

کاربرد مقاومت الکتریکی برای بررسی پایداری بتن*

امیررضا پیلوار^(۱) علی اکبر رمضانپور^(۲) مهدی مهدی‌خانی^(۳) فرامرز مودی^(۴)

چکیده یکی از عوامل اصلی خرابی زودرس در سازه‌های بتن مسلح، خوردگی میل‌گردها می‌باشد و مهم‌ترین عامل در افزایش سرعت این تخریب نفوذپذیری بتن به‌شمار می‌رود. از سوی دیگر، روش‌های مختلفی برای ارزیابی نفوذپذیری بتن وجود دارد. با تعیین رابطه‌ای بین این روش‌ها می‌توان مهندسان را در انتخاب روش مناسب ارزیابی و درک بهتر مکانیزم آن‌ها یاری رساند. مقاومت الکتریکی بتن شاخصی مناسب برای ارزیابی نفوذپذیری بتن و مقاومت آن در مقابل نفوذ یون کلراید می‌باشد. این روش کاملاً غیرمخرب است و سادگی، سرعت و اقتصادی بودن آن بر کاربرد این روش می‌افزاید. در این تحقیق، به‌منظور یافتن رابطه‌ای مناسب میان مقاومت الکتریکی و نفوذپذیری بتن (مانند نفوذ آب و نفوذ یون کلراید)، آزمایش‌های گوناگونی بر روی ۷۲ طرح اختلاط بتن، انجام شده و روابط میان آن‌ها بیان گردیده است. علاوه بر آن، عوامل تأثیرگذار بر نتایج آزمایش‌ها بیان شده و در مورد محدودیت‌های موجود در برقراری ارتباط بین آن‌ها بحث شده است. نتایج نشان‌دهنده وجود رابطه‌ای توانی مناسبی میان مقاومت الکتریکی بتن و نفوذپذیری آن می‌باشد. در نتیجه، از نتایج این تحقیق می‌توان دریافت که با دقت مناسبی می‌توان از آزمایش مقاومت الکتریکی به‌منظور تعیین میزان نفوذپذیری نمونه‌های بتنی استفاده نمود.

واژه‌های کلیدی مقاومت الکتریکی، نفوذ پذیری، خوردگی، ریزساختار، دوام، نفوذ تسریع شده یون کلراید.

Using Resistivity to Evaluate Durability of Concrete

A.R. Pilvar A.A. Ramezani pour M. Mahdikhani F. Moodi

Abstract One of the main factors of premature deterioration of concrete structures is the corrosion of reinforcements. Chloride penetration of concrete is one of the main reasons of this phenomenon. Therefore, to have durable structure, it is necessary to have concretes with low permeability. There are various methods to evaluate permeability of concrete. Finding a relationship between them can be useful for understanding the mechanism of corrosion. Concrete resistivity test is a suitable indicator for concrete penetration and chloride ion permeability. It is a non-destructive, simple, rapid and cheap method that can also be used in site. In this study, various permeability and resistivity tests were carried out on different types of concrete to find a relationship between them. In addition, the main factors affected the resistivity are discussed and the major constraints of relation between resistivity and permeability of concrete are illustrated. Finally, a new method is recommended to eliminate these problems.

Keywords resistivity, permeability, corrosion, microstructure, durability, RCPT

★ تاریخ دریافت مقاله ۹۰/۸/۱۷ و تاریخ پذیرش آن ۹۱/۸/۱۰ می‌باشد.

(۱) نویسنده‌ی مسئول، دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر.

(۲) استاد دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، مرکز تحقیقات تکنولوژی و دوام بتن، دانشگاه صنعتی امیرکبیر.

(۳) دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، مرکز تحقیقات تکنولوژی و دوام بتن، دانشگاه صنعتی امیرکبیر.

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

مقدمه

یکی از عوامل خرابی زودرس سازه‌های بتن‌آرمه، خوردگی فولادهای آن می‌باشد و این مسأله از مهم‌ترین مشکلاتی است که صنعت ساخت و ساز، در رابطه با دوام، با آن مواجه است [1]. معمولاً خوردگی آرماتورها، ناشی از بین رفتن لایه‌ی محافظ (Passive) روی آرماتورها به دلیل نفوذ یون کلراید و یا کربناتاسیون و تشکیل میکروپیل‌های خوردگی می‌باشد. یون‌های کلراید محلول در آب ناشی از استفاده از نمک‌های یخ‌زدا، یون‌های موجود درون خاک، آب دریاها و آب‌های زیرزمینی می‌توانند به بتن نفوذ کنند و به سطح آرماتور برسند. مکانیزم اصلی انتقال یون‌های کلراید در سطح بتن، مخصوصاً وقتی این سطح غیر اشباع باشد، جذب موئینه می‌باشد و تجمع این یون‌ها در لایه‌های سطحی بتن باعث انتقال یون‌ها به صورت انتشار به لایه‌های زیرین می‌شود [2]. بنابراین انتشار، مکانیزم اصلی جابه‌جایی یون‌ها در لایه‌های زیرین بتن می‌باشد. نیروی رانش در انتشار یون‌های کلراید، اختلاف غلظت بین یون‌ها در قسمت‌های مختلف بتن می‌باشد [3]. روش‌های مختلفی برای ارزیابی نفوذ یون کلراید به بتن وجود دارد. در روش‌هایی که فقط بر پایه‌ی انتشار می‌باشند، محدودیت‌هایی وجود دارد. از جمله این محدودیت‌ها، زمان طولانی مورد نیاز برای رسیدن انتشار یون‌های کلراید به حالت پایدار می‌باشد. بنابراین، این روش‌ها برای ارزیابی مقاومت بتن در مقابل نفوذ یون کلراید، عملی نمی‌باشند [4]. در نتیجه، محققان به دنبال پیدا کردن روش‌های تسریع یافته هستند. به عنوان مثال عمل انتشار در روشی که توسط Streicher و Alexander [5]، بیان شده است به وسیله‌ی کاهش ضخامت نمونه‌ها و همچنین افزایش غلظت یون‌های کلراید در یک طرف نمونه، تسریع یافته است. از دهه‌ی ۱۹۷۰ سازمان‌ها و متخصصان سعی کرده‌اند که روش سریع، ارزان و قابل اعتمادی پیشنهاد دهند تا بتوانند میزان

