

موضوع: دوام و پایایی بتن و سازه‌های بتنی - کد D

بررسی چهار روش تسریع یافته جهت سنجش نفوذپذیری کلرایدی بتن‌های حاوی دوده سیلیس

علی اکبر رمضانپور^۱، امیررضا پیلوار^۲، سید محمود مطهری^۳، فرامرز مودی^۴، حسین رجایی^۴

^۱ استاد دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، aaramce@aut.ac.ir

^۲ دانشجوی دکتری دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، amir63p@aut.ac.ir

^۳ کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

^۴ استادیار دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

چکیده

در این تحقیق عملکرد چهار روش تسریع یافته ارزیابی بتن در مقابل نفوذ یون کلراید شامل RCPT(ASTM C1202)، RCMT(NT Build 492)، Surface Resistivity(AASHTO TP 95) و MRCPT(AmirKabir University of Technology) مورد بررسی قرار گرفته است. به این دلیل که تأثیر رسانایی مایع منفذی بر نتایج بعضی از آزمایش‌های تسریع یافته مذکور توسط بعضی از محققین مورد اشکال قرار گرفته است، در این تحقیق از دوده سیلیس به‌عنوان ماده جایگزین سیمان به میزان ۷/۵ و ۱۵ درصد استفاده شده است. نتایج چهار روش، کاهش قابل توجهی در نفوذپذیری کلرایدی نمونه‌های بتن حاوی دوده سیلیس نسبت به طرح‌های کنترل در سن ۲۸ روز نشان دادند. به هر حال، دو روش RCPT و Surface Resistivity بطور مشهودی 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 Surface Resistivity بسیار تأثیرگذار می‌باشد و روش MRCPT کمترین تأثیر را از تغییرات رسانایی مایع منفذی می‌پذیرد.

کلمات کلیدی: دوام بتن، نفوذ یون کلراید، روش‌های تسریع یافته، شاخص الکتریکی و مایع منفذی.

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.

۱- مقدمه

همانطور که مشهور است، نفوذ یون کلراید به بتن و خوردگی آرماتورهای مدفون در آن یکی از علل خرابی زودرس سازه‌های بتن آرمه می‌باشد که هر ساله باعث خسارات زیادی می‌شود [۱]. از اینرو، بررسی مقاومت بتن در مقابل نفوذ یون کلراید و اندازه‌گیری ضریب انتشار آن، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

ضریب انتشار یون کلراید در بتن را می‌توان با انجام آزمایش‌هایی مانند [۲] ASTM C1543 و [۳] ASTM C1556 بدست آورد. در این روش‌ها نمونه بتنی در معرض محلول NaCl قرار داده می‌شود و پس از مدت زمان مشخص، به وسیله پودرگیری (پروفیل‌گیری) میزان نفوذ یون کلراید در عمق‌های مختلف بدست آمده و با استفاده از رابطه "فیک"، ضریب انتشار یون کلراید محاسبه می‌شود.

به هر حال این روش‌ها زمان بر و پرهزینه هستند و در عمل غیر کاربردی می‌باشند. در نتیجه روش‌های تسریع یافته‌ای جهت سنجش مقاومت بتن در مقابل نفوذ یون کلراید، ارائه شده است. در برخی از این روش‌ها با تسریع نفوذ یون کلراید توسط میدان الکتریکی، ضریب انتشار یون کلراید بدست می‌آید [۴] (مانند روش RCMT). در برخی دیگر، با استفاده از شاخص‌هایی مانند رسانایی الکتریکی، مقاومت بتن در مقابل نفوذ یون کلراید ارزیابی می‌گردد [۵] (مانند روش‌های RCPT, SR, MRCPT).

اما با توجه به اینکه رسانایی نمونه‌های بتنی در نتایج اکثر روش‌های تسریع یافته ارزیابی نفوذپذیری کلرایدی بتن تاثیرگذار می‌باشد، رسانایی مایع منفذی نمونه‌های بتنی نقش اساسی در نتایج این روش‌ها دارند [۶]. این مسئله در مورد بتن‌های حاوی مواد جایگزین سیمان، مخصوصاً 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. بنابراین، نتایج این روش‌ها در مورد بتن‌های حاوی مواد جایگزین سیمان شاید قابل اطمینان نباشند و باید با احتیاط به تفسیر آن‌ها پرداخت [۵].

