

مقایسه عملکرد روش RCMT برای ارزیابی سریع مقاومت بتن در برابر نفوذ یون کلر با روش‌های RCPT و مقاومت الکتریکی

علیرضا باقری^{۱*}، حامد زنگانه^۲

۱- استادیار دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

۲- مدرس دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

bagheri@kntu.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۰/۱۲/۲۰

تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۰۲/۰۵

چکیده - استفاده از روش‌های کارآمد و قابل اتکا برای ارزیابی مقاومت بتن در برابر نفوذ یون کلر به لحاظ دوام سازه‌های بتن‌آرمه اهمیت ویژه‌ای دارد. در تحقیق حاضر عملکرد سه روش تسریع شده ارزیابی عملکرد بتن در برابر نفوذ یون کلر شامل روش تسریع شده نفوذ یون کلر در بتن (RCPT)، روش تسریع شده انتقال یون کلر در بتن (RCMT) و روش تعیین مقاومت الکتریکی بتن با یکدیگر مقایسه شده‌اند. مخلوط‌های مطالعه شده علاوه بر مخلوط کنترل شامل مخلوط‌های حاوی ۲/۵، ۵، ۷/۵ و ۱۰ درصد دوده سیلیسی، ۷/۵ و ۱۵ درصد خاکستر بادی ریز، ۱۵ و ۳۰ درصد خاکستر بادی، ۱۵ و ۳۰ درصد پومیس و ۱۵، ۳۰ و ۵۰ درصد سرباره کوره آهن‌گدازی بوده‌اند.

نتایج هر سه روش نشانگر کاهش قابل توجه در نفوذپذیری یون کلر به داخل بتن‌های حاوی دوده سیلیسی در سنین ۲۸ و ۹۰ روزه و بتن‌های حاوی دیگر مواد مکمل سیمانی در سن ۹۰ روزه در مقایسه با مخلوط کنترل بوده‌اند. اما مقدار کاهش در نفوذپذیری براساس آزمایش RCPT به میزان قابل توجهی بیش‌تر از دو روش دیگر مشاهده شد. علت اصلی این امر، افزایش دمای آزمون‌های بتنی در آزمایش RCPT و افزایش جریان الکتریکی ناشی از آن است. براساس نتایج به‌دست آمده، استفاده از روش RCMT به جای روش RCPT در ارزیابی نفوذپذیری بتن در برابر یون کلر به‌خصوص برای بتن‌های حاوی مواد مکمل سیمانی قابل توصیه می‌باشد. هم‌چنین با توجه به سهولت استفاده و سرعت زیاد روش مقاومت الکتریکی، این روش پتانسیل مناسبی برای استفاده در این زمینه دارد.

واژگان کلیدی: RCPT، RCMT، مقاومت الکتریکی، مواد مکمل سیمانی، دوام.

۱- مقدمه

در برابر نفوذ یون کلر برای دستیابی به سازه‌های با دوام مشخص می‌شود. در این خصوص آزمایش‌هایی نظیر ASTM C1556 [۲] و AASHTO T259 [۱] که به‌طور عمده مبتنی بر اندازه‌گیری غلظت یون کلر در عمق‌های مختلف

از بزرگ‌ترین معضلات دوام سازه‌های بتن مسلح، خوردگی آرماتورهای فولادی در اثر نفوذ یون کلر به داخل بتن می‌باشد. بر این اساس، اهمیت ارزیابی صحیح مقاومت بتن

بر این باورند که کاربرد برخی مواد مکمل سیمانی از راه کاهش یون $(OH)^-$ در آب منفذی منجر به کاهش جریان عبوری می‌گردند. در صورتی که این کاهش الزاماً نشانگر مقاومت بالاتر در برابر نفوذ یون کلر نمی‌باشد [۱۰؛ ۱۱].

برای رفع ایرادهای وارد شده به روش RCPT و توسعه روش‌های تسریع شده جدید، تلاش‌های زیادی به‌وسیله محققان انجام شده است. یکی از روش‌هایی که انطباق مناسبی با نتایج روش‌های طولانی‌مدت از خود نشان داده است، روش تسریع شده انتقال یون کلر به داخل بتن (RCMT^۲) می‌باشد [۱۰؛ ۱۲].

این روش که استانداردهای AASHTO TP64 [۱۳] و NT Build492 [۱۴] را دارد، به صورت کلی مشابه روش RCPT است، در این روش برای جلوگیری از گرم شدن نمونه و لتاز 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 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.

روش دیگری که برای ارزیابی سریع عملکرد بتن به لحاظ مقاومت در برابر نفوذ یون کلر مطرح شده است تعیین مقاومت الکتریکی بتن است. این روش براساس این فرض توسعه پیدا کرده است که روش RCPT در واقع خود نوعی آزمایش تعیین مقاومت الکتریکی بتن می‌باشد. برای جلوگیری از گرم شدن نمونه در روش‌های تعیین هدایت الکتریکی بتن، آزمایش به‌صورت کوتاه‌مدت در حدود چند ثانیه الی چند دقیقه انجام می‌گیرد [۱۵؛ ۱۶]. با توجه به

بتن در معرض محلول کلریدسديم می‌باشند، توسعه یافته‌اند. با توجه به کند بودن پدیده نفوذ یون کلر در بتن و زمان‌بر بودن آزمایش‌های اخیراستفاده از روش‌های تسریع شده برای سهولت کنترل کیفی بتن همواره مد نظر بوده است.

