

بررسی آزمایشگاهی روش‌های تسریع یافته الکتریکی سنجش نفوذپذیری کلریدی بتن

امیرضا پیلوار

دکتری عمران-مهندسی و مدیریت ساخت، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

علی اکبر رمضانپور

استاد دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

حسین رجایی

استادیار دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، مرکز تحقیقات تکنولوژی و دوام بتن، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

چکیده

تاکنون روش‌های تسریع یافته مختلفی جهت تعیین مقاومت بتن در مقابل نفوذ یون‌های کلرید، ارائه شده است. رویکرد غالب در این روش‌ها، استفاده از شاخص‌های الکتریکی می‌باشد. در این تحقیق عملکرد چهار روش تسریع یافته ارزیابی بتن در مقابل نفوذ یون‌های کلرید شامل روش‌های RCPT، مهاجرت تسریع یافته الکتریکی (RCMT)، مقاومت الکتریکی سطحی (SR) و روش ارائه شده در دانشگاه صنعتی امیرکبیر (MRCPT) مورد بررسی قرار گرفته است. در این تحقیق، از دوده سیلیس به عنوان ماده جایگزین سیمان به میزان ۷/۵ و ۱۵ درصد استفاده شده است. نتایج چهار روش، کاهش قابل توجهی در نفوذپذیری کلریدی نمونه‌های بتن حاوی دوده سیلیس نسبت به طرح‌های کنترل نشان دادند. دو روش RCPT و SR، بهبود عملکرد را بیش از حد واقع نشان می‌دهند. این بهبود در نتایج روش RCMT تا حدودی تعدیل می‌یابد اما روش MRCPT کمترین تأثیر را از جایگزینی دوده سیلیس از خود نشان داد. با توجه به نتایج بدست آمده، تغییرات رسانایی مایع منفذی بر نتایج آزمایش‌های RCPT و SR بسیار تأثیرگذار می‌باشد و روش MRCPT کمترین تأثیر را از تغییرات رسانایی مایع منفذی دارد.

واژه‌های کلیدی: بتن، نفوذ یون‌های کلرید، رسانایی، مقاومت الکتریکی، مایع منفذی.

۱- مقدمه

می آید باعث عدم اطمینان به نتایج RCPT می شود. به علاوه، به دلیل ولتاژ نسبتاً زیاد ۶۰ ولت، جریان برقرار شده در حالت پایداری قرار نمی گیرد [۷].

در نروژ روش مشابهی ارائه شد که بر پایه مشاهده نرخ مهاجرت یون‌های کلرید از میان بتن می باشد و با عنوان نفوذپذیری کلریدی معروف است [۸]. به هر حال نتایج این روش نیز یک پارامتر کیفی تجربی می باشد که به شرایط آزمایش بستگی دارد. می توان گفت، نرخ نفوذ یون‌های کلرید مشاهده شده به میزان غلظت محلول نمک و ولتاژ اعمال شده بستگی دارد.

در اوایل ۱۹۹۰ در سوئد، Nilsson و Tang [۹]، اولین کسانی بودند که روشی تسریع یافته ارائه دادند که در آن از رابطه‌ای تئوری بین انتشار و مهاجرت برای محاسبه ضریب انتشار یون‌های کلرید استفاده شده است. در این روش پس از اعمال پتانسیل الکتریکی و نفوذ یون‌های کلرید به بتن، ضریب انتشار بر اساس مشاهده عمق نفوذ یون‌های کلرید، محاسبه می گردد. از مزیت‌های آن می توان به سادگی، زمان نسبتاً کوتاه و پیش زمینه تئوری آن اشاره کرد.

از طرفی دیگر، رسانایی الکتریکی بتن یکی از خواص بتن می باشد که از آن می توان برای ارزیابی مقاومت بتن در مقابل نفوذ یون‌های کلرید استفاده کرد. از تحقیقات تئوری و کارهای آزمایشگاهی انجام شده مشخص است که بین مقاومت الکتریکی بتن و نفوذ یون‌های کلرید رابطه وجود دارد [۱۰-۱۳]. رسانایی الکتریکی بتن بیانگر جابجایی یون‌ها - از جمله یون‌های کلرید- درون مایع منفذی بتن می باشد. بنابراین، انتظار می رود ارتباط منطقی بین رسانایی الکتریکی و نفوذپذیری بتن وجود داشته باشد. در یک ساختار مشخص، قسمت‌های نفوذپذیرتر دارای رسانایی الکتریکی نسبی بیشتر می باشد.

اما محدودیت‌هایی در ارتباط بین خاصیت رسانایی بتن با نفوذپذیری آن وجود دارد. رسانایی نمونه‌های بتنی به هر دو عامل خصوصیات ریزساختار منافذ موین و رسانایی مایع منفذی وابسته است. در نتیجه، روش‌های آزمایش رسانایی بتن از تغییرات رسانایی مایع منفذی تأثیر می پذیرند. این تغییرات در رسانایی بتن لزوماً با انتشارپذیری آن متناسب نمی باشد. به عنوان مثال، بتنی که با سیمان با پایه قلیائیت پایین ساخته شده باشد، نسبت به نمونه بتنی که دارای قلیائیت بالاتری باشد، حتی اگر دارای ساختار منافذ

نفوذ یون‌های کلرید به بتن و خوردگی آرماتورهای مدفون در آن یکی از دلایل خرابی زودرس سازه‌های بتن آرمه می باشد که هر ساله باعث خسارت‌های زیادی می شود [۱]. از این رو، بررسی مقاومت بتن در مقابل نفوذ یون‌های کلرید و اندازه‌گیری ضریب انتشار آن، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

ضریب انتشار یون‌های کلرید در بتن را می توان با انجام آزمایش‌هایی مانند ASTM C1543 [۲] و ASTM C1556 [۳] به دست آورد. در این روش‌ها نمونه بتنی در معرض محلول NaCl قرار داده می شود و پس از مدت زمان مشخص، به وسیله پودرگیری (پروفیل‌گیری) میزان غلظت یون‌های کلرید در عمق‌های مختلف به دست آمده و با استفاده از برازش رابطه "فیک"، ضریب انتشار یون‌های کلرید محاسبه می شود.

