‌های RCPT و مقاومت الکتریکی» مجله عمران مدرس، دوره ۱۲، شماره ۳، پاییز ۹۱