همانطور که مشاهده می‌شود، روش‌های مختلفی برای ارزیابی نفوذپذیری کلرایدی بتن وجود دارند که هر کدام دارای معایب و مزایایی می‌باشند که باید با توجه به هدف، بطور آگاهانه انتخاب شوند. هدف از این تحقیق بررسی عملکرد چهار روش تسریع یافته سنجش مقاومت بتن در مقابل نفوذ یون کلراید (RCPT, SR, MRCPT, RCMT) می‌باشد. به این منظور از ۱۲ طرح اختلاط بتن که حاوی سیمان‌های ساده 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 تیپ ۱ در عیارهای ۳۵۰ و ۴۰۰ استفاده گردید. همچنین دوده سیلیس به عنوان ماده جایگزین سیمان به میزان ۷/۵ و ۱۵ درصد، بکار گرفته شد. در جدول ۱ ترکیبات شیمیایی این مواد آورده شده است. برای تمامی طرح‌ها از سنگدانه درشت شکسته شده با حداکثر قطر ۱۹

میلی متر و سنگدانه ریز طبیعی به عنوان ماسه استفاده گردید. وزن مخصوص سنگدانه درشت و ریز به ترتیب 2510 kg/m^3 و 2570 kg/m^3 می باشد. همچنین جذب آب سنگدانه درشت $1/9\%$ و سنگدانه ریز $2/75\%$ می باشد.

برای رسیدن به کارایی مطلوب (اسلامپ ۷ تا ۱۰ سانتی متر) از فوق روان کننده استفاده شد. برای ساخت نمونه های بتنی نیز از آب شرب در ۲ نسبت آب به مواد سیمانی $0/45$ و $0/35$ ، استفاده گردید. قابل ذکر است که اندازه گیری تمامی نسبت ها وزنی بوده است. خلاصه طرح های اختلاط در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۲- طرح های اختلاط

عنوان طرح	عیار مواد سیمانی	آب به مواد سیمانی	درصد جایگزینی دوده سیلیس
P1	۴۰۰	۰/۴۵	۰
P2	۴۰۰	۰/۳۵	۰
P3	۳۵۰	۰/۴۵	۰
P4	۳۵۰	۰/۳۵	۰
P5	۴۰۰	۰/۴۵	۷/۵
P6	۴۰۰	۰/۳۵	۷/۵
P7	۳۵۰	۰/۴۵	۷/۵
P8	۳۵۰	۰/۳۵	۷/۵
P9	۴۰۰	۰/۴۵	۱۵
P10	۴۰۰	۰/۳۵	۱۵
P11	۳۵۰	۰/۴۵	۱۵
P12	۳۵۰	۰/۳۵	۱۵

جدول ۱- ساختار شیمیایی مواد سیمانی مورد استفاده

ترکیبات شیمیایی	سیمان تیپ I	دوده سیلیس
SiO ₂	۲۱/۵۷	۹۵/۱
Al ₂ O ₃	۲/۸۷	۰/۶
Fe ₂ O ₃	۲/۶۵	۱/۱
CaO	۶۱/۶	۱/۰۲
SO ₃	۰	۱/۲
MgO	۳/۹۵	۰/۶
Na ₂ O	۰/۱۲	---
K ₂ O	۰/۵۷	---
P ₂ O ₅	---	---
TiO ₂	---	---
LOI	۲/۲۸	---

۲-۲- آماده سازی و روش انجام آزمایش‌ها

برای ساخت آزمون‌ها، 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، داده می‌شود.