به هر حال این روش‌ها زمان‌بر و پرهزینه هستند. در نتیجه روش‌های تسریع یافته‌ای جهت سنجش مقاومت بتن در مقابل نفوذ یون‌های کلرید، ارائه شده است. در برخی از این روش‌ها با تسریع نفوذ یون‌های کلرید توسط میدان الکتریکی، ضریب انتشار یون‌های کلرید به دست می آید و در برخی دیگر، با استفاده از شاخص‌هایی مانند رسانایی الکتریکی، مقاومت بتن در مقابل نفوذ یون‌های کلرید ارزیابی می گردد [۴، ۵]. این رویکردها به طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار گرفته است. با اعمال پتانسیل الکتریکی خارجی انتقال یون‌ها در جهت میدان الکتریکی انجام می گیرد.

در اوایل دهه ۱۹۸۰، Whiting [۶]، اولین روش تسریع یافته الکتریکی را جهت سنجش مقاومت بتن در مقابل نفوذ یون‌های کلرید ارائه داد. در این روش که به روش RCPT معروف است، مجموع بار الکتریکی عبوری از میان نمونه آزمایش در طول زمان مشخص اندازه‌گیری می شود. به همین دلیل، در این روش اطلاعات مشخصی در مورد مقاومت بتن در مقابل نفوذ یون‌های کلرید به دست نمی آید. هر چند روش RCPT به دلیل آسانی آن بسیار مورد استفاده قرار گرفته است، اما در مجامع علمی انتقادهایی نیز به آن وارد شده است [۵]. روش RCPT را می توان از جهت تغییرات دمایی در طول آزمایش مورد نقد قرار داد. همچنین به طور تئوری، رابطه‌ای صحیح و کامل بین نتایج آن با ضریب انتشار نمی توان پیدا کرد. از طرفی، تغییراتی که در ویژگی‌های مایع منفذی، زمانی که از مواد پوزولانی استفاده می شود، به وجود

جدول ۱- ساختار شیمیایی مواد سیمانی مورد استفاده

ترکیب شیمیایی (%)	سیمان	دوده سیلیس
CaO	۶۵/۳	۰/۳۶
SiO ₂	۲۰/۸	۹۴/۶۶
Al ₂ O ₃	۴/۳	۰/۳۱
Fe ₂ O ₃	۲/۲	۰/۶۰
MgO	۲/۱۷	۰/۷۸
K ₂ O	۰/۶۳	۰/۲۲
Na ₂ O	۰/۳۶	۰/۲۲
LOI (%)	۰/۹۱	۱/۷۷
مشخصات	وزن مخصوص	۳/۱۵
فیزیکی	نرمی (cm ² /g)	۲۸۰۰

۲-۲- آماده‌سازی و روش انجام آزمایش‌ها

برای ساخت نمونه‌ها، بتن در سه لایه در قالب‌ها ریخته شد. برای خروج حباب‌های هوا و تراکم بتن، از میز ویبره استفاده گردید. بعد از بتن ریزی در قالب‌ها، برای ۲۴ ساعت قالب‌ها توسط حوله نم‌دار پوشانده شدند. بعد از آن، نمونه‌ها از قالب‌ها خارج شده و درون آب آهک اشباع قرار گرفتند تا ضمن عمل آوری، از نشت Ca(OH)₂ از بتن به خارج جلوگیری شود. در ادامه، توضیح مختصری در مورد روش‌های آزمایش انجام شده در این تحقیق آورده شده است.

۲-۲-۱- Surface Resistivity Test (SR)

مقاومت الکتریکی بتن یکی از خواص ذاتی آن می‌باشد که به میزان رطوبت بتن و ترکیبات آن بستگی دارد [۱۵، ۵]. در حالت کلی، ضریب نفوذ یون‌های کلرید به طور عکس با مقاومت الکتریکی بتن رابطه دارد. همچنین، مقاومت الکتریکی با نرخ خوردگی آرماتور بعد از شروع خوردگی در ارتباط است [۱۶]. انتقال یون‌ها بین آند و کاتد در سطح آرماتور یکی از عوامل کنترلی نرخ خوردگی می‌باشد. یکی از بهترین روش‌ها برای اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی ویژه بتن، استفاده از روش چهار نقطه‌ای Wenner [۱۷]، می‌باشد (شکل ۱).

مویین یکسانی باشد، رسانایی کمتری از خود نشان می‌دهد. این موضوع یکی از محدودیت‌های روش‌های رسانایی در ارزیابی خاصیت نفوذ پذیری بتن می‌باشد [۱۴].

این مسئله در مورد بتن‌های حاوی مواد جای‌گزین سیمان، به‌ویژه پوزولان‌های فعال مانند دوده سیلیس، اهمیت پیدا می‌کند. زیرا در واکنش‌های پوزولانی، یون‌های OH⁻ مایع منفذی که نقش اساسی در رسانایی آن بازی می‌کنند مصرف می‌شود و رسانایی مایع منفذی به شدت کاهش می‌یابد.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، روش‌های مختلفی برای ارزیابی نفوذپذیری کلریدی بتن وجود دارد که هر کدام دارای معایب و مزایایی می‌باشند که باید با توجه به هدف، به‌طور آگاهانه انتخاب شوند.