یکی از روش‌های متداول برای ارزیابی سریع نفوذپذیری بتن در برابر یون کلر روش RCPT^۱ می‌باشد. این روش دارای استاندارد ASTM C1202 [۳] بوده و در حال حاضر به‌عنوان یکی از روش‌های کنترل کیفی بتن در شرایط محیطی خلیج فارس و دریای عمان در مدارک فنی کشور مطرح می‌باشد [۴].

از دلایل مهم کاربرد گسترده روش RCPT زمان کوتاه لازم برای انجام این آزمایش می‌باشد. در این آزمایش مقدار کل جریان عبوری از یک نمونه اشباع شده بتن تحت اختلاف ولتاژ ۶۰ ولت در طی مدت ۶ ساعت اندازه‌گیری می‌شود. فرض بر این است که عبور جریان از نمونه و از طریق محلول منفذی بتن که به عنوان الکتروولیت عمل می‌کند، صورت می‌گیرد. با توجه به این که مقدار و پیوستگی منافذ نمونه‌های بتنی روی عبور یون‌ها و در نتیجه مقدار جریان عبوری تأثیرگذار می‌باشند انتظار می‌رود که نمونه‌های متخلخل با منافذ پیوسته دارای جریان عبور زیاد و نمونه‌های با تخلخل و پیوستگی منافذ کم دارای جریان عبوری کم باشند. انتقاد عمده وارد شده بر این روش، مسئله افزایش دمای ایجاد شده در نمونه، ناشی از عبور جریان تحت اختلاف پتانسیل به‌نسبت زیاد ۶۰ ولت می‌باشد. این افزایش دما باعث کاهش مقاومت الکتریکی بتن شده و منجر به افزایش بیش‌تر جریان عبوری از نمونه می‌گردد [۵؛ ۶؛ ۷]. از ایرادهای دیگر به روش RCPT، موضوع دخالت یون‌های دیگری به غیر از یون کلر نظیر $(OH)^-$ در انتقال جریان عبوری از نمونه می‌باشد [۶؛ ۸؛ ۹]. از این رو برخی محققان

مقدار سیمان 420 kg/m^3 ساخته شد. برای ساخت مخلوط‌های بتنی شامل مواد مکمل سیمانی از دوده سیلیسی (SF) در نسبت‌های جایگزینی ۲/۵، ۵، ۷/۵ و ۱۰ درصد وزنی مواد سیمانی، از خاکستر بادی ریز (VFA) در نسبت‌های جایگزینی ۷/۵ و ۱۵ درصد وزنی مواد سیمانی، از پومیس (Pu) و خاکستر بادی (FA) در نسبت‌های جایگزینی ۱۵ و ۳۰ درصد وزنی مواد سیمانی و از سرباره (SL) در مقادیر جایگزینی ۱۵، ۳۰ و ۵۰ درصد مواد سیمانی استفاده شده است. هم‌چنین یک مخلوط بدون مواد مکمل سیمانی با نسبت آب به سیمان ۰/۳۲ نیز ساخته شد. مشخصات مخلوط‌های مطالعه در جدول ۲ ارائه شده است. کارایی مخلوط‌ها در محدوده اسلامپ $100-150 \text{ mm}$ در نظر گرفته شد و با ثابت نگاه داشتن نسبت آب به مواد سیمانی در مقدار ۰/۳۸ از مقادیر مختلف فوق روانساز برای دستیابی به محدوده کارایی مورد نظر استفاده شد. نمونه‌ها پس از ۲۴ ساعت از قالب‌ها خارج و تحت عمل‌آوری مرطوب تا زمان آزمایش قرار گرفتند.

۲-۳- آزمایش نفوذ سریع شده یون کلر (RCPT)

این آزمایش براساس استاندارد ASTM C1202 [۴] روی مخلوط‌های مختلف انجام شد. در این آزمایش از نمونه استوانه‌ای با قطر 10 cm و ارتفاع 20 cm ، آزمون‌ای به ضخامت 5 cm تهیه شد و پس از اعمال خلأ و اشباع کردن با آب، داخل سلول دستگاه قرار گرفت و آزمایش شد. آزمون داخل سلول از یک وجه با محلول سود (NaOH) و وجه دیگر با محلول نمک (NaCl) در تماس قرار می‌گیرد (شکل ۱). الکتروود طرفی از سلول که محلول سود درون آن است به قطب مثبت و الکتروود طرف دیگر سلول که محلول نمک درون آن است به قطب منفی دستگاه مولد جریان مستقیم متصل شده و با روشن کردن دستگاه ولتاژ 60 V و

سهولت و سرعت زیاد روش تعیین مقاومت الکتریکی بتن به‌تازگی برخی دستورالعمل‌ها و یا روش‌های پیشنهادی درخصوص نحوه انجام مطرح شده است [۱۶؛ ۱۷].

شایان توجه است که علی‌رغم کاستی‌های ذکر شده به لحاظ عملکرد روش RCPT برای ارزیابی مقاومت بتن در برابر نفوذ یون کلر هم‌چنان اختلاف نظر وجود دارد [۱۸]. برخی محققان روش RCPT را به‌خصوص برای بتن‌های حاوی مواد مکمل سیمانی مناسب نمی‌دانند [۱۰]. در صورتی که برخی دیگر آن را روشی مناسب حتی برای ارزیابی بتن‌های حاوی مواد مکمل سیمانی می‌دانند [۱۹].

با توجه به توسعه روز افزون کاربرد مواد مکمل سیمانی برای افزایش دوام بتن تحت شرایط حمله کلریدی در کشور، تحقیق حاضر با هدف مقایسه عملکرد روش‌های تسریع شده مختلف برای ارزیابی مخلوط‌های بتن حاوی مواد مکمل سیمانی انجام شد.