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 [۵]. از تحقیقات تئوری و کارهای آزمایشگاهی انجام شده مشخص است که بین مقاومت الکتریکی بتن و نفوذ یون‌های کلراید رابطه ای وجود دارد [۷]. در حالت کلی، ضریب نفوذ یون کلراید به طور عکس با مقاومت الکتریکی بتن رابطه دارد. در یک ساختار مشخص، قسمت‌های نفوذپذیرتر دارای مقاومت الکتریکی نسبی کمتر و نفوذ یون کلراید بیشتر می‌باشد. همچنین مقاومت الکتریکی با نرخ خوردگی آرماتور بعد از شروع خوردگی در ارتباط است [۸]. 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 نقطه ای [9] Wenner می‌باشد. این روش غیر مخرب، سریع و به سادگی قابل استفاده می‌باشد. در این روش، چهار الکتروود با فواصل مساوی با سطح بتن در تماس قرار می‌گیرد. توسط الکتروودهای خارجی، جریان متناوبی از نمونه عبور داده می‌شود و افت پتانسیل مابین ۲ الکتروود داخلی اندازه‌گیری شده و توسط رابطه (۱) مقاومت الکتریکی ویژه بدست می‌آید.

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

در رابطه فوق ρ مقاومت الکتریکی ویژه $[k\Omega cm]$ ، a فاصله بین الکتروودها $[cm]$ ، v اختلاف پتانسیل $[V]$ و i جریان $[mA]$ می‌باشد.

البته باید گفت که نتایج آزمایش SR متأثر است از ساختار شیمیایی مایع منفذی [۱۰]. 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 استوانه ای 200×100 میلی متری اندازه گیری شد. فاصله الکتروودهای دستگاه مورد استفاده ۵۰ میلی متر بوده و قرائت‌های هر نمونه بر روی چهار ربع محیطی آن انجام گرفت و میانگین آن‌ها بدست آمد.

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

آزمایش RCPT که در [۱۱] ASTM استاندارد شده است، به طور گسترده‌ای در دنیا مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این روش میزان کل بار الکتریکی عبوری از نمونه‌های بتنی اشباع به قطر ۱۰ و ضخامت ۵ سانتی متر در طول ۶ ساعت تحت اختلاف پتانسیل ۶۰ ولت، اندازه گیری می‌شود. نمونه‌های بتنی از یک وجه با محلول NaCl و از وجه دیگر با محلول NaOH در تماس قرار می‌گیرد و با ایجاد اختلاف پتانسیل، جریان الکتریکی از نمونه‌ها عبور کرده و یون‌های کلراید به درون بتن رانده می‌شود. این روش بر این فرض استوار است که میزان جریان عبوری، با قابلیت انتشار یون‌های کلراید 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، ۶، ۱۲]. 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 کلراید از یک سوی نمونه به سوی دیگر آن رسیده باشند که برای حصول این شرط، نیاز به مدت زمان طولانی است [۶]. 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 [۱۲]. همچنین زمانی که از مواد پوزولانی استفاده شود، تغییراتی در مشخصات مایع منفذی به وجود می‌آید که باعث عدم اطمینان به نتایج RCPT می‌شود. 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 یون کلراید 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 میلی متر از نمونه‌های بتنی ۲۰۰×۱۰۰ میلیمتری برش داده شد. بعد از آماده سازی، 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.

۲-۲-۳- Rapid Chloride Migration Test (RCMT)

یکی از روش‌های تسریع یافته نفوذ یون کلراید که عملکرد خوبی از خود نشان داده است و نتایج آن ارتباط خوبی با روش‌های بلند مدت دارد، روش [۱۳] rapid chloride migration test (RCMT) می‌باشد. کلیات این روش که در NT Build [۱۴] استاندارد شده است، شبیه آزمایش RCPT می‌باشد. در این روش برای جلوگیری از افزایش دما در طول انجام آزمایش، اختلاف پتانسیل اعمالی بر اساس جریان اولیه تنظیم می‌شود. همچنین حجم محلول NaCl در تماس با بتن، زیاد در نظر گرفته می‌شود تا تغییرات غلظت یون کلراید در طول انجام آزمایش ناچیز باشد. در این روش برای جلوگیری از تأثیر یون‌های دیگر مانند OH^- بر نتایج، مستقیماً عمق نفوذ یون‌های کلراید با دو نیم کردن نمونه و استفاده از محلول نیترات نقره، بدست می‌آید.