هدف از این تحقیق، بررسی عملکرد چهار روش تسریع یافته سنجش مقاومت بتن در مقابل نفوذ یون‌های کلرید (RCPT, SR, MRCPT, RCMT) می‌باشد. به‌این منظور، از ۱۲ طرح اختلاط بتن که حاوی سیمان‌های معمولی و آمیخته با دوده سیلیس می‌باشد، استفاده گردید.

۲- برنامه آزمایشگاهی

۲-۱- مصالح و طرح‌های اختلاط

در این تحقیق در مجموع ۱۲ طرح اختلاط بتن ساخته شد و مورد بررسی قرار گرفت. برای ساخت نمونه‌های بتنی از سیمان تپ ۴۲۵-۱ در عیارهای ۳۵۰ و ۴۰۰ kg/m³، استفاده گردید. همچنین، دوده سیلیس به‌عنوان ماده جای‌گزین سیمان به میزان ۷/۵ و ۱۵ درصد استفاده گردید. در جدول ۱ ویژگی‌ها و ترکیبات شیمیایی این مواد آورده شده است. برای تمامی طرح‌ها از سنگدانه درشت شکسته شده با حداکثر قطر ۱۹ میلی‌متر و ماسه طبیعی به‌عنوان سنگدانه ریز استفاده گردید. وزن مخصوص سنگدانه درشت و ریز به ترتیب ۲۵۱۰ kg/m³ و ۲۵۷۰ kg/m³ می‌باشد. همچنین جذب آب سنگدانه درشت ۱/۹٪ و سنگدانه ریز ۲/۷۵٪ می‌باشد.

برای رسیدن به کارایی مطلوب (اسلامپ ۷ تا ۱۰ سانتی‌متر) از فوق روان‌کننده استفاده شد. برای ساخت نمونه‌های بتنی نیز از آب شرب در ۲ نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۴۵ و ۰/۳۵، استفاده گردید. خلاصه طرح‌های اختلاط در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۲- طرح‌های اختلاط

عنوان طرح	W/b	دوده سیلیس (SF)		سیمان (kg/m ³)	آب (kg/m ³)	سنگدانه (kg/m ³)	
		(%)	(kg/m ³)			درشت	ریز
4045SF0	۰/۴۵	۰	۰	۴۰۰	۱۸۰	۶۹۲	۱۰۳۷
4035SF0	۰/۳۵	۰	۰	۴۰۰	۱۴۰	۷۳۲	۱۰۹۹
3545SF0	۰/۴۵	۰	۰	۳۵۰	۱۵۷/۵	۷۳۱	۱۰۹۶
3535SF0	۰/۳۵	۰	۰	۳۵۰	۱۲۲/۵	۷۶۶	۱۱۵۰
4045SF7.5	۰/۴۵	۷/۵	۳۰	۳۷۰	۱۸۰	۶۹۲	۱۰۳۷
4035SF7.5	۰/۳۵	۷/۵	۳۰	۳۷۰	۱۴۰	۷۳۲	۱۰۹۹
3545SF7.5	۰/۴۵	۷/۵	۲۶/۲۵	۳۲۳/۷۵	۱۵۷/۵	۷۳۱	۱۰۹۶
3535SF7.5	۰/۳۵	۷/۵	۲۶/۲۵	۳۲۳/۷۵	۱۲۲/۵	۷۶۶	۱۱۵۰
4045SF15	۰/۴۵	۱۵	۶۰	۳۴۰	۱۸۰	۶۹۲	۱۰۳۷
4035SF15	۰/۳۵	۱۵	۶۰	۳۴۰	۱۴۰	۷۳۲	۱۰۹۹
3545SF15	۰/۴۵	۱۵	۵۲/۵	۲۹۷/۵	۱۵۷/۵	۷۳۱	۱۰۹۶
3535SF15	۰/۳۵	۱۵	۵۲/۵	۲۹۷/۵	۱۲۲/۵	۷۶۶	۱۱۵۰

البته باید گفت که نتایج آزمایش SR متأثر از ساختار شیمیایی مایع منفذی می‌باشد [۱۸]. این موضوع می‌تواند کاربرد این روش را در مورد بررسی بتن‌های حاوی مواد جای‌گزین سیمان، به دلیل غلظت پایین یون‌های OH⁻ در مایع منفذی آن‌ها، تحت تأثیر قرار دهد. با این وجود، سادگی و سرعت آن باعث شده است تا استانداردها این روش را پیشنهاد دهند.

در این تحقیق، در سن ۲۸ روز، مقاومت الکتریکی سطحی ۳ نمونه استوانه‌ای ۲۰۰×۱۰۰ میلی‌متری اندازه‌گیری شد. فاصله الکترودهای دستگاه مورد استفاده ۵۰ میلی‌متر بوده و قرائت‌های هر نمونه بر روی چهار ربع محیطی آن انجام گرفت و میانگین آن‌ها بدست آمد.



شکل ۱- دستگاه مقاومت الکتریکی ویژه سطحی

این روش غیر مخرب، سریع و به سادگی قابل استفاده می‌باشد. در این روش، چهار الکترود با فاصله‌های مساوی با سطح بتن در تماس قرار می‌گیرد. توسط الکترودهای خارجی، جریان متناوبی از نمونه عبور داده می‌شود و افت پتانسیل مابین ۲ الکترود داخلی اندازه‌گیری شده و توسط رابطه (۱) مقاومت الکتریکی ویژه بدست می‌آید.

$$= 2 a(v/i) \quad (1)$$

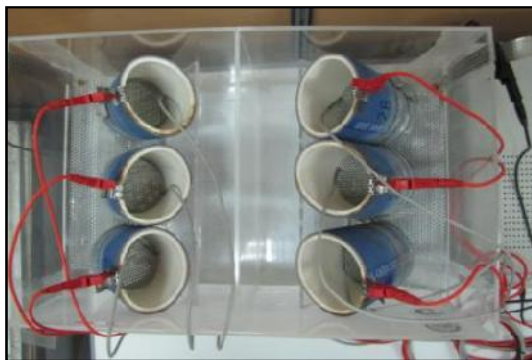
در رابطه فوق مقاومت الکتریکی ویژه a [k cm]، فاصله بین الکترودها [cm]، اختلاف پتانسیل [V] و i جریان [mA] می‌باشد.