۲- برنامه آزمایشگاهی

۲-۱- مواد و مصالح استفاده شده

در ساخت مخلوط‌های بتن از سیمان پرتلند نوع ۲ و مصالح سنگی ریزدانه طبیعی و درشت‌دانه نیمه شکسته با اندازه حداکثر اسمی 19 mm میلی‌متر استفاده شده است. مواد مکمل سیمانی شامل دوده سیلیسی، خاکستر بادی معمولی نوع F، خاکستر بادی ریز نوع F، پومیس تفتان و پودر سرباره ذوب آهن اصفهان بوده است. آنالیز شیمیایی سیمان و مواد مکمل سیمانی در جدول ۱ ارائه شده است. از آب شرب شهری و فوق روانساز برپایه پلی‌کربوکسیلیک اتر در ساخت مخلوط‌ها استفاده شده است.

۲-۲- مخلوط‌های بتن

در این تحقیق مخلوط کنترل با نسبت آب به سیمان ۰/۳۸ و

به آزمون از طریق الکترودها اعمال می‌گردد. جریان عبوری از نمونه طی ۶ ساعت ثبت می‌شود. با محاسبه سطح زیر نمودار جریان زمان، بار الکتریکی عبوری از هر آزمون (شار عبوری) محاسبه می‌شود. آزمایش RCPT در سنین ۲۸ و ۹۰ روزه و در هر سن روی سه آزمون انجام شده است.

جدول (۱) آنالیز شیمیایی سیمان و مواد مکمل سیمانی استفاده شده

ترکیب %	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O
سیمان	۲۲/۵۷	۴/۱۲	۳/۵۱	۶۳/۲۲	۲/۷۰	۱/۵۰	۰/۱۸	۰/۵۴
دوده سیلیسی	۹۴/۳	۱/۱۰	۰/۷۰	۰/۴۹	۰/۸۷	----	۰/۴۲	۱/۳۲
پومیس	۵۴/۰۰	۱۵/۳۰	۵/۱۰	۱۵/۶۰	۲/۶۰	۰/۰۰	۳/۴۰	۱/۸۰
خاکستر بادی	۵۸/۷	۳۱/۴	۳/۷۰	۰/۷۳	۰/۷۰	۰/۰۰	۰/۲۴	۰/۹۲
خاکستر بادی ریز	۵۸/۸	۳۲/۱۷	۳/۸۳	۲/۰۰	۰/۷۰	۰/۰۰	----	----
سرباره	۳۶/۰۰	۱۳/۰۰	۰/۶۰	۳۸/۸۰	۶/۶۰	۰/۶۰	۰/۹۰	۰/۸۸

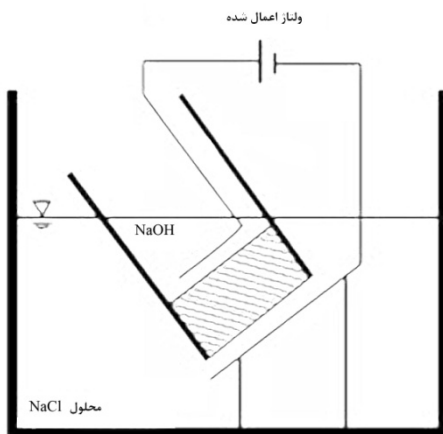
جدول (۲) مقادیر اجزای مخلوط‌های مختلف مطالعه شده

کد مخلوط	w/b	سیمان (Kg/m ³)	دوده سیلیسی (Kg/m ³)	پومیس (Kg/m ³)	خاکستر بادی (Kg/m ³)	خاکستر بادی ریز (Kg/m ³)	سرباره (Kg/m ³)	درصد فوق روانساز	شن (Kg/m ³) (SSD)	ماسه (Kg/m ³) (SSD)
کنترل-0.38	۰/۳۸	۴۲۰	----	----	----	----	----	۰/۴۴	۸۷۶	۸۷۶
0.38-SF2.5	۰/۳۸	۴۰۹/۵	۱۰/۵	----	----	----	----	۰/۴۸	۸۷۴	۸۷۴
0.38-SF5	۰/۳۸	۳۹۹	۲۱	----	----	----	----	۰/۵۱	۸۷۲	۸۷۲
0.38-SF7.5	۰/۳۸	۳۸۸/۵	۳۱/۵	----	----	----	----	۰/۵۴	۸۷۰	۸۷۰
0.38-SF10	۰/۳۸	۳۷۸	۴۲	----	----	----	----	۰/۵۶	۸۶۹	۸۶۹
0.38-Pu15	۰/۳۸	۳۵۷	----	۶۳	----	----	----	۰/۵۲	۸۷۰	۸۷۰
0.38-Pu30	۰/۳۸	۲۹۴	----	۱۲۶	----	----	----	۰/۵۴	۸۶۳	۸۶۳
0.38-FA15	۰/۳۸	۳۵۷	----	----	۶۳	----	----	۰/۳۹	۸۶۶	۸۶۶
0.38-FA30	۰/۳۸	۲۹۴	----	----	۱۲۶	----	----	۰/۳۰	۸۵۵	۸۵۵
0.38-VFA7.5	۰/۳۸	۳۸۸/۵	----	----	----	۳۱/۵	----	۰/۴۰	۸۷۱	۸۷۱
0.38-VFA15	۰/۳۸	۳۵۷	----	----	----	۶۳	----	۰/۳۳	۸۶۶	۸۶۶
0.38-SL15	۰/۳۸	۳۵۷	----	----	----	----	۶۳	۰/۴۰	۸۷۳	۸۷۳
0.38-SL30	۰/۳۸	۲۹۴	----	----	----	----	۱۲۶	۰/۳۷	۸۷۰	۸۷۰
0.38-SL50	۰/۳۸	۲۱۰	----	----	----	----	۲۱۰	۰/۳۳	۸۶۶	۸۶۶
0.32-Mix	۰/۳۲	۴۲۰	----	----	----	----	----	۰/۸۹	۹۰۶	۹۰۶