در این تحقیق، این روش مطابق با NT Build 492 در هر یک از سنین آزمایش برای تمامی طرح‌ها انجام شد. نمونه‌ها و آماده سازی آن‌ها مشابه آنچه برای روش RCPT گفته شد می‌باشد با این تفاوت که برای اشباع سازی نمونه‌ها، از آب آهک به جای آب مقطر

استفاده شد. پس از آماده سازی، نمونه‌های بتنی مانند شکل (۱) درون محفظه آزمایش قرار داده و محلول‌های 0.3 M NaOH و $10\% \text{ NaCl}$ در جای مخصوص خود ریخته شد. سپس، توسط الکترودهایی که در دو سر نمونه قرار داده می‌شود، اختلاف پتانسیلی متناسب با جریان عبوری اولیه اعمال و یون‌های کلراید به داخل نمونه رانده می‌شود.



شکل ۱- محفظه دستگاه RCMT

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

یکی دیگر از روش‌های تسریع یافته اندازه‌گیری نفوذپذیری بتن در مقابل یون کلراید روش [۱۵] MRCPT می‌باشد که در دانشگاه صنعتی امیرکبیر ارائه شده است و هدف این روش، رفع معایب آزمایش RCPT بیان شده است. در این روش برای آماده سازی نمونه‌های بتنی، ابتدا نمونه‌ها در دمای 50°C درجه سانتی‌گراد خشک می‌شوند و سپس با استفاده از محلول $23\% \text{ NaCl}$ اشباع می‌گردد.

روش MRCPT بر اساس اندازه‌گیری رسانایی نمونه‌های بتنی که به ریز ساختار منافذ موئین و ساختار شیمیایی مایع منفذی بستگی دارد، شکل گرفته است. در این روش با اشباع سازی 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 ریز ساختار منافذ موئین خود نشان می‌دهند.

البته به دلیل ضخامت کم نمونه‌های بتنی در این روش (25 میلی‌متر)، آن‌ها نمی‌توانند بیانگر رفتار بتن‌هایی با سنگدانه‌های بزرگ در شرایط واقعی باشند. با این وجود در مقایسه با روش RCPT، استفاده از روش MRCPT دارای محاسن بسیاری می‌باشد که از آن جمله می‌توان به شرایط پایدار جریان از همان شروع آزمایش اشاره کرد.

در این تحقیق، در هر سن ۳ نمونه استوانه‌ای با ضخامت ۲۵ و قطر ۱۰۰ میلی متر پس از آماده سازی، 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 به عنوان نتیجه آزمایش گزارش گردید.

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

که در آن σ رسانایی [mS/cm]، i جریان الکتریکی [mA]، v اختلاف پتانسیل [V]، t ضخامت نمونه [cm] و A سطح مقطع نمونه $[cm^2]$ می‌باشد.