۲-۲-۲ Rapid Chloride Permeability Test (RCPT)

آزمایش RCPT که در ASTM C1202 [۱۹]، استاندارد شده است، به‌طور گسترده‌ای در دنیا مورد استفاده قرار گرفته است. در این روش میزان کل بار الکتریکی عبوری از نمونه‌های بتنی اشباع به قطر ۱۰۰ و ضخامت ۵۰ میلی‌متر در طول ۶ ساعت تحت اختلاف پتانسیل ۶۰ ولت، اندازه‌گیری می‌شود. نمونه‌های بتنی از یک وجه با محلول NaCl و از وجه دیگر با محلول NaOH در تماس قرار می‌گیرند و با ایجاد اختلاف پتانسیل، جریان الکتریکی از نمونه‌ها

۲-۲-۳- Rapid Chloride Migration Test (RCMT) عبور کرده و یون‌های کلرید به درون بتن رانده می‌شوند (شکل ۲). این روش بر این فرض استوار است که میزان جریان عبوری، با قابلیت انتشار یون‌های کلرید از میان منافذ موئین بتن ارتباط دارد. هرچند روش RCPT به دلیل آسانی آن بسیار مورد استفاده قرار گرفته است، اما توسط محققین انتقاداتی نیز به آن وارد شده است [۵، ۷، ۲۰]. RCPT روشی است که در آن شرایط پایدار نفوذ وجود ندارد. بدان معنی که برای دستیابی به انتشار پایدار، می‌بایست شرایطی ایجاد شده باشد که یون‌های کلرید از یک سوی نمونه به سوی دیگر آن رسیده باشند که برای حصول این شرط، نیاز به مدت زمان طولانی است [۷]. لیکن در روش RCPT اندازه‌گیری از همان لحظه شروع انجام آزمایش، آغاز می‌گردد. مشکل دیگری که در روش RCPT وجود دارد، حرارت به وجود آمده در طول انجام آزمایش می‌باشد [۲۰]. به علاوه، به دلیل ولتاژ نسبتاً زیاد ۶۰ ولت، جریان برقرار شده در حالت پایداری قرار نمی‌گیرد. در نتیجه ممکن است نتایج به دست آمده به درستی بیانگر انتشار یون‌های کلرید نباشد.

در این تحقیق، آزمایش RCPT بر اساس استاندارد ASTM C1202 در سن ۲۸ روز انجام شد. برای هر طرح اختلاط، ۳ نمونه استوانه‌ای به ضخامت ۵۰ میلی‌متر از نمونه‌های بتنی 100×200 میلی‌متری برش داده شد. بعد از آماده‌سازی، نمونه‌ها درون سلول‌های آزمایش قرار داده شدند. در انتها، جریان ثابتی با اعمال ۶۰ ولت اختلاف پتانسیل از نمونه‌ها عبور داده شد و بعد از ۶ ساعت، میزان کل بار الکتریکی عبوری از نمونه‌ها بدست آمد.



شکل ۳- محفظه دستگاه RCMT

۲-۲-۴- Modified Rapid Chloride Permeability Test (MRCPT)

یکی دیگر از روش‌های تسریع یافته اندازه‌گیری نفوذپذیری بتن در مقابل یون‌های کلرید روش MRCPT [۲۲]، می‌باشد که در دانشگاه صنعتی امیرکبیر ارائه شده است (شکل ۴).



شکل ۲- دستگاه و سلول‌های آزمایش RCPT

۳- نتایج و بررسی

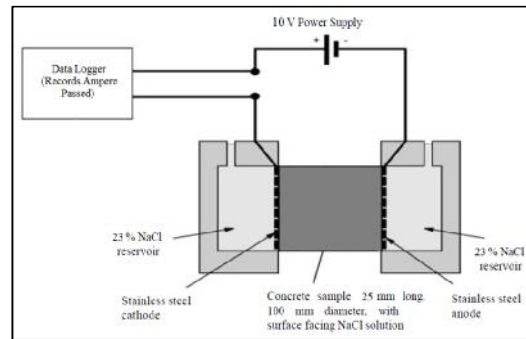
SR-1-3

مقاومت الکتریکی بتن به هر دو عامل ریز ساختار منافذ و ترکیبات شیمیایی مایع منفذی بستگی دارد [۲۳]. در واقعیت، مقاومت الکتریکی بیانگر قابلیت جابجایی یون‌ها از میان ماتریس بتن می‌باشد. بنابراین می‌تواند شاخص مناسبی برای ارزیابی نفوذپذیری بتن در مقابل یون‌های کلرید باشد. از طرفی، در سطح ناحیه خوردگی آرماتور، رسانایی بتن نقش اساسی در نرخ خوردگی از طریق تأثیر بر قابلیت جابجایی یون‌ها بین نواحی کاتدی و آنودی، بازی می‌کند [۲۴].

نتایج آزمایش مقاومت الکتریکی سطحی نمونه‌ها در شکل ۵ آورده شده است. همان‌طور که انتظار می‌رفت، در تمامی طرح‌ها به ازاء مواد سیمانی ثابت، با کاهش نسبت آب به مواد سیمانی و در نتیجه کاهش منافذ و متراکم تر شدن فاز خمیر سیمان، رسانایی و نفوذپذیری بتن کاهش می‌یابد.