± 18 ساعت دستگاه خاموش و آزمون از داخل غلاف لاستیکی خارج می‌شود. سپس آزمون به دو نیم شکافته شده و محلول نترات نقره روی سطح تازه شکافته شده پاشیده شده و با اندازه‌گیری عمق ناحیه تغییر رنگ داده عمق نفوذ یون کلر تعیین می‌شود. در انتها نرخ نفوذ یون کلر از رابطه ۱ محاسبه می‌شود.

$$M = \frac{h}{Vt} \quad (1)$$

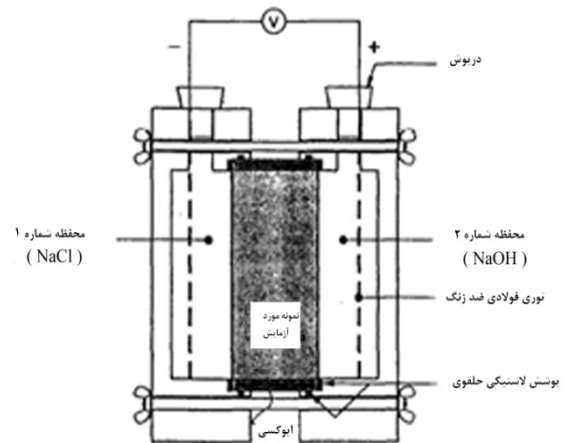
در این رابطه M نرخ نفوذ یون کلر برحسب میلی‌متر بر ولت ساعت، h میانگین عمق نفوذ یون کلر برحسب میلی‌متر، V ولتاژ اعمال شده به آزمون‌ها برحسب ولت، t مدت زمان آزمایش برحسب ساعت می‌باشد.



شکل (۲) تجهیزات آزمایش RCMT به صورت شماتیک

۲-۵- آزمایش مقاومت الکتریکی

آزمایش مقاومت الکتریکی برای هر مخلوط روی سه نمونه مکعبی ۱۰۰ میلی‌متری اشباع شده در آب در سنین ۲۸ و ۹۰ روزه انجام شده است. این آزمایش با اعمال جریان متناوب (AC) و اندازه‌گیری ولتاژ انجام شد. براساس ولتاژ اندازه‌گیری شده و جریان اعمال شده، مقاومت الکتریکی هر آزمون تعیین شده است. برای محاسبه مقاومت الکتریکی ویژه از رابطه ۲ استفاده شده است.



شکل (۱) دستگاه RCPT به صورت شماتیک

۲-۴- آزمایش انتقال تسریع شده یون کلر (RCMT)

این آزمایش براساس استاندارد AASHTO TP 64 [۱۸] روی مخلوط‌های مختلف انجام شده است. آزمون‌های استفاده شده و روش آماده‌سازی آن‌ها برای این آزمایش مشابه روش RCPT می‌باشند. آزمون‌ها پس از اشباع شدن با آب داخل غلاف لاستیکی قرار داده شده و سطح پیرامونی آن‌ها ایزوله می‌شود، سپس محلول سود با غلظت ۰/۳ نرمال داخل غلاف لاستیکی ریخته شده و با وجه بالایی آزمون بتنی در تماس قرار می‌گیرد. مجموعه آماده شده داخل ظرف حاوی محلول نمک (NaCl) با غلظت ۱۰ درصد قرار داده می‌شود به نحوی که وجه پایینی آزمون در تماس با محلول نمک باشد. در شکل ۲ به صورت شماتیک نحوه قرارگیری آزمون و غلاف لاستیکی دور آن داخل ظرف حاوی نمک در آزمایش RCMT ارائه شده است.

برای شروع آزمایش، الکترودها به دستگاه مولد جریان مستقیم متصل می‌شوند. در آغاز ولتاژ اعمالی برابر ۶۰ تنظیم شده و جریان عبوری از هر آزمون اندازه‌گیری می‌شود. در صورت زیاد بودن جریان اولیه عبوری ولتاژ اعمالی کاهش داده می‌شود تا نرخ جریان کاهش پیدا کرده و از گرم شدن آزمون جلوگیری شود. پس از مدت زمان ۲

$$\rho = A \left(\frac{R}{L} \right) \quad (2)$$

در رابطه بالا ρ مقاومت الکتریکی ویژه ($\Omega.m$)، R مقاومت الکتریکی اندازه گیری شده در آزمایش (Ω)، A سطح مقطعی که جریان از آن می گذرد (m^2) و L طول نمونه در جهت جریان برحسب متر می باشد. شایان ذکر است که نتیجه این آزمایش را می توان به صورت هدایت الکتریکی ویژه بتن که عکس مقاومت الکتریکی ویژه است، نیز در نظر گرفت.