مقاومت بتن در مقابل نفوذ یون کلراید را اندازه‌گیری نمایند. در اواخر دهه‌ی ۱۹۷۰، Whiting [6, 7]، روشی به این منظور معرفی کرد که با نام روش نفوذ تسریع شده‌ی یون کلراید (RCPT) شناخته شده است. اما این روش در واقع رسانایی نمونه‌ها را اندازه‌گیری می‌کند. این روش توسط AASHTO در سال ۱۹۸۳ و ASTM در سال ۱۹۹۱ به صورت استاندارد آورده شده است.

این روش به عنوان شاخصی الکتریکی برای ارزیابی بتن در مقابل نفوذ یون کلراید، میزان جریان عبوری از نمونه‌ها را در طول مدت ۶ ساعت وقتی اختلاف پتانسیل ۶۰ ولت برقرار باشد اندازه‌گیری می‌کند [8]. میزان جریان اندازه‌گیری شده در مقابل زمان، با هم جمع می‌شود و میزان کل بار عبوری در واحد کلمب به دست می‌آید. پنج سطح برای ارزیابی بتن براساس میزان بار عبوری مشخص شده است: زیاد، متوسط، کم، خیلی کم و قابل چشم پوشی.

هرچند روش RCPT به دلیل آسانی آن بسیار مورد استفاده قرار گرفته است، اما در مجامع علمی انتقاداتی نیز به آن وارد شده است [9]. RCPT روشی شاخص است که در آن شرایط پایداری 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. 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 [10]. هم‌چنین تغییراتی که در مشخصات مایع منفذی زمانی که از مواد پوزولانی استفاده می‌شود، به وجود می‌آید باعث عدم اطمینان به نتایج RCPT می‌شود. به علاوه به دلیل ولتاژ نسبتاً زیاد ۶۰ ولت، جریان برقرار شده در حالت پایداری قرار نمی‌گیرد [11]. در نتیجه ممکن است نتایج به دست آمده به درستی بیانگر انتشار یون کلراید نباشد.

هدف از این تحقیق بررسی این موضوع است که آیا می توان مقاومت الکتریکی بتن را به عنوان جایگزینی برای روش های RCPT و عمق نفوذ آب در نظر گرفت و آن را به عنوان شاخصی برای مقاومت بتن در مقابل نفوذ یون کلراید شناخت؟

برنامه ی آزمایشگاهی

مواد و طرح اختلاط. در این تحقیق در مجموع ۷۲ طرح اختلاط ساخته شد و مورد بررسی قرار گرفت. خلاصه طرح های اختلاط و همچنین سنین انجام هر آزمایش در جدول (۱) آورده شده است. برای ساخت نمونه های بتنی از سیمان تیپ ۱ استفاده شده و مواد جایگزین سیمان مورد استفاده شامل ۲ پوزولان طبیعی توف (Tuff) و پومیس (Pumice) و همچنین پوزولان های خاکستر پوسته ی برنج (RHA)، ۳ نوع متاکائولن (Metakaolin) و دوده سیلیس (SF) به علاوه پودر سنگ آهک می باشد. در جدول (۲) ترکیبات شیمیایی این مواد آورده شده است. برای تمامی طرح ها از سنگ دانه ی درشت شکسته شده با حداکثر قطر ۱۹ میلی متر و سنگدانه ی ریز طبیعی به عنوان ماسه استفاده شده است. برای رسیدن به کارایی مطلوب از فوق روان کننده در حد نیاز استفاده شده است. برای ساخت و عمل آوری نمونه های بتنی از آب شرب شهر تهران استفاده شده است. قابل ذکر است که اندازه گیری تمامی نسبت ها وزنی بوده است.

نحوه ی انجام آزمایش ها و آماده سازی نمونه ها. برای خروج حباب های هوا و تراکم بتن، از میز ویرنه استفاده شده است. بعد از بتن ریزی در قالب ها، برای ۲۴ ساعت آن ها را توسط حوله ی نم دار پوشانده و بعد از آن نمونه ها را از قالب ها خارج کرده و آن ها را درون آب حاوی آهک قرار داده ایم تا ضمن عمل آوری از نشت Ca(OH)_2 از بتن به خارج جلوگیری شود.