از طرفی، به ازاء نسبت آب به مواد سیمانی ثابت، در تمامی طرح‌ها، با کاهش عیار مواد سیمانی، افزایش مقاومت الکتریکی را مشاهده می‌کنیم. دلیل این امر را این‌گونه می‌توان بیان کرد که با کاهش عیار، فاز خمیر سیمان نسبت به فاز مصالح سنگی در حجم بتن کاهش می‌یابد. از طرفی، مصالح سنگی به‌عنوان مواد نارسانا در ساختار بتن عمل می‌کند. بنابراین، با افزایش نسبت فاز نارسانای بتن به فاز خمیر سیمان، مقاومت الکتریکی افزایش می‌یابد.

همچنین، به ازاء عیار مواد سیمانی و نسبت آب به مواد سیمانی ثابت، با جای‌گزینی سیمان با دوده سیلیس، مقدار مقاومت الکتریکی نمونه‌های بتنی افزایش چشمگیری می‌یابد. به‌عنوان مثال، در طرح "۴۰۴۵" با جای‌گزینی ۱۵ درصد دوده سیلیس، مقاومت الکتریکی نمونه‌های بتنی در سن ۲۸ روز بیش از ۳/۵ برابر افزایش می‌یابد. این پدیده را می‌توان این‌گونه توجیح کرد که در اثر واکنش‌های پوزولانی، پیچ و خم‌های ساختار منافذ موین افزایش می‌یابد و ساختار آن متراکم تر می‌شود. از طرفی با کاهش غلظت یون‌های OH^- در اثر این واکنش‌ها، میزان رسانایی مایع منفذی به‌شدت کاهش می‌یابد. گفتنی است که یون‌های OH^- اصلی‌ترین نقش را در رسانایی مایع منفذی بازی می‌کنند. در اثر این دو پدیده به‌علاوه اثر رقیق‌سازی، میزان رسانایی بتن به‌شدت کاهش می‌یابد.



شکل ۴- نمای شماتیک آزمایش MRCPT

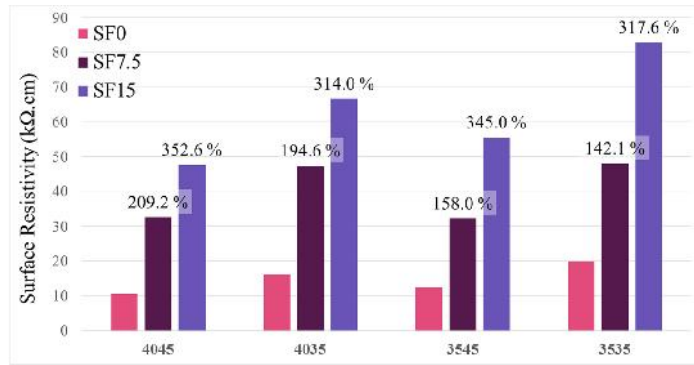
هدف این روش، رفع معایب آزمایش RCPT بیان شده است. در این روش برای آماده‌سازی نمونه‌های بتنی، ابتدا نمونه‌ها در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد برای یک هفته خشک می‌شوند. سپس با استفاده از محلول ۲۳٪ NaCl توسط دسی‌کاتور اشباع می‌گردند. روش MRCPT بر اساس اندازه‌گیری رسانایی نمونه‌های بتنی که به ریز ساختار منافذ موین و ساختار شیمیایی مایع منفذی بستگی دارد، شکل گرفته است. در این روش با اشباع‌سازی نمونه‌های بتنی با یک محلول با رسانایی بالا، تأثیر تغییرات شیمیایی مایع منفذی بتن‌های مختلف بر نتایج آزمایش کاهش می‌یابد. در نتیجه، بتن‌های مختلف، رسانایی‌های مختلفی متناسب با ریزساختار منافذ موین خود نشان می‌دهند.

البته به دلیل ضخامت کم نمونه‌های بتنی در این روش (۲۵ میلی‌متر)، آن‌ها نمی‌توانند بیانگر رفتار بتن‌هایی با سنگدانه‌های بزرگ در شرایط واقعی باشند. با وجود این در مقایسه با روش RCPT، استفاده از روش MRCPT دارای محاسن بسیاری می‌باشد که از آن‌جمله می‌توان به شرایط پایدار جریان از همان شروع آزمایش اشاره کرد.

در این تحقیق، در سن ۲۸ روز، ۳ نمونه استوانه‌ای با ضخامت ۲۵ و قطر ۱۰۰ میلی‌متر، پس از آماده‌سازی، درون سلول‌هایی مانند روش RCPT قرار داده شد و با ایجاد اختلاف پتانسیل ۱۰ ولت میزان جریان عبوری پس از گذشت ۱ دقیقه قرائت شد. با استفاده از رابطه ۲، رسانایی نمونه‌ها محاسبه و به‌عنوان نتیجه آزمایش گزارش گردید.

$$\sigma = (i/v) \times (t/A) \quad (2)$$

که در آن σ رسانایی [mS/cm]، i جریان الکتریکی [mA]، v اختلاف پتانسیل [V]، t ضخامت نمونه [cm] و A سطح مقطع نمونه [cm²] می‌باشد.