۳- نتایج و تجزیه و تحلیل آن‌ها

نتایج به دست آمده از آزمایش‌های RCPT، RCMT و مقاومت الکتریکی ویژه در جدول ۳ ارائه شده است. همان طور که مشخص است نتایج به دست آمده برای مخلوط‌های مختلف دارای بازه وسیعی می باشند. به طور مثال برای آزمایش RCPT، شار عبوری از ۶۱۷۸ کولمب برای مخلوط حاوی ۱۵ درصد سرباره در سن ۲۸ روزه تا ۶۲۱ کولمب برای مخلوط حاوی ۱۰ درصد دوده سیلیسی در سن ۹۰ روز را در بر می گیرد. علی‌رغم نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۳۸ مقدار شار عبوری برای مخلوط کنترل در سن ۲۸ روزه برابر ۵۳۹۸ کولمب تعیین شده است.

کاربرد ۷/۵ درصد دوده سیلیسی باعث شده است تا در آزمایش RCPT جریان عبوری مخلوط کنترل از ۵۳۹۸ کولمب به ۱۴۰۱ کولمب کاهش پیدا کند. از این رو مقدار جریان عبوری، ۲۶ درصد مخلوط کنترل بوده و تقریباً ۴ برابر کاهش پیدا کرده است. اما براساس آزمایش RCMT کاربرد ۷/۵ درصد دوده سیلیسی باعث کاهش نرخ جریان مخلوط کنترل از $0.255 \text{ mm}/(V \text{ hr})$ به $0.1605 \text{ mm}/(V \text{ hr})$ شده است که معادل ۲/۴ برابر کاهش نسبت به مخلوط کنترل می باشد. بر این اساس هرچند روند عملکرد ۷/۵ درصد دوده سیلیسی در

بهبود مقاومت در برابر نفوذ یون کلر در دو آزمایش RCPT و RCMT مشابه است، اما اختلاف دو آزمایش در تعیین مقدار بهبود در عملکرد بسیار قابل توجه است.

برخلاف آزمایش‌های RCPT و RCMT که کاهش جریان عبوری و یا کاهش در نرخ نفوذ یون کلر نشانگر بهبود عملکرد مخلوط می باشند، در آزمایش تعیین مقاومت الکتریکی بتن، کاهش مقاومت الکتریکی ویژه نشانگر افت عملکرد مخلوط است. برای امکان اعمال رویه یکسان در مقایسه عملکرد آزمایش‌های مختلف انجام شده، مقایسه عملکرد مخلوط‌ها براساس شاخص هدایت الکتریکی انجام گرفته است. مقادیر هدایت الکتریکی مخلوط‌های مختلف در جدول ۳ ارائه شده است.

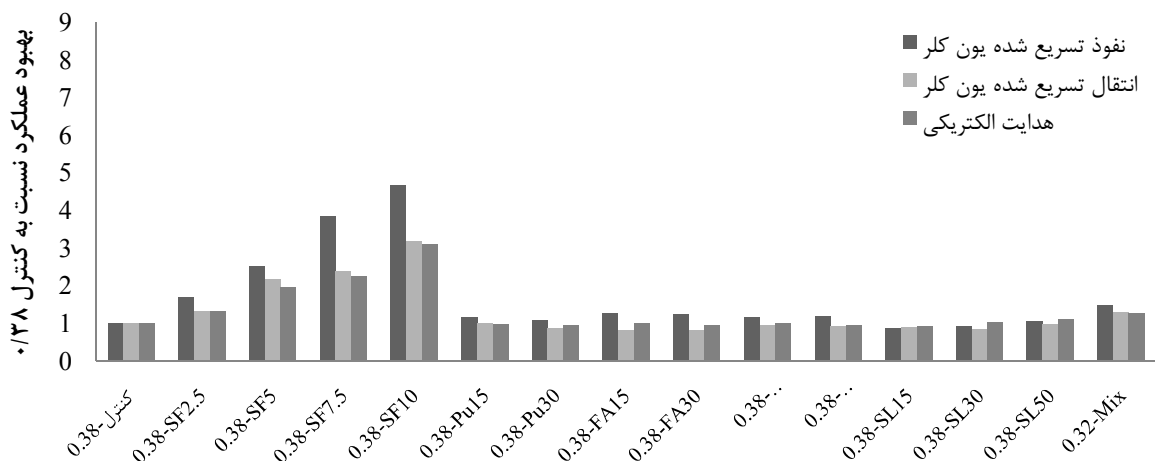
براساس نتایج به دست آمده در اثر کاربرد ۷/۵ درصد دوده سیلیسی هدایت الکتریکی مخلوط کنترل از ۰/۰۲۱۱ $1/\Omega.m$ به ۰/۰۰۹۴ $1/\Omega.m$ کاهش پیدا کرده است. این نتیجه نشانگر حدود ۲/۲ برابر کاهش نسبت به مخلوط کنترل است که انطباق مناسبی با نتیجه آزمایش RCMT دارد.

برای امکان مقایسه عملکرد سه آزمایش RCPT، RCMT و هدایت الکتریکی، نتایج این آزمایش‌ها روی مخلوط‌های مختلف به صورت بهبود در عملکرد نسبت به مخلوط کنترل در شکل‌های ۳ و ۴ به ترتیب برای سنین ۲۸ و ۹۰ روزه ارائه شده است. هر سه آزمایش برای مخلوط‌های حاوی دوده سیلیسی در سن ۲۸ روزه عملکرد بهتری را در مقایسه با مخلوط کنترل نشان می دهند. با توجه به سریع بودن واکنش‌های پوزولانی دوده سیلیسی که در سن ۲۸ روز بخش قابل توجهی از آن صورت می گیرد، نتایج به دست آمده براساس انتظار می باشد. اما مقدار بهبود در عملکرد براساس آزمایش RCPT به طور محسوسی بالاتر از آنچه دو آزمایش دیگر نشان می دهند، می باشد. عملکرد بهتر مخلوط‌های حاوی مواد افزودنی معدنی به خصوص دوده سیلیسی در