از طرفی دیگر، مقاومت الکتریکی بتن یکی از خواص ذاتی مستقل بتن می باشد که به میزان رطوبت بتن و ترکیبات آن بستگی دارد [12]. از تحقیقات تئوری و کارهای آزمایشگاهی انجام شده مشخص است که بین مقاومت الکتریکی بتن و نفوذ یون های کلراید رابطه ای وجود دارد [13-15]. در حالت کلی، ضریب نفوذ یون کلراید به طور عکس با مقاومت الکتریکی بتن رابطه دارد. در یک ساختار مشخص، قسمت های نفوذپذیرتر دارای مقاومت الکتریکی نسبی کم تر و نفوذ یون کلراید بالاتر می باشد. همچنین مقاومت الکتریکی با میزان خوردگی آرماتور بعد از شروع خوردگی در ارتباط است. انتقال یون ها بین آند و کاتد در سطح آرماتور یکی از عوامل کنترل کننده میزان خوردگی می باشد [12].

یکی از بهترین روش ها برای اندازه گیری مقاومت الکتریکی بتن، استفاده از دستگاه چهار الکترودی Wenner می باشد. این روش غیر مخرب، سریع و به سادگی قابل استفاده می باشد و به همین دلیل این روش را می توان شاخصی برای ارزیابی بتن از لحاظ نفوذ یون کلراید در نظر گرفت. این وسیله دارای چهار الکترود با فواصل مساوی است که با سطح بتن در تماس قرار می گیرد [16].

عامل اصلی دیگری که در دوام بتن نقش دارد، نفوذپذیری آن می باشد. بتن با نفوذپذیری پایین در مقابل حملات شیمیایی مقاومت به تری نشان می دهد. هنگامی که آب به داخل بتن نفوذ می کند مقداری نمک های محلول را به همراه خود به داخل بتن حمل می کند و وقتی این نمک ها به سطح آرماتور برسند، باعث خوردگی می شوند. در حالت کلی نفوذپذیری کم تر باعث دوام بیش تر بتن می باشد. روش های مختلفی مانند آزمایش نفوذ آب، برای ارزیابی نفوذپذیری بتن مورد استفاده قرار می گیرند و تحقیقات بسیاری درباره ی آن انجام شده و اعتبار این روش ها تأیید شده است [17,18].

جدول ۲ ساختار شیمیایی مواد سیمانی مورد استفاده

Chemical Components	Cement Type I	RHA	Tuff	Pumice	Silica Fume	Limestone	Metakaolin		
							A	B	C
SiO ₂	۲۱/۵	۸۹/۶۱	۶۵/۷۴	۶۷/۷	۹۴/۶۶	۱/۴۷	۷۲/۵	۷۶/۷۳	۶۸/۹۹
Al ₂ O ₃	۳/۶۸	۰/۰۴	۱۲/۲۴	۱۵/۸	۰/۳۱	۰/۲۲	۲۲/۲۱	۱۷/۴۱	۲۰/۴۶
Fe ₂ O ₃	۲/۷۶	۰/۲۲	۲/۰۵	۳/۳۹	۰/۶۰	۰/۲۹	۰/۸۱	۰/۵۹	۰/۹۹
CaO	۶۱/۵	۰/۹۱	۲/۸۷	۳/۹	۰/۳۶	۵۴/۷۷	۲/۲۲	۳/۵۸	۲/۷۵
SO ₃	۲/۵	۰/۱۵	۰	۰/۳۳	۰/۲۳	۰/۰۶	-----	-----	-----
MgO	۴/۸	۰/۴۲	۰/۹۶	۰/۹۹	۰/۷۸	۰/۳	۰/۱۳	۰/۱۹	۰/۵۰
Na ₂ O	۰/۱۲	۰/۰۷	۱/۹۲	۲/۹۵	۰/۲۲	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۵	۲/۸۰
K ₂ O	۰/۹۵	۱/۵۸	۲/۰۲	۲	۰/۲۲	۰/۰۸	۰/۵۵	۰/۳۱	۲/۲۴
P ₂ O ₅	۰/۲۳	۰/۴۱	۰/۰۳	۰/۱۲	-----	۰/۰۱	۰/۰۵	۰/۰۴	۰/۰۵
TiO ₂	۰/۰۴	۰/۰۲	۰/۲۹	۰/۳۳	-----	۰/۰۵	۰/۰۶	۰/۰۶	۰/۰۹
LOI	۱/۳۵	۵/۹۱	۸/۵	۲/۳	۱/۷۷	۴۲/۲۳	۰/۷۶	۰/۸۲	۰/۸۹

۱۰۰ و ضخامت ۵۰ میلی‌متر انجام شد. بر طبق استاندارد، نمونه‌ها در معرض ولتاژ ۶۰ ولت برای مدت ۶ ساعت قرار گرفتند و میزان کل بار عبوری در این مدت محاسبه شد. این عدد به‌عنوان شاخصی برای طبقه‌بندی بتن از لحاظ مقاومت در مقابل نفوذ یون کلراید در نظر گرفته می‌شود.