۳- نتایج و بررسی

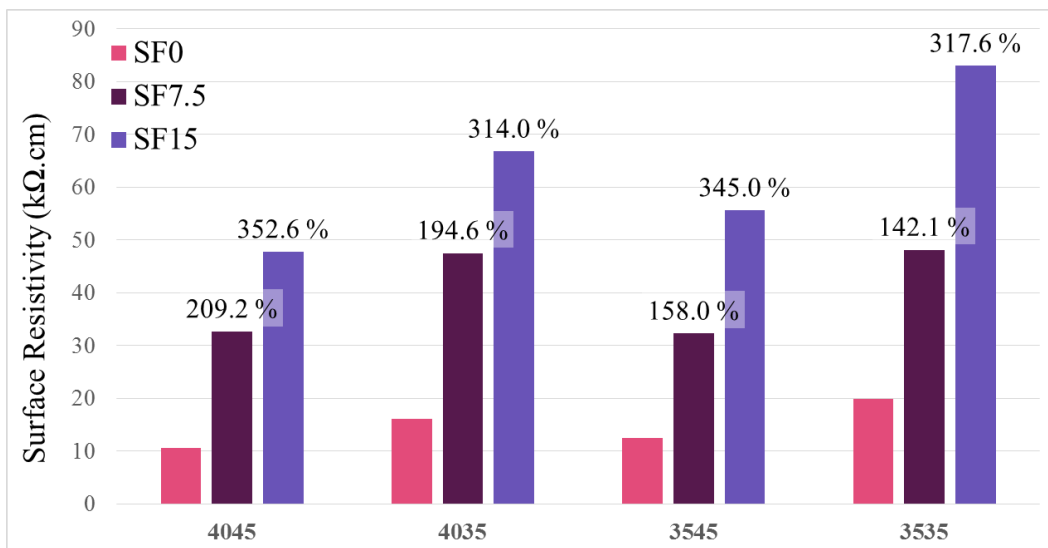
۳-۱- Surface Resistivity Test

مقاومت الکتریکی بتن به هر دو عامل ریز ساختار منافذ و ترکیبات شیمیایی مایع منفذی بستگی دارد [۱۶]. در واقعیت، مقاومت الکتریکی بیانگر قابلیت جابجایی یون‌ها از میان ماتریس بتن می‌باشد. بنابراین می‌تواند شاخص مناسبی برای ارزیابی نفوذپذیری بتن در مقابل یون کلراید 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 آندی، بازی می‌کند [۱۷].

نتایج آزمایش مقاومت الکتریکی سطحی نمونه‌ها در شکل (۲) 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 به عنوان مواد نارسانا در ساختار بتن عمل می‌کنند. بنابراین با افزایش نسبت فاز نارسانای بتن به فاز خمیر سیمان، مقاومت الکتریکی افزایش می‌یابد.

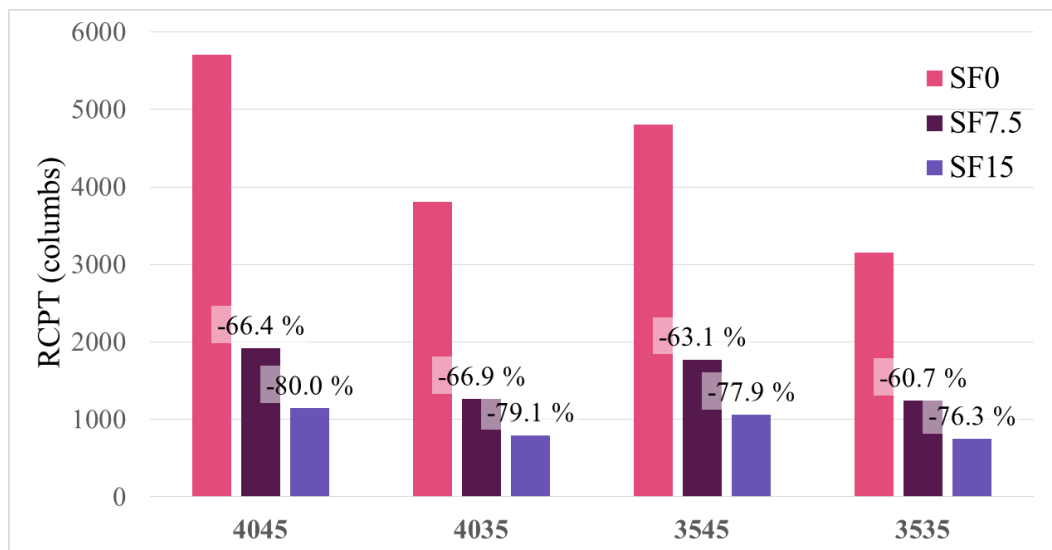
همچنین، به ازاء عیار مواد سیمانی و نسبت آب به مواد سیمانی ثابت، با جایگزینی سیمان با دوده سیلیس، مقدار مقاومت الکتریکی نمونه‌های بتنی افزایش چشمگیری می‌یابد. به عنوان مثال در طرح "۴۰۴۵" با جایگزینی ۱۵ درصد دوده سیلیس، مقاومت الکتریکی نمونه‌های بتنی در سن ۲۸ روز بیش از ۳/۵ برابر افزایش می‌یابد. این پدیده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