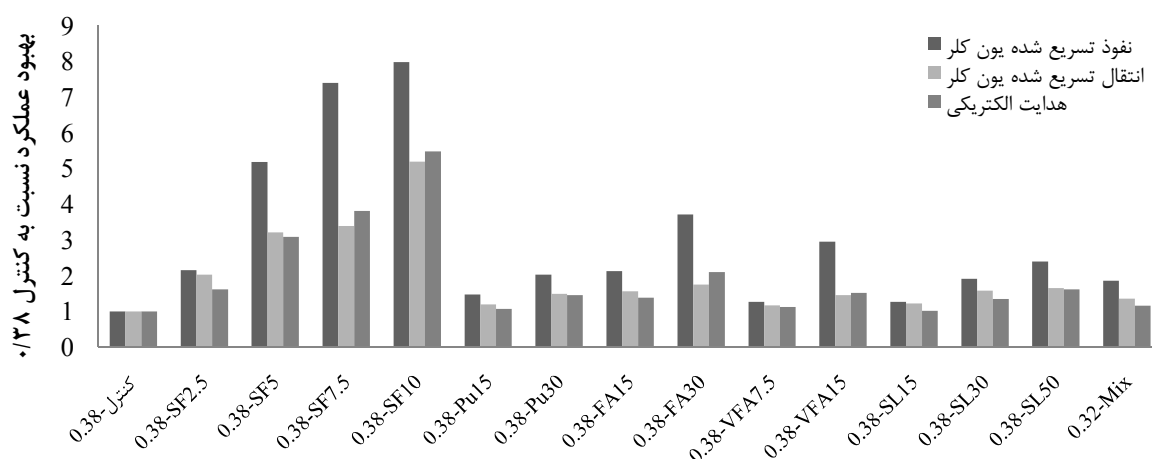
آزمایش RCPT در مقایسه با عملکرد واقعی بتن نظیر آنچه در آزمایش‌های بلند مدت نفوذ یون کلر حاصل می‌شود، به‌وسیله برخی محققان دیگر نیز گزارش شده است. عملکرد متفاوت آزمایش RCPT در مقایسه با دو آزمایش دیگر به کار رفته در این تحقیق، بررسی می‌شود.

جدول (۳) نتایج RCPT، RCMT، مقاومت الکتریکی و هدایت الکتریکی

نام طرح	شار عبوری (کولمب)		نرخ نفوذ یون کلر ($mm/(V hr)$)		مقاومت الکتریکی ویژه ($\Omega.m$)		هدایت الکتریکی ($1/\Omega.m$)	
	۲۸ روزه	۹۰ روزه	۲۸ روزه	۹۰ روزه	۲۸ روزه	۹۰ روزه	۲۸ روزه	۹۰ روزه
کنترل-0.38	۵۳۹۸	۴۹۵۶	۰.۰۶۰۵۰	۰.۰۵۳۰۰	۴۷.۴	۶۸.۱	۰.۰۲۱۱	۰.۰۱۴۶۸
0.38-SF2.5	۳۲۱۴	۲۲۹۸	۰.۰۴۵۸۹	۰.۰۲۶۱۹	۶۳.۰	۱۱۰.۰	۰.۰۱۵۹	۰.۰۰۹۱
0.38-SF5	۲۱۶۰	۹۵۵	۰.۰۲۸۰۷	۰.۰۱۶۴۸	۹۲.۰	۲۱۰.۰	۰.۰۱۰۹	۰.۰۰۴۸
0.38-SF7.5	۱۴۰۱	۶۷۰	۰.۰۲۵۵۰	۰.۰۱۵۶۱	۱۰۶.۷	۲۴۰.۰	۰.۰۰۹۴	۰.۰۰۳۸
0.38-SF10	۱۱۵۶	۶۲۱	۰.۰۱۸۹۸	۰.۰۱۰۲۰	۱۴۶.۷	۳۷۳.۳	۰.۰۰۶۸	۰.۰۰۲۷
0.38-Pu15	۴۶۸۴	۳۳۷۰	۰.۰۶۰۷۷	۰.۰۴۴۲۷	۴۶.۲	۷۲.۹	۰.۰۲۱۷	۰.۰۱۳۷
0.38-Pu30	۴۹۷۱	۲۴۴۲	۰.۰۶۸۹۶	۰.۰۳۵۴۸	۴۵.۱	۹۸.۷	۰.۰۲۲۲	۰.۰۱۰۱
0.38-FA15	۴۲۴۵	۲۳۳۲	۰.۰۷۴۸۵	۰.۰۳۳۸۸	۴۷.۳	۹۴.۳	۰.۰۲۱۱	۰.۰۱۰۶
0.38-FA30	۴۳۹۹	۱۳۳۵	۰.۰۷۴۱۶	۰.۰۳۰۳۵	۴۵.۲	۱۴۳.۳	۰.۰۲۲۱	۰.۰۰۷۰
0.38-VFA7.5	۴۶۳۷	۳۹۰۳	۰.۰۶۴۶۶	۰.۰۴۵۵۹	۴۶.۹	۷۶.۵	۰.۰۲۱۳	۰.۰۱۳۱
0.38-VFA15	۴۵۲۶	۱۶۸۰	۰.۰۶۶۹۵	۰.۰۳۶۴۴	۴۴.۷	۱۰۳.۰	۰.۰۲۲۴	۰.۰۰۹۷
0.38-SL15	۶۱۷۸	۳۹۰۹	۰.۰۶۸۲۰	۰.۰۴۳۴۹	۴۳.۳	۶۹.۳	۰.۰۲۳۱	۰.۰۱۴۴
0.38-SL30	۵۸۲۹	۲۵۹۵	۰.۰۷۱۰۰	۰.۰۳۳۶۰	۴۷.۹	۹۱.۵	۰.۰۲۰۹	۰.۰۱۰۹
0.38-SL50	۵۱۱۲	۲۰۶۷	۰.۰۶۲۵۷	۰.۰۳۲۱۷	۵۲.۰	۱۱۰.۰	۰.۰۱۹۲	۰.۰۰۹۱
0.32-Mix	۳۶۵۵	۲۶۶۸	۰.۰۴۷۰۰	۰.۰۳۹۰۰	۶۰.۳	۷۹.۱	۰.۰۱۶۶	۰.۰۱۲۶