نتایج آزمایش‌ها و تجزیه و تحلیل آن‌ها

مقاومت الکتریکی و رسانایی، هر دو، جزو خواص فیزیکی مواد هستند که می‌توانند برای ارزیابی کیفیت بتن در ارتباط با دوام مورد استفاده قرار گیرند. تحقیق‌های بسیاری در ارتباط بین مقاومت الکتریکی و نفوذپذیری بتن در مقابل یون کلراید و خوردگی آرماتور انجام شده است [14,15]. از نتایج آشکار است که ارتباط مؤثری بین مقاومت الکتریکی بتن و نفوذپذیری آن برقرار است. مقاومت الکتریکی بتن بیانگر جابه‌جایی یون‌ها -از جمله یون کلراید- درون مایع منفذی بتن می‌باشد. بنابراین انتظار می‌رود ارتباط منطقی بین مقاومت الکتریکی و نفوذپذیری بتن در مقابل یون کلراید وجود داشته باشد. اگر مقاومت الکتریکی بتن زیاد باشد جابه‌جایی یون‌های کلراید در

برای آزمایش مقاومت فشاری از نمونه‌های مکعبی ۱۰۰ میلی‌متری استفاده شد. هم‌چنین از آزمایش عمق نفوذ آب تحت فشار طبق استاندارد BS EN-12390-8 برای ارزیابی نفوذپذیری بتن استفاده شد. در این روش یک وجه نمونه‌ی مکعبی ۱۵۰ میلی‌متری، تحت آب با فشار ۰/۵ مگا پاسکال قرار داده می‌شود. این فشار برای ۷۲ ساعت اعمال می‌شود. پس از اتمام، نمونه‌ها از دستگاه خارج و به ۲ نیم تقسیم می‌شوند. سپس، با توجه به پروفیل نفوذ آب به بتن، حداکثر عمق نفوذ آب ثبت می‌شود و به‌عنوان شاخصی برای نفوذپذیری بتن در نظر گرفته می‌شود. لازم به تذکر است، برای هم‌گرایی بیش‌تر نتایج، در این تحقیق از میانگین عمق نفوذ استفاده شده است.

برای اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی سطحی بتن از دستگاه Wenner چهار الکترودی با فواصل مساوی ۵۰ میلی‌متر استفاده شد. نمونه‌های استوانه‌ای ۱۰۰ × ۲۰۰ میلی‌متری اشباع برای هر سن به‌کار رفت. چهار قراءت بر روی محیط نمونه‌ها انجام شده و میانگین آن‌ها در نظر گرفته شد [19].

آزمایش نفوذ سریع یون کلراید بر اساس استاندارد ASTM C1202 بر روی نمونه‌های استوانه‌ای به قطر

(جدول ۳). در نتیجه، اگر ترکیب شیمیایی مایع منفذی بتن دارای یونهای OH^- زیادی باشد، تأثیر این یونها در انتقال جریان بیش تر از یونهای کلراید می باشد. این امر باعث می گردد که رسانایی نمونه ها بالا رفته و بتن به اشتباه در سطح بتن های با نفوذ پذیری بالای یون کلراید قرار گیرد.

جدول ۳ جدول مقایسه ی رسانایی یونهای OH^- و Cl^- [۲۲]

ردیف	یون	میزان رسانایی
۱	Cl^-	$0.007523 \Omega^{-1}\text{m}^2$
۲	OH^-	$0.019800 \Omega^{-1}\text{m}^2$

در طول آزمایش RCPT به دلیل ولتاژ نسبتاً بالای ۶۰ ولت و مدت زمان نسبتاً طولانی ۶ ساعت، دمای نمونه ها افزایش یافت که این افزایش دما باعث زیاد شدن جریان و در نتیجه مجموع بار عبوری بالاتر می شود. مخصوصاً در بتن های با آب به سیمان بالا، این افزایش دما ممکن است به ریزساختار بتن آسیب رسانده و ساختار شیمیایی مایع منفذی را تغییر داده و بتن را از حالت اولیه خارج سازد. از طرفی، با توجه به وسعت استفاده از آزمایش RCPT ایده ی جایگزینی این آزمایش با آزمایش مقاومت الکتریکی سطحی مطلوب به نظر می رسد. به بیان دیگر تغییر در نحوه ی قراءت داده ها (رسانایی به جای مجموع بار عبوری)، می تواند گزینه ای مناسب برای جایگزینی روش RCPT به شمار آید. روشن است که در صورت این جایگزینی باید ارتباط بین مقاومت الکتریکی سطحی بتن با مجموع بار عبوری در روش RCPT بررسی و تأیید شود.

با فرض ثابت بودن رسانایی نمونه های بتنی در طول آزمایش و بر اساس اصول فیزیکی آزمایش های SR و RCPT، می توان نتیجه گرفت که رابطه ای خطی بین نتایج این دو آزمایش باید برقرار باشد. اما در این تحقیق رابطه ی توانی ($y=ax^b$) با دقت بالا ($R^2=0.88$) بین نتایج این دو آزمایش برای مجموعه وسیعی از نمونه ها به دست آمد (شکل ۱).