شکل ۲- مقاومت الکتریکی ویژه، ۲۸ روزه، (اعداد روی میله‌ها بیانگر میزان افزایش نسبت به نمونه شاهد می‌باشد)

۲-۳ Rapid Chloride Permeability Test

این روش در حقیقت میزان بار الکتریکی عبوری از میان نمونه بتنی را در طول زمان آزمایش به عنوان شاخص نفوذپذیری کلرایدی بتن اندازه گیری می‌کند. نتایج آزمایش RCPT برای تمامی طرح‌ها در شکل (۳) آورده شده است. روند کلی نتایج مانند روش SR می‌باشد و مواردی که در تفسیر نتایج SR گفته شد در اینجا نیز صدق می‌کند.

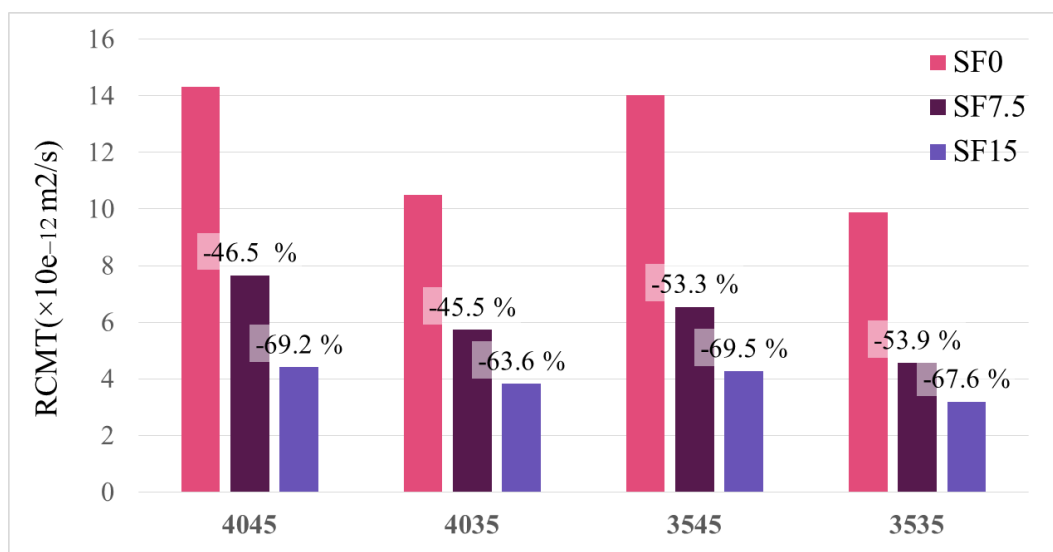


شکل ۳- RCPT، ۲۸ روزه، (اعداد روی میله‌ها بیانگر میزان کاهش نسبت به نمونه شاهد می‌باشد)

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، 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.

۳-۳- Rapid Chloride Migration Test

بر خلاف روش‌های RCPT و SR، در روش RCMT میزان عمق نفوذ یون کلراید مستقیماً اندازه‌گیری می‌شود. بنابراین به نظر می‌رسد نتایج این روش شاخصی مناسب‌تر برای بررسی نفوذپذیری کلرایدی بتن می‌باشد، مخصوصاً برای بتن‌های حاوی مواد جایگزین سیمان (پوزولان‌ها). بر اساس رابطه الکتروشیمیایی ارائه شده در NT Build، ضریب انتشار یون کلراید با استفاده از اختلاف پتانسیل اعمالی، زمان، میانگین دما و عمق نفوذ، بدست می‌آید. نتایج این آزمایش در شکل (۴) آورده شده است.