شکل (۳) بهبود عملکرد مخلوط‌های مختلف نسبت به مخلوط کنترل ($w/c = 0.38$) براساس نتایج آزمایش‌های RCPT، RCMT و هدایت الکتریکی در سن ۲۸ روزه



شکل (۴) بهبود عملکرد مخلوط‌های مختلف نسبت به مخلوط کنترل ($w/c = 0.38$) براساس نتایج آزمایش‌های RCPT، RCMT و هدایت الکتریکی در سن ۹۰ روزه

سن ۲۸ روزه تأثیر قابل توجهی در بهبود ریزساختار نداشته‌اند و در نتیجه جریان عبوری برای این مخلوط‌ها نیز همانند مخلوط کنترل زیاد بوده است. از این رو افزایش جریان عبوری از این مخلوط‌ها به علت افزایش دمای آزمون به صورت کلی مشابه مخلوط کنترل بوده است. در نتیجه در مقایسه عملکرد آن‌ها با مخلوط کنترل، تفاوت عملکرد ناشی از تفاوت در افزایش دما همانند آن‌چه برای دوده سیلیسی ذکر شد، مشاهده نشد.

در سن ۹۰ روزه هم‌چنان خطای مربوط به افزایش جریان ناشی از افزایش دما در مخلوط کنترل باعث شده است تا آزمایش RCPT در مقایسه با روش‌های RCMT و هدایت الکتریکی عملکرد بالاتری را برای مخلوط‌های حاوی دوده سیلیسی نشان دهد. در سن ۹۰ روزه برای مخلوط‌های حاوی مواد مکمل سیمانی دیگر هر سه آزمایش نشانگر عملکرد بهتر در مقایسه با مخلوط کنترل هستند. در این صورت ارتقاع عملکرد براساس روش RCPT به‌طور محسوسی بیش از آن‌چه روش‌های RCMT و هدایت الکتریکی نشان می‌دهند، می‌باشد.

در جدول ۴ نتایج مقادیر افزایش دما در طی آزمایش RCPT برای مخلوط‌های مختلف در سن ۲۸ روز ارائه شده است. هم‌چنین نسبت جریان عبوری در انتها به ابتدای آزمایش نیز ارائه شده است. همان‌طور که مشخص است برای مخلوط کنترل افزایش دمای بسیار قابل توجه ($38^{\circ}C$) در طی آزمایش و افزایش تقریباً ۲ برابری جریان عبوری در پایان آزمایش در مقایسه با ابتدای آزمایش مشاهده شده است.

مخلوط حاوی ۱۰ درصد دوده سیلیسی تنها باعث افزایش دما برابر $10^{\circ}C$ شده و مقدار جریان در انتهای آزمایش نیز $1/47$ برابر مقدار متناظر در ابتدای آزمایش بوده است. از این روز به نظر می‌رسد که افزایش جریان ناشی از افزایش دما برای بتن کنترل به میزان قابل توجهی بیش از بتن حاوی دوده سیلیسی بوده و در نتیجه عملکرد دوده سیلیسی نسبت به مخلوط کنترل در آزمایش RCPT بالاتر از مقدار واقعی منعکس شده است. برای مخلوط‌های دیگر که حاوی مقادیر مختلف از مواد مکمل سیمانی گوناگون هستند، هر سه آزمایش در سن ۲۸ روزه عملکردی تقریباً مشابه با مخلوط کنترل نشان می‌دهند. با توجه به روند به نسبت کند فعالیت پوزولانی این مواد در

جدول (۴) تغییرات دما در سن ۲۸ روزه آزمایش RCPT

نام طرح	افزایش دما در طی آزمایش (سانتی‌گراد)	نسبت جریان در انتها در مقایسه با شروع آزمایش
کنترل-0.38	۳۸	۱/۹۷
0.38-SF2.5	۲۹	۱/۷۴
0.38-SF5	۲۰	۱/۶۳
0.38-SF7.5	۱۳	۱/۵۶
0.38-SF10	۱۰	۱/۴۷
0.38-Pu15	۴۳	۲/۰۵
0.38-Pu30	۵۱	۲/۱۵
0.38-FA15	۳۰	۱/۷۴
0.38-FA30	۳۲	۲/۰۲
0.38-VFA7.5	۳۴	۲/۰۱
0.38-VFA15	۳۰	۱/۷۷
0.38-SL15	۴۴	۱/۹۹
0.38-SL30	۴۰	۱/۹۲
0.38-SL50	۳۹	۲/۱
0.32-Mix	۲۴	۱/۶۸

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.