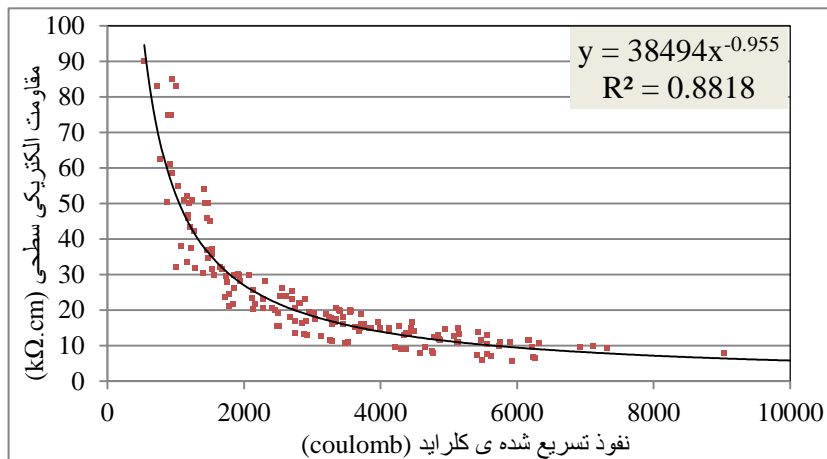
بتن آهسته می باشد و آرماتورهای مدفون در بتن دیرتر دچار خوردگی می شوند و در نتیجه سازه دوام بالاتری دارد و عمر مفید آن افزایش می یابد. نتایج آزمایش های Polder [20] نشان می دهد رابطه ای خطی بین مقاومت الکتریکی و احتمال خوردگی در نمونه های بتنی وجود دارد.

از سوی دیگر، محدودیت هایی در ارتباط بین خاصیت رسانایی بتن با نفوذپذیری آن وجود دارد. رسانایی نمونه های بتنی (σ_{specimen}) طبق رابطه ی (۱)، به دو عامل خصوصیات ریزساختار منافذ موین (F) و رسانایی مایع منفذی (σ_{poresoln}) وابسته است:

$$\sigma_{\text{specimen}} = \sigma_{\text{poresoln}} / F \quad (1)$$

بنابراین، بتنی که با سیمان با پایه ی قلیائیت پایین ساخته شده باشد، نسبت به نمونه بتنی که دارای قلیائیت بالاتری باشد، حتی اگر دارای ساختار منافذ موین یکسانی باشند، رسانایی کم تری از خود نشان می دهد. این موضوع یکی از محدودیت های روش های رسانایی در ارزیابی خاصیت نفوذپذیری بتن ها می باشد [6, 21]. در نتایج آزمایش های RCPT و مقاومت الکتریکی سطحی (SR) مشاهده شد میزان بار عبوری و مقاومت الکتریکی نمونه های بتنی حاوی مواد پوزولانی نسبت به نمونه های شاهد، تا ۴ الی ۵ برابر بهبود یافتند که این نسبت در بهبود عملکرد این بتن ها کم تر می باشد. به علاوه، Shi [23] در تحقیقی تأثیر دوده ی سیلیس را بر رسانایی نمونه های بتنی بررسی کرده و به این نتیجه رسیده است که ممکن است رسانایی نمونه های حاوی دوده ی سیلیس نسبت به نمونه ی شاهد تا ۹۰٪ کاهش یابد.

از آنجایی که رسانایی نمونه های بتنی تا حدودی به ساختار منافذ موین بستگی دارد و بیش تر به ساختار شیمیایی مایع منفذی وابسته است، نتایج به دست آمده به درستی بیانگر جابه جایی یون های کلراید در بتن نمی باشد [22]. برای مثال یون های OH^- دارای قابلیت انتقال بیش تری نسبت به یون های کلراید می باشد



شکل ۱ ارتباط بین نتایج آزمایش‌های RCPT و مقاومت الکتریکی سطحی برای تمامی نمونه‌ها

همان‌طور که در شکل‌های (۳-۵) مشخص است در مورد نمونه‌هایی که از یک نوع مواد سیمانی ساخته شده‌اند رابطه‌ی خوبی به‌دست می‌آید. ولی وقتی مجموعه‌ی نمونه‌های مورد بررسی از مواد سیمانی مختلفی ساخته شده باشند از دقت این رابطه کاسته می‌شود. دلیل این امر را می‌توان این‌گونه بررسی کرد که نتایج آزمایش SR به دو عامل ریز ساختار منافذ موئین بتن و رسانایی مایع منفذی آن بستگی دارد اما نتایج آزمایش عمق نفوذ آب فقط به عامل ریز ساختار منافذ موئین بستگی دارد. در بتن‌های ساخته شده با سیمان‌های آمیخته با پوزولان‌های مختلف، ساختار شیمیایی مایع منفذی دچار تغییرات زیادی می‌شود و رسانایی مایع منفذی بسیار متفاوت است و پراکندگی نتایج SR و نفوذ، بالا می‌رود و دقت رابطه‌ی به‌دست آمده کم می‌شود. اما در مورد نمونه‌هایی که در آن‌ها از یک نوع مواد سیمانی استفاده شده باشد، به‌دلیل شباهت ترکیب شیمیایی مایع منفذی آن‌ها با هم، نتایج بیش‌تر به ساختار منافذ موئین حساس است و نتایج دو آزمایش SR و عمق نفوذ آب رابطه‌ی مناسبی با هم پیدا می‌کنند.