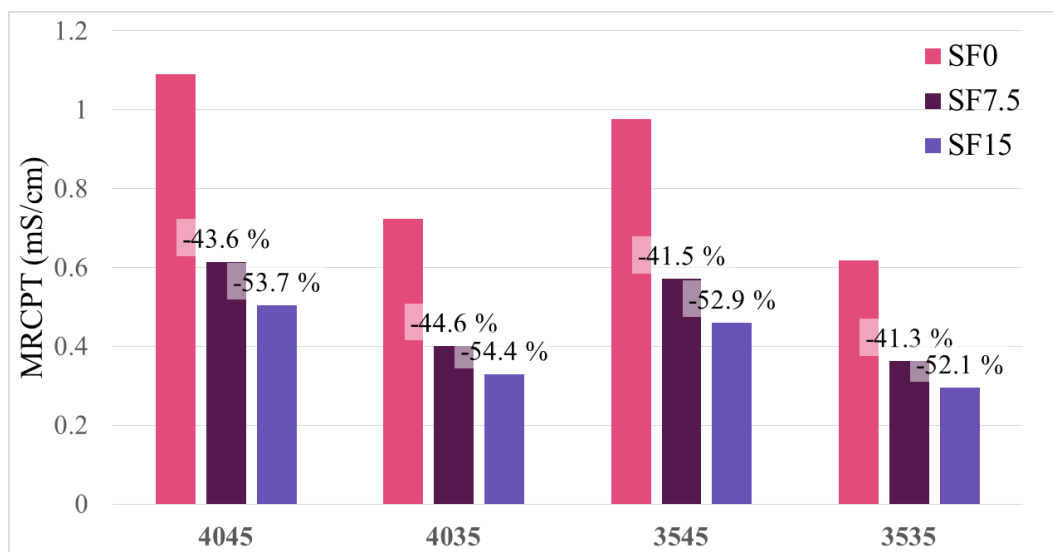


شکل ۴- RCMT، ۲۸ روزه، (اعداد روی میله‌ها بیانگر میزان کاهش نسبت به نمونه شاهد می‌باشد)

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 دوده سیلیس نسبت به نمونه کنترل آن‌ها کمتر است از آزمایش‌های SR و RCPT. حداکثر درصد کاهش ضریب انتشار در اثر جایگزینی دوده سیلیس مربوط به طرح "۳۵۴۵" با ۱۵٪ جایگزینی می‌باشد که ۶۹ درصد محدود شده است. در مجموع می‌توان گفت این روش شاخص بهتری جهت ارزیابی نفوذپذیری کلرایدی بتن‌های حاوی دوده سیلیس نسبت به دو روش RCPT و SR در اختیار ما می‌گذارد.

۴-۳ Modified Rapid Chloride Permeability Test

در این روش ادعا می‌شود که با اشباع سازی نمونه‌های بتنی با محلول NaCl با رسانایی بالا، تأثیر رسانایی مایع منفذی بر نتایج بطور قابل توجهی کاهش می‌یابد و تغییرات نتایج مربوط به تغییرات در ریز ساختار منافذ موئین و نفوذپذیری بتن می‌شود. نتایج آزمایش MRCPT برای تمامی طرح‌ها در شکل (۵) آورده شده است.



شکل ۵- MRCPT، ۲۸ روزه، (اعداد روی میله‌ها بیانگر میزان کاهش نسبت به نمونه شاهد می‌باشد)

همانطور که مشاهده می‌شود با جایگزینی دوده سیلیس، رسانایی نمونه‌ها کاهش می‌یابد ولی این کاهش نسبت به تغییرات نتایج سه آزمایش دیگر کمتر می‌باشد. تعدیل در تغییرات نتایج را می‌توان به اشباع سازی نمونه‌ها با محلول NaCl ۲۳٪ و یکسان بودن نسبی رسانایی مایع منفذی نمونه‌های بتنی مورد آزمایش مربوط دانست. بنابراین می‌توان این ادعا که نتایج این روش حساسیت کمی نسبت به تغییرات رسانایی مایع منفذی بتن‌های مختلف دارد، را درست دانست. حداکثر درصد کاهش رسانایی نمونه‌های بتنی در اثر

جایگزینی دوده سیلیس 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 آنچه در مورد آزمایش SR گفته شد می‌باشد.