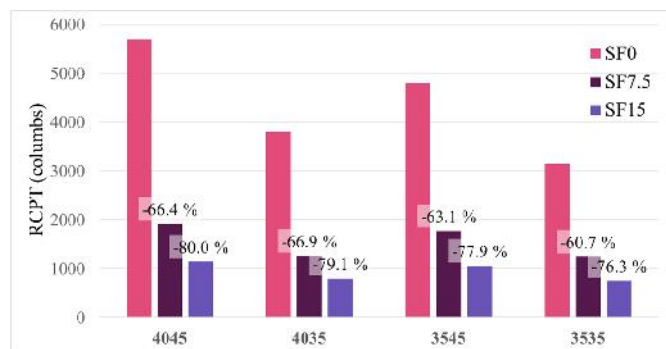


شکل ۵- مقاومت الکتریکی ویژه، ۲۸ روزه، (اعداد روی میله‌ها بیانگر میزان افزایش نسبت به نمونه شاهد می‌باشد)

۳-۲- RCPT

در صورتی که از لحاظ تئوری تغییرات آن‌ها باید بر هم منطبق باشند (میزان بار عبوری برابر است با سطح زیر نمودار جریان-زمان). دلیل این امر ضعف آزمایش RCPT در ارزیابی بتن‌های نفوذپذیر می‌باشد. به این معنی که در اثر عبور جریان از این نمونه‌ها، حرارت ایجاد می‌شود و دمای نمونه‌ها افزایش یافته و خود این افزایش باعث افزایش جریان عبوری می‌شود. بنابراین، تفاوت میزان بار الکتریکی عبوری از نمونه‌های حاوی دوده سیلیس و نمونه‌های کنترل، بیشتر است از تفاوت رسانایی آن‌ها. همچنین، در تمامی طرح‌ها به ازاء مواد سیمانی ثابت، با کاهش نسبت آب به مواد سیمانی و در نتیجه کاهش منافذ و متراکم تر شدن فاز خمیر سیمان، میزان بار عبوری از نمونه‌ها کاهش می‌یابد.

این روش در حقیقت میزان بار الکتریکی عبوری از میان نمونه بتنی را در طول زمان آزمایش به عنوان شاخص نفوذپذیری کلریدی بتن اندازه‌گیری می‌کند. نتایج آزمایش RCPT برای تمامی طرح‌ها در شکل ۶ آورده شده است. روند کلی نتایج مانند روش SR می‌باشد و مواردی که در تفسیر نتایج SR گفته شد در اینجا نیز صدق می‌کند. نتایج نشان می‌دهد که با جای‌گزینی سیمان با دوده سیلیس، نفوذپذیری بتن بهبود می‌یابد. این جای‌گزینی باعث کاهش شاخص میزان بار الکتریکی عبوری تا ۸۰ درصد در طرح "۴۰۴۵" در سن ۲۸ روز شده است. در مجموع، این کاهش حتی بیشتر از کاهش رسانایی نمونه‌های بتنی است که آزمایش SR نشان می‌داد،

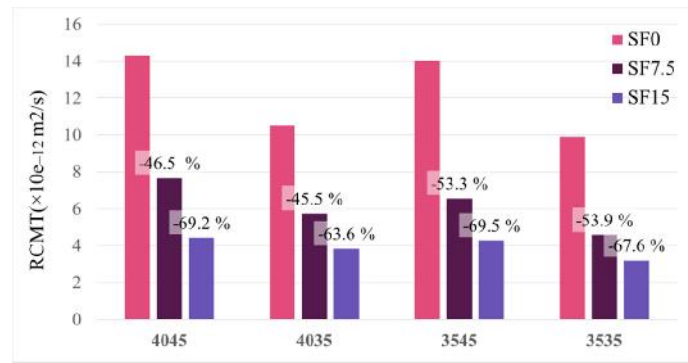


شکل ۶- RCPT، ۲۸ روزه، (اعداد روی میله‌ها بیانگر میزان کاهش نسبت به نمونه شاهد می‌باشد)

۳-۳- RCMT

مواد جای‌گزین سیمان (پوزولان‌ها). بر اساس رابطه الکتروشیمیایی ارائه شده در NT Build 492، ضریب انتشار یون‌های کلرید با استفاده از اختلاف پتانسیل اعمالی، زمان، میانگین دما و عمق نفوذ، به دست می‌آید. نتایج این آزمایش در شکل ۷ آورده شده است.

بر خلاف روش‌های RCPT و SR، در روش RCMT میزان عمق نفوذ یون‌های کلرید مستقیماً اندازه‌گیری می‌شود. بنابراین، به نظر می‌رسد نتایج این روش شاخصی مناسب‌تر برای بررسی نفوذپذیری کلریدی بتن می‌باشد، مخصوصاً برای بتن‌های حاوی



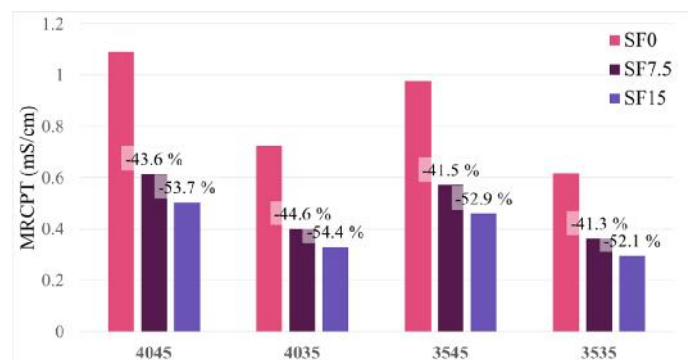
شکل ۷- RCMT، ۲۸ روزه، (اعداد روی میله‌ها بیانگر میزان کاهش نسبت به نمونه شاهد می‌باشد)