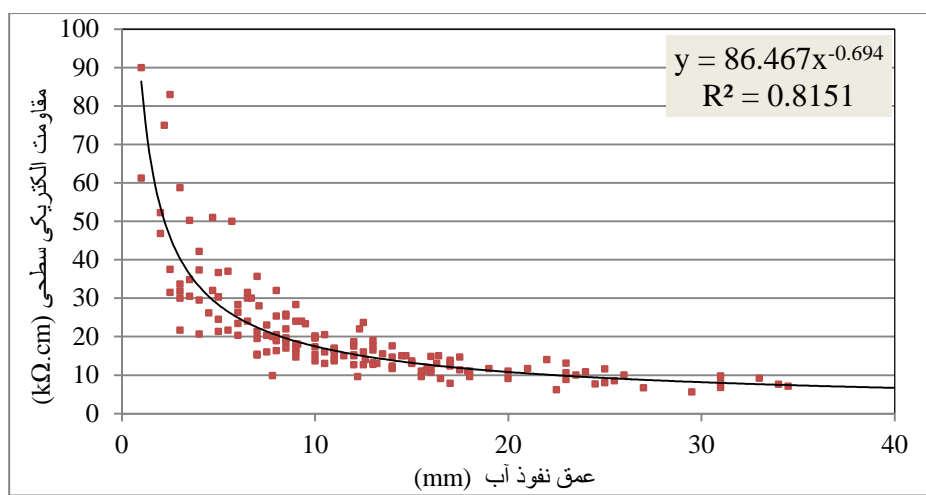
به‌دلیل افزایش دما در طول آزمایش RCPT مقاومت الکتریکی نمونه‌ها کاهش می‌یابد و میزان جریان عبوری در طول آزمایش زیاد می‌شود. در نتیجه رابطه‌ی به‌دست آمده از حالت خطی خارج می‌شود و هرچه رسانایی و نفوذپذیری بیش‌تر باشد، توان رابطه‌ی (b)، کم‌تر می‌شود.

بر اساس تحقیقات Hooton و Betacourt [24]، اگر دمای نمونه‌ها در طول آزمایش RCPT ثابت نگه داشته شود، رابطه‌ی خطی بین رسانایی نمونه‌ها و مجموع بار عبوری با ضریب R^2 برابر ۰/۹۸ به‌دست می‌آید. هم‌چنین آن‌ها پیشنهاد قرائت رسانایی نمونه‌ها را پس از یک دقیقه از شروع آزمایش RCPT، به‌جای قرائت مجموع بار عبوری پس از ۶ ساعت به‌عنوان تصحیحی بر روش RCPT داده‌اند.

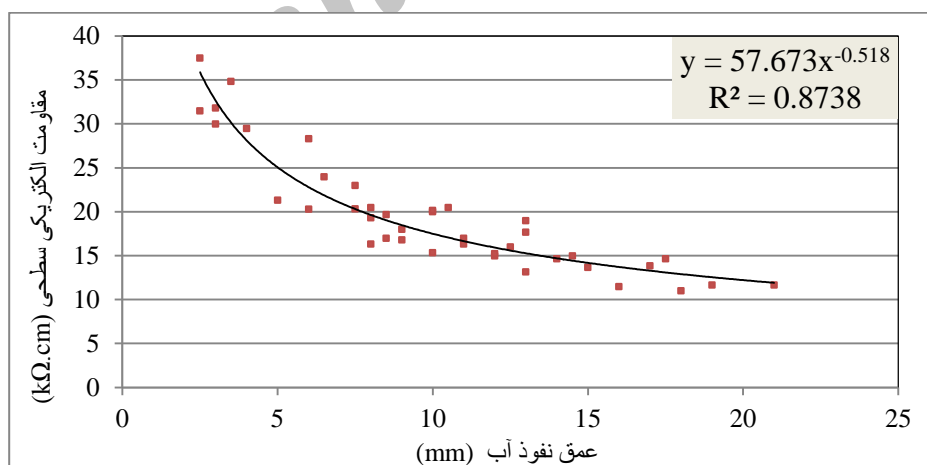
یکی از عوامل اصلی دوام بتن، نفوذپذیری آن می‌باشد. در این تحقیق آزمایش عمق نفوذ آب تحت فشار بر اساس BS-EN:12390-8 برای ارزیابی نفوذپذیری بتن مورد استفاده قرار گرفت. همان‌طور که در شکل (۲) مشاهده می‌شود، رابطه‌ی کلی بین مقاومت الکتریکی بتن و عمق نفوذ آب وجود دارد.

در انتها، با استفاده از روابط به دست آمده، دو مدل برای پیش بینی نتایج آزمایش های RCPT و عمق نفوذ آب تحت فشار، در جدول (۴) ارائه گردیده است. لازم به ذکر است، کارهای انجام شده ی قبلی که در منابع نیز آورده شده است [13,15,24]، بیش تر به مکانیزم های موجود و تأثیر پارامترها پرداخته اند و در مواردی که روابطی آورده شده است، این روابط در مورد طرح های