۴- نتیجه گیری

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

۱- از نتایج چهار روش به روشی مشاهده می‌شود که استفاده از دوده سیلیس باعث کاهش نفوذ پذیری بتن می‌شود. واکنش‌های پوزولانی دوده سیلیس باعث تراکم ساختار بتن و همچنین مسدود کردن منافذ مویین آن می‌شود.

۲- با توجه به مصرف یون‌های OH در اثر واکنش‌های پوزولانی دوده سیلیس و افت شدید رسانایی مایع منفذی، شاخص نفوذپذیری بتن در دو روش RCPT و SR کاهش شدیدی را در مورد طرح‌های حاوی دوده سیلیس نسبت به طرح‌های کنترل نشان می‌دهد. این امر ضعف این دو روش را در ارزیابی بتن‌های حاوی پوزولان‌های فعال نشان می‌دهد.

۳- در روش RCMT شاخص نفوذپذیری بتن نسبت به دو روش RCPT و SR کاهش کمتری را در مورد طرح‌های حاوی دوده سیلیس نسبت به طرح‌های کنترل نشان می‌دهد. دلیل این امر را می‌توان اندازه‌گیری مستقیم عمق نفوذ یون‌های کلراید و همچنین اشباع سازی نمونه‌های بتنی با آب آهک دانست. در کل، روش RCMT نتایج قابل اطمینان تری نسبت به دو روش RCPT و SR ارائه می‌دهد.

۴- روش MRCPT در بین چهار روش بررسی شده، کمترین حساسیت را نسبت به تغییرات رسانایی مایع منفذی از خود نشان داد و می‌توان گفت که از بین این روش‌ها، بیان بهتری را از عملکرد و نفوذپذیری بتن‌های حاوی دوده سیلیس ارائه می‌دهد. به نظر می‌رسد این روش عملکرد خوبی در ارزیابی بتن‌های حاوی مواد جایگزین سیمان دارد.

۵- هر چهار روش بخوبی تأثیر نسبت آب به مواد سیمانی و همچنین عیار مواد سیمانی را بر نفوذپذیری نمونه‌های بتنی نشان دادند و تقریباً از یک روند یکسان برخوردارند.

۵- مراجع

[۱] 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 International Congress On Durability Of Concrete, 2012.

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

- [۳] ASTM, "C 1556: Standard Test Method for Determining the Apparent Chloride Diffusion Coefficient of Cementitious Mixtures by Bulk Diffusion," ed, 2011.
- [۴] 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.
- [۵] A. A. Ramezaniapour, 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.
- [۶] P. E. Streicher and M. G. Alexander, "A chloride conduction test for concrete," *Cement and Concrete Research*, vol. 25, pp. 1284-1294, // 1995.
- [۷] C. Andrade, "Calculation of chloride diffusion coefficients in concrete from ionic migration measurements," *Cement and Concrete Research*, vol. 23, pp. 724-742, 1993.
- [۸] 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. 81-99, 2002.
- [۹] AASHTO, "AASHTO TP 95: Standard Method of Test for Surface Resistivity Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration," ed: American Association of State and Highway Transportation Officials. ۲۰۱۱ ,
- [۱۰] A. Ramezaniapour, 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. ۲۰۱۴ ,
- [۱۱] 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.
- [۱۲] 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.
- [۱۳] 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.
- [۱۴] N. method, "NT Build 492 : chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments," ed, 1999.
- [۱۵] ع. ا. رمضانپور, ا. پیلوار, م. م. خانی و ف. مودی, "ارائه روشی نوین جهت سنجش نفوذپذیری بتن در مقابل یون کلراید," سومین کنفرانس ملی سالیانه بتن ایران تهران. ۱۳۹۰.
- [۱۶] 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.
- [۱۷] 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.