تغییرات در ریز ساختار منافذ موئین و نفوذپذیری بتن می‌شود. نتایج آزمایش MRCPT برای تمامی طرح‌ها در شکل ۸ آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با جای‌گزینی دوده‌سیلیس، رسانایی نمونه‌ها کاهش می‌یابد ولی این کاهش نسبت به تغییرات نتایج سه آزمایش دیگر کمتر می‌باشد. تعدیل در تغییرات نتایج را می‌توان به اشباع‌سازی نمونه‌ها با محلول NaCl ۲۳٪ و یکسان بودن نسبی رسانایی مایع منفذی نمونه‌های بتنی مورد آزمایش مربوط دانست. بنابراین می‌توان این ادعا را که نتایج این روش حساسیت کمی نسبت به تغییرات رسانایی مایع منفذی بتن‌های مختلف دارد، درست دانست. حداکثر درصد کاهش رسانایی نمونه‌های بتنی در اثر جایگزینی دوده‌سیلیس در طرح "۴۰۳۵" بوده که برابر ۵۴ درصد می‌باشد. البته نتایج روش MRCPT را می‌توان از لحاظ تأثیر عیار مواد سیمانی و همچنین نسبت آب به مواد سیمانی نیز تحلیل کرد که این مشاهدات و تحلیل‌ها شبیه آنچه‌که در مورد آزمایش SR گفته شد می‌باشد. در تمامی طرح‌ها به ازاء مواد سیمانی ثابت، با کاهش نسبت آب به مواد سیمانی و در نتیجه کاهش منافذ و متراکم تر شدن فاز خمیر سیمان، رسانایی نمونه‌ها کاهش می‌یابد.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، روند کلی نتایج موافق با نتایج آزمایش‌های SR و RCPT می‌باشد. البته با توجه به این‌که این روش حساسیت کمتری نسبت به تغییرات رسانایی مایع منفذی دارد، تغییرات نتایج طرح‌های حاوی دوده‌سیلیس نسبت به نمونه کنترل آن‌ها کمتر از آزمایش‌های SR و RCPT است. حداکثر درصد کاهش ضریب انتشار در اثر جای‌گزینی دوده‌سیلیس مربوط به طرح "۳۵۴۵" با ۱۵٪ جای‌گزینی می‌باشد که به ۶۹ درصد محدود شده است. همچنین، در تمامی طرح‌ها به ازاء مواد سیمانی ثابت، با کاهش نسبت آب به مواد سیمانی و در نتیجه کاهش منافذ و متراکم تر شدن فاز خمیر سیمان، ضریب مهاجرت یون‌های کلرید کاهش می‌یابد. در مجموع می‌توان گفت این روش شاخص بهتری جهت ارزیابی نفوذپذیری کلریدی بتن‌های حاوی دوده‌سیلیس نسبت به دو روش RCPT و SR در اختیار ما می‌گذارد.

۳-۴- MRCPT

در این روش ادعا می‌شود که با اشباع‌سازی نمونه‌های بتنی با محلول NaCl با رسانایی بالا، تأثیر رسانایی مایع منفذی بر نتایج به‌طور قابل توجهی کاهش می‌یابد و تغییرات نتایج مربوط به



شکل ۸- MRCPT، ۲۸ روزه، (اعداد روی میله‌ها بیانگر میزان کاهش نسبت به نمونه شاهد می‌باشد)

۴- نتیجه گیری

International Congress On Durability Of Concrete, 2012.

[2]. ASTM, "C 1543: Standard Test Method for Determining the Penetration of Chloride Ion into Concrete by Ponding", 2010.

[3]. ASTM, "C 1556: Standard Test Method for Determining the Apparent Chloride Diffusion Coefficient of Cementitious Mixtures by Bulk Diffusion," ed, 2011.

[4]. A. R. Bagheri and H. Zanganeh, "Comparison of rapid tests for evaluation of chloride resistance of concretes with supplementary cementitious materials," Journal of Materials in Civil Engineering, vol. 2, pp. 1175-1182, 2012.

[5]. A. A. Ramezani pour, A. Pilvar, M. Mahdikhani, and F. Moodi, "Practical evaluation of relationship between concrete resistivity, water penetration, rapid chloride penetration and compressive strength," Construction and Building Materials, vol. 25, pp. 2472-2479, 2011.

[6]. D. Whiting, "Rapid determination of the chloride permeability of concrete," Final Report Portland Cement Association, Skokie, IL. Construction Technology Labs., vol. 1, 1981.

[7]. P. E. Streicher and M. G. Alexander, "A chloride conduction test for concrete," Cement and Concrete Research, vol. 25, pp. 1284-1294, 1995.

[8]. Nordtest, "NT Build 355: Concrete, mortar and cement based repair materials: chloride diffusion coefficient from migration cell experiments. Nordtest Standards Institution", 1995.

[9]. T. Luping and L.-O. Nilsson, "Rapid determination of the chloride diffusivity in concrete by applying an electric field," ACI Materials Journal, vol. 89, 1993.

[10]. Y. Shimizu, "An electrical method for measuring the setting time of portland cement," Mill Section of Concrete, vol. 32, pp. 111-113, 1928.

[11]. J. Calleja, "Effect of current frequency on measurement of electrical resistance of cement pastes," in ACI Journal Proceedings, 1952.

[12]. H. Whittington, J. McCarter, and M. Forde, "The conduction of electricity through concrete," Magazine of Concrete Research, vol. 33, pp. 48-60, 1981.

[13]. R. Spragg, C. Villani, K. A. Snyder, D. P. Bentz, J. W. Bullard, and J. Weiss, "Electrical Resistivity Measurements in Cementitious Systems: Observations of Factors that Influence the Measurements," Journal of the Transportation Research Board, vol. 2342, pp. 90 - 98, 2013.

[14]. A. A. Ramezani pour, A. R. Pilvar, M. Mahdikhani, F. Moodi, and R. Pilvar, "Developing a modified rapid chloride permeability test for

در این مقاله عملکرد چهار روش تسریع یافته ارزیابی نفوذپذیری کلریدی بتن بررسی شد. به این منظور، از ۱۲ طرح اختلاط بتن که حاوی دوده سیلیس نیز بودند استفاده گردید. خلاصه نتایج بدست آمده در ادامه آورده شده است.