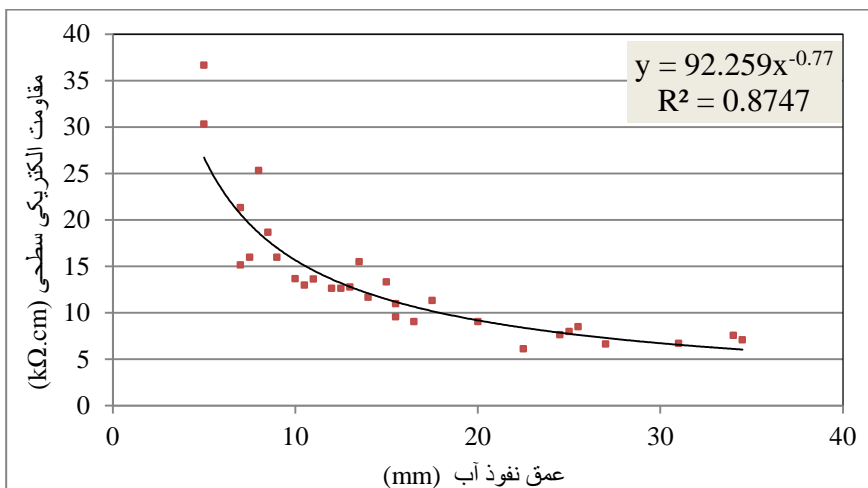
اختلاط محدودی بوده و دارای کلیت نمی باشند. ولی در این تحقیق، همان طور که ذکر گردید، از طرح های اختلاط متنوع و وسیعی برای به دست آوردن روابط استفاده شده است. همچنین، در مورد ارتباط مقاومت الکتریکی و عمق نفوذ آب تحت فشار، می توان گفت این تحقیق منحصر به فرد می باشد.



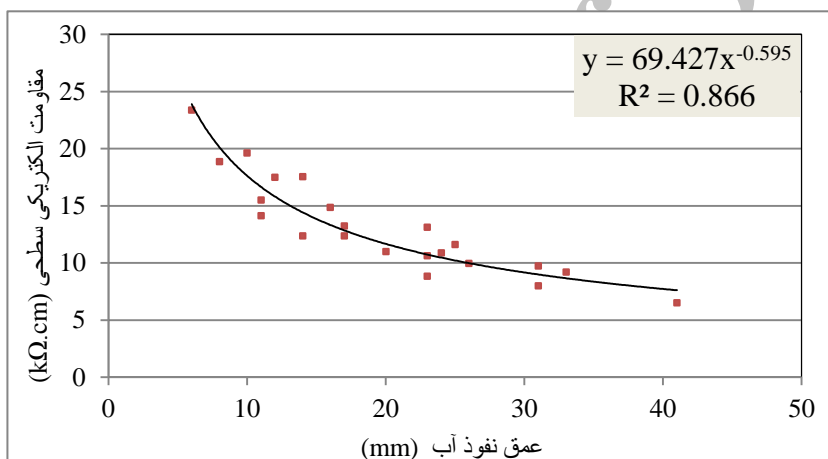
شکل ۲ ارتباط بین نتایج آزمایش های نفوذ آب و مقاومت الکتریکی سطحی برای تمامی نمونه ها



شکل ۳ ارتباط بین نتایج آزمایش های نفوذ آب و مقاومت الکتریکی سطحی برای نمونه های حاوی پودر سنگ آهک



شکل ۴ ارتباط بین نتایج آزمایش‌های نفوذ آب و مقاومت الکتریکی سطحی برای نمونه‌های حاوی متاکاتولن



شکل ۵ ارتباط بین نتایج آزمایش‌های نفوذ آب و مقاومت الکتریکی سطحی برای نمونه‌های حاوی سیمان پرتلند

جدول ۴ مدل‌های پیشنهادی برای پیش‌بینی نفوذپذیری بتن با استفاده از مقاومت الکتریکی سطحی

ردیف	مدل پیشنهادی	R ²	توضیحات
۱	$RCP = 43618(SR)^{-0/923}$	$R^2 = 0/88$	SR: Surface Resistivity[KΩ_Cm], RCP: charge pass through the specimen[coulomb]
۲	$Depth = 287/12(SR)^{-1/174}$	$R^2 = 0/81$	SR: Surface Resistivity[KΩ_Cm], Depth: depth of water penetration[mm]

همبستگی دارند. هم‌چنین، به‌صورت تجربی نیز روابط بین نتایج این دو آزمایش در بازه‌ی وسیعی از طرح‌های اختلاط مورد بررسی قرار گرفت و رابطه‌ی توانی با دقت بالا ($R^2=0/88$) به‌دست آمد.

نتیجه‌گیری

با توجه به وابستگی نتایج آزمایش‌های RCPT و مقاومت الکتریکی سطحی به رسانایی نمونه‌های بتنی، از لحاظ تئوری نتایج این آزمایش‌ها با یکدیگر

با توجه به نتایج به دست آمده و مزایای آزمایش مقاومت الکتریکی سطحی، می‌توان این آزمایش را جایگزینی برای آزمایش RCPT و شاخصی مناسب برای ارزیابی نفوذپذیری بتن در نظر گرفت. در انتها، با استفاده از روابط به دست آمده، دو مدل برای پیش‌بینی نتایج آزمایش‌های RCPT و عمق نفوذ آب تحت فشار ارائه گردید.

قدردانی

از همکاران در مرکز تحقیقات تکنولوژی و دوام بتن دانشگاه صنعتی امیرکبیر به علت فراهم نمودن امکان ساخت و آزمایش‌های مختلف سپاسگزاری می‌گردد.

از طرفی، با توجه به تأثیر ریزساختار منافذ مویین بر رسانایی بتن، رابطه‌ی خوبی با دقت $R^2 = 0/81$ ، بین نتایج آزمایش‌های مقاومت الکتریکی سطحی و عمق نفوذ آب تحت فشار، در بازه‌ی وسیعی از طرح‌های اختلاط به دست آمد. هم‌چنین در مورد طرح‌های اختلاط ساخته‌شده با یک نوع مواد سیمانی، دقت این رابطه بهبود یافت.