با توجه به عدم افزایش دمای بتن در آزمایش RCMT و همچنین مطابقت مناسب گزارش شده به‌وسیله محققان مختلف بین نتایج این آزمایش و آزمایش‌های نفوذپذیری دراز مدت کلر در بتن و با توجه به این‌که تجهیزات و روش به‌کار رفته در آزمایش‌های RCPT و RCMT به لحاظ پیچیدگی و سرعت تقریباً مشابه می‌باشند، استفاده از روش RCMT به جای روش RCPT برای ارزیابی نفوذپذیری در برابر یون کلرید قابل توصیه می‌باشد.

نتایج آزمایش تعیین هدایت الکتریکی بتن مطابقت خوبی با روش RCMT داشته است و با توجه به سرعت بالا و سادگی تجهیزات و سهولت استفاده، به نظر می‌رسد این آزمایش پتانسیل مناسبی برای ارزیابی نفوذپذیری بتن در برابر یون کلرید داشته باشد.

۵- تقدیر و تشکر

نویسندگان از سازمان بنادر و کشتیرانی ایران که با حمایت‌های خود زمینه انجام این تحقیق را فراهم کرده‌اند، تشکر و قدردانی می‌کنند.

۶- مراجع

- [1] AASHTO T 259; "Resistance of concrete to chloride ion penetration"; AASHTO, 2007.
- [2] ASTM C 1556; "Determination of the apparent chloride diffusion coefficient for hardened cementitious mixtures by Bulk diffusion"; ASTM, Vol. 04.02, 2006.
- [3] ASTM C 1202; "Electrical indication of concrete's ability to resist chloride Ion penetration"; ASTM, 2006.

با توجه به توسعه واکنش‌های پوزولانی در سن ۹۰ روز برای این مخلوط‌ها، افزایش جریان ناشی از افزایش دما در آزمایش RCPT کم‌تر شده است. از این رو در مقایسه با مخلوط کنترل عملکرد بالاتری را نسبت به آنچه دو آزمایش دیگر نشان داده‌اند، ارائه می‌دهد. براساس نتایج به‌دست آمده مشخص می‌شود که آزمایش RCPT دارای کاستی مهم افزایش در مقدار جریان عبوری ناشی از افزایش دما می‌باشد.

۴- نتیجه‌گیری

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 نمونه‌های با جریان عبوری زیاد بیش‌تر است. در این صورت استفاده از

- rapid migration procedure"; AASHTO, 2007.
- [14] NT Build 492-99; "Concrete, mortar and cement-based repair materials: Chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments"; NORDTEST.
- [15] Nokken, R., Hooton, R.D.; "Electrical conductivity testing a prequalification and quality assurance tool"; *Concrete International*, pp.58-63, 2006.
- [16] Tang, L.; "Guidelines for practical use of methods for testing the resistance of concrete to chloride ingress"; Report Number: GRD1-2002-71808, 2005.
- [17] Florida method of test for Concrete Resistivity as an Electrical Indicator of its Permeability, Designation: FM 5-578, 2004.
- [18] Lane, S., Detwiler, R.J., Hooton, R.D.; "Testing transport properties in concrete, assessing key indications of durability"; *Concrete International*, pp.33-40, 2010.
- [19] Hooton, R.D., Pun, P., Kojundic, T., Fidjestol, P.; "influence of silica fume on chloride resistance of concrete"; Proceeding PCI/FHWA International Symposium on High Performance Concrete, New Overlays, pp.245-256, 1997.
- [20] Riding, K.A., Poole, J.L., Schindle, A.K., Juenger, M.C.G, Folliard, K.; "Simplified concrete resistivity and rapid chloride permeability tests methods"; *ACI Materials Journal*, Vol.105, No.4, pp.390-394, 2008.
- [4] مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن؛ «آئین نامه ملی پایایی بتن در محیط خلیج فارس و دریای عمان»، تهران: انتشارات مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، ۱۳۸۴.
- [5] Julio-Betancourt, G.A., Hooton, R.D.; "Study of the Joule effect on rapid chloride permeability values and evaluation of related properties of concretes"; *Cement and Concrete Research*, Vol. 34, pp.1007-1015, 2004.
- [6] Gardner T., Stanish K., Alexander M.;" Critical review of rapid chloride test methods for concrete"; *Concrete Beton*, No. 113, pp.11-17, 2006.
- [7] Feldman, R.F., Chan, G.W., Brousseau, R.J.m Tumidajski, P.J.; "Investigation of rapid chloride permeability tests"; *ACI Materials Journal*, Vol. 91, No.2, pp.246-255, 1994.
- [8] Andrade, C.;"Calculation of chloride diffusion coefficients in concrete from Ionic migration measurements"; *Cement and Concrete Research*, Vol. 23, pp.724-742, 1993.
- [9] Buenfeld, N.R., et all; "Chloride transport in concrete subjected to electrical field"; *A.S.C.E. Journal of materials in civil Eng.*, pp.220-228, 1998.
- [10] 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, pp. 537-545, 2004.
- [11] Pfeifer, D. W., McDonald, D. B., and Krauss, P. D.; "The rapid chloride permeability test and its correlation to the 90-day chloride ponding test"; *PCI Journal*, Vol. 39, No. 1, pp. 38-47, 1994.
- [12] Tang L., Sørensen H.E.; "Precision of the Nordic test methods for measuring the chloride diffusion/migration coefficients of concrete"; *Materials and Structures*, Vol. 34, PP 479-485, 2001.
- [13] AASHTO TP 64; "Predicting chloride penetration of hydraulic cement concrete by the