الف- از نتایج چهار روش به روشی مشاهده می شود که استفاده از دوده سیلیس باعث کاهش نفوذپذیری بتن می شود. واکنش های پوزولانی دوده سیلیس باعث تراکم ساختار بتن و همچنین مسدود کردن منافذ مویین آن می شود.

ب- باتوجه به مصرف یون های OH^- در اثر واکنش های پوزولانی دوده سیلیس و افت شدید رسانایی مایع منفذی، شاخص نفوذپذیری بتن در دو روش RCPT و SR کاهش شدیدی را در مورد طرح های حاوی دوده سیلیس نسبت به طرح های کنترل نشان می دهد. این امر ضعف این دو روش را در ارزیابی بتن های حاوی پوزولان های فعال نشان می دهد.

پ- در روش RCMT شاخص نفوذپذیری بتن نسبت به دو روش RCPT و SR کاهش کمتری را در مورد طرح های حاوی دوده سیلیس نسبت به طرح های کنترل نشان می دهد. دلیل این امر را می توان اندازه گیری مستقیم عمق نفوذ یون های کلرید و همچنین اشباع سازی نمونه های بتنی با آب آهک دانست. در کل، روش RCMT نتایج قابل اطمینان تری نسبت به دو روش RCPT و SR ارائه می دهد.

ت- روش MRCPT در بین چهار روش بررسی شده، کمترین حساسیت را نسبت به تغییرات رسانایی مایع منفذی از خود نشان داد و می توان گفت که از بین این روش ها، بیان بهتری را از عملکرد و نفوذپذیری بتن های حاوی دوده سیلیس ارائه می دهد. به نظر می رسد این روش عملکرد خوبی در ارزیابی بتن های حاوی مواد جایگزین سیمان دارد.

ث- هر چهار روش به خوبی تأثیر نسبت آب به مواد سیمانی و همچنین عیار مواد سیمانی را بر نفوذپذیری نمونه های بتنی نشان دادند و تقریباً از یک روند یکسان برخوردارند.

۵- مراجع

[1]. A.R. Baqheri, H. Zanganeh, H. Samadzad, and A. L. A. H. Kiani, "Assessing The Durability Of Binary And Ternary Concretes Using Rapid Chloride Resistance Test And The Accelerated Rebar Corrosion Test," presented at the

mortar concrete," in Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting III, ed: CRC Press, pp. 279-286, 2012.

[15]. C. Andrade, "Calculation of chloride diffusion coefficients in concrete from ionic migration measurements," Cement and Concrete Research, vol. 23, pp. 724-742, 1993.

[16]. W. Morris, A. Vico, M. Vazquez, and S. De Sánchez, "Corrosion of reinforcing steel evaluated by means of concrete resistivity measurements," Corrosion Science, vol. 44, pp 99-81, 2002.

[17]. AASHTO, "TP 95: Standard Method of Test for Surface Resistivity Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration, 2011.

[18]. A. Ramezaniانپور, S. M. Motahari Karein, P. Vosoughi, A. Pilvar, S. Isapour, and F. Moodi, "Effects of calcined perlite powder as a SCM on the strength and permeability of concrete," Construction and Building Materials, vol. 66, pp. 222-228, 2014.

[19]. ASTM, "C 1202: Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration," ed. ASTM International: West Conshohocken Pennsylvania, 2012.

[20]. G. Julio-Betancourt and R. Hooton, "Study of the Joule effect on rapid chloride permeability values and evaluation of related electrical properties of concretes," Cement and concrete research, vol. 34, pp. 1007-1015, 2004.

[21]. L. Tang and N. Lars-Olof, "Rapid Determination of the Chloride Diffusivity in Concrete by Applying an Electric Field," ACI Materials Journal, vol. 89, pp. 49-53, 1993.

[22]. A. Pilvar, A. A. Ramezaniانپور, and H. Rajaie, "New method development for evaluation concrete chloride ion permeability," Construction and Building Materials, 2015.

[23]. R. Polder, C. Andrade, B. Elsener, Ø. Vennesland, J. Gulikers, R. Weidert, et al., "Test methods for on site measurement of resistivity of concrete," Materials and Structures, vol. 33, pp. 603-611, 2000.

[24]. K. Hornbostel, C. K. Larsen, and M. R. Geiker, "Relationship between concrete resistivity and corrosion rate—A literature review," Cement and Concrete Composites, vol. 39, pp. 60-72, 2013.

Experimental Assessment of Electrically Accelerated Chloride Permeability Tests for Concrete

A. Pilvar^{*}

Ph.D., Department of Civil & Environmental Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran

A.A. Ramezaniapour

Professor, Department of Civil & Environmental Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran

H. Rajaie

Assistant Professor, Concrete Technology and Durability Research Center, Amirkabir University of Technology, Tehran

Abstract

The present study is an exploratory research that appraise and compare the performance of four rapid tests for assessing the chloride penetration of concrete; RCPT, RCMT, SR and MRCPT. Due to the concern raised by some scholars about the effect that the conductivity of the pore solution impinges upon the results on some of these rapid tests, Silica fume was used as Supplementary cementitious material in portions of 7.5% and 15%. All four methods exhibited substantial decrease in the chloride permeability of the concrete samples with silica fume as compared to control samples, at the age of 28 days. The increase in performance caused by Silica fume usage was significant for RCPT and SR methods, moderate for RCMT and marginal for MRCPT. The results show that the variation in the conductivity of the pore solution significantly alters the results of SR and RCPT tests, and marginally alters those of MRCPT.

Keywords: Concrete, Chloride permeability, Conductivity, Resistivity, Pore solution.

* Corresponding Author: amir63p@aut.ac.ir