بر اساس شکل‌های (۵-۱)، به نظر می‌رسد در مورد نمونه‌های بتنی با نفوذپذیری کم‌تر (RCPT کم‌تر از ۱۵۰۰ کلمب و عمق نفوذ کم‌تر از ۱۰ میلی‌متر)، مقاومت الکتریکی بتن حساسیت بیشتری نسبت به تغییرات نفوذپذیری دارد و تغییرات آن را به خوبی نشان می‌دهد.

مراجع

1. Ramezani pour, A. A., Pilvar, A.R., Mahdikhani, M., Moodi, F., "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).
2. Mc Carter, WJ., Emerson, M., Ezirim, H., "Properties of concrete in the cover zone: developments in monitoring techniques", *Magazine of Concrete Research*, vol. 47 (172): pp. 243-51, (1995).
3. Suryavanshi, AK., Swamy, RN., Cardew GE., "Estimation of diffusion coefficients for chloride ion penetration into structural concrete", *ACI Materials Journal*; vol. 99(5): pp.441-9, (2002).
4. Dhir, RK., Jones, MR., Ahmed, HEH., Seneviratne, AMG., "Rapid estimation of chloride diffusion coefficient in concrete", *Magazine of Concrete Research*, vol. 42(152): pp. 177-85, (1990).
5. Streicher, PE., Alexander, MG., "A critical evaluation of chloride diffusion test methods for concrete", In: *Proceedings of the third CANMET/ACI international conference on concrete durability*, Nice, France., pp. 517-30, (1994).
6. Whiting, D., "Rapid measurement of the chloride permeability of concrete", *Public Roads* 45 (3), pp.101- 112, (1981).
7. Whiting, D., Mitchell, T.M., "History of the rapid chloride permeability test", *Transportation Research Board*, 1335, pp.55- 62, (1992).
8. ASTM C1202, "Standard test method for electrical indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration", (2012).

9. Hale, M., Russell, BW., Bush, TD., "An assessment of the rapid chloride ion penetrability test", In: Proceedings of the international conference on concrete for extreme conditions, Scotland, UK: University of Dundee; pp. 447-56, (2002).
10. Gowripalan, N., Mohamed, HM., "Chloride-ion induced corrosion of galvanized and ordinary steel reinforcement in high-performance concrete", *Cement Concrete Research*; vol. 28(8): pp. 1119-31, (1998).
11. Sharfuddin, A., Kayali, O., Anderson, W., "Chloride penetration in binary and ternary blended cement concretes as measured by two different rapid methods", *Cement and Concrete Composites*, vol. 30(7), pp. 576-58, (2008).
12. Polder Rob, B., Peelen Willy, H. A, "Characterisation of chloride transport and reinforcement corrosion in concrete under cyclic wetting and drying by electrical resistivity", *Cement & concrete composite*, vol. 24(5), pp. 427-435, (2002).
13. Gulikers, J., "Theoretical considerations on the supposed linear relationship between concrete resistivity and corrosion rate of steel reinforcement", *Materials and Corrosion*, 56, No. 6, pp.393-403, (2005).
14. Andrade, C., Sanjuan, MA., Alonso, MC., "Measurement of chloride diffusion coefficient from migration tests", Proceedings of the NACE Corrosion'93, pp.289-298, (1993).
15. Polder, RB., "Chloride diffusion and resistivity testing of five concrete mixes for marine environment", Proceedings of the RILEM International Workshop on Chloride Penetration into Concrete, St-Remy-les-Chevreuses, RILEM, (1997).
16. Kessler Richard, J., Powers Rodney, G., Vivas, E., Paredes Mario, A., Virmani Paul, Y., "surface resistivity as an indicator of concrete chloride penetration resistance", Proceedings of the Concrete Bridge Conference, (2008).
17. Ramezaniyanpour, A.A., Mahdikhani, M., Ahmadibeni, G., "The effect of rice husk ash on mechanical properties and durability of sustainable concretes", *International Journal of Civil Engineering* 7 (2), pp. 83-91, (2009).
18. BS EN-12390-8, "Depth of penetration of water under pressure", British Standards Institution, (2000).
19. FM 5-578, "Florida Method of Test for Concrete Resistivity as an Electrical Indicator of its Permeability", (2004).
20. Polder, R. B., "Critical chloride content for reinforced concrete and its relationship to concrete resistivity", *Materials and corrosion*, Vol. 60 (8), pp. 623 – 630, (2009).
21. Snyder, KA., Ferraris, CF., Martys, NS., Garboczi, EJ., "Using impedance spectroscopy to assess the viability of the rapid chloride test for determining concrete conductivity", *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*; vol. 105(4), pp. 497-509, (2006).

22. Willfried, k., "Rapid chloride permeability testing, a critical review", proceedings of the concrete in hot and aggressive environments, pp. 147-156, (2008).
23. Shi C., Stegemann Julia, A., Caldwell Robert, J., "Effect of Supplementary Cementing Materials on the Specific Conductivity of Pore Solution and its implications on the rapid chloride permeability test results", title No. 95-M36, *ACI Materials Journal*, pp. 389-394, (1998).
24. Julio-Betancourt, G.A., Hooton, R.D, "Study of the Joule effect on rapid chloride permeability values and evaluation of related electrical properties of concretes", *Cement and Concrete Research*, Vol. 34(6), pp. 1007-1015, (2004).

Archive of SID