

## بررسی عملکرد بتن‌های دوجزئی و سه‌جزئی در برابر نفوذ کلرید در بتن

علیرضا باقری<sup>۱</sup>، علی تدین<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup>عضو هیات علمی دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی،

a.bagheri@kntu.ac.ir

<sup>۲</sup>دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران، سازه‌های دریایی، دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی،

alitadayon@mail.kntu.ac.ir

### چکیده

سال‌ها است که دوام بتن به عنوان اساسی‌ترین مسئله در بهره‌برداری سازه‌های بتنی و همچنین اثرات اقتصادی در بخش ساخت و ساز مطرح می‌باشد. در سازه‌های دریایی، نفوذ یون کلرید در بتن، مهم‌ترین عامل در خوردگی میلگردهای فولادی می‌باشد و از زمان شروع خوردگی میلگردها جهت تعیین عمر مفید بهره‌برداری سازه‌های بتن مسلح استفاده می‌شود. به همین جهت می‌توان با بهبود خواص دوامی بتن در محیط‌های خورنده، عمر مفید سازه‌های بتنی را افزایش داد. ویژگی‌های اصلی دوام مستقیماً تابع تعداد، نوع، اندازه، توزیع و نحوه ارتباط منافذ در خمیرسیمان سخت‌شده می‌باشند. در تعیین نفوذ یون کلرید محلول در آب، مهم‌ترین پارامتر اندازه‌گیری ضریب‌انتشار یون کلرید در بتن می‌باشد. آزمایش‌های متعددی برای تعیین ضریب‌انتشار کلرید در بتن ارائه شده است. آزمایش مهاجرت سریع کلرید (RCMT)، روشی است که با استفاده از ایجاد اختلاف پتانسیل در محلول‌های حاوی سدیم کلرید و سدیم هیدروکسید در دو سوی آزمون بتن باعث نفوذ کلرید در بتن می‌شود. این آزمایش با استفاده از عمق نفوذ کلرید در آزمون بتنی، ضریب‌انتشار کلرید را در حالت ناپایدار و با در نظر گرفتن فرضیاتی محاسبه می‌کند. ضریب‌انتشار کلرید در بتن وابسته به تعداد، حجم منافذ موئینه و محتوای شیمیایی محلول منفذی است. بنابراین با افزودن مواد افزودنی شیمیایی نظیر پوزولان‌های دوده‌سیلیسی و یا خاکستر بادی می‌توان مقاومت بتن در برابر نفوذ کلرید در بتن را افزایش داد. از سوی دیگر هر کدام از این دو پوزولان ممکن است ضعف‌هایی در کارایی و روانی بتن تازه و یا نرخ پایین در کاهش نفوذپذیری کلرید در سنین کوتاه‌مدت بتن داشته باشند. با استفاده توأمان دوده‌سیلیسی و خاکستر بادی، بهبود عملکرد بتن در برابر نفوذ یون کلرید نشان داده شده است.

### واژه‌های کلیدی

بتن، دوام، نفوذپذیری، کلرید، دوده‌سیلیسی، خاکستر بادی، بتن سه‌جزئی، عمر مفید

## مقدمه

خوردگی فولاد در سازه‌های بتن مسلح از زیان‌آورترین تخریب‌ها در این سازه‌ها می‌باشد. مهم‌ترین عامل در خوردگی میلگردهای فولادی، تهاجم کلرید به بتن می‌باشد. محیط‌های دریایی مهم‌ترین منبع حملات کلریدی هستند و در این بین خلیج فارس و دریای عمان دارای یون کلرید با غلظت قابل توجهی در دنیا می‌باشند لذا آسیب‌دیدگی زودهنگام سازه‌های بتن مسلح در سواحل جنوبی، باعث مشکلات و زیان‌های غیرقابل جبرانی می‌شود. استفاده از مواد افزودنی معدنی جهت جایگزینی بخشی از سیمان، تأثیر عمده‌ای در بهبود مقاومت بتن در برابر نفوذ کلرید دارد. هدف از پژوهش حاضر، بررسی و مقایسه عملکرد بتن‌های سه‌جزئی حاوی خاکستر بادی و دوده سیلیسی و مقایسه آن با بتن‌های کنترل و دوجزئی با استفاده از پارامتر ضریب‌انتشار یون کلرید در سنین مختلف می‌باشد. با توجه به اینکه در مطالعات مربوط به تعیین عمر مفید سازه‌های بتنی در شرایط کلریدی نیاز به تابع تغییرات زمانی ضریب‌انتشار می‌باشد، برای نتایج آزمایش مهاجرت سریع کلرید (RCMT)، عامل توانی تغییرات زمانی ضریب‌انتشار برای مخلوط‌های مورد مطالعه استخراج گردید.

## نفوذپذیری و اهمیت آن

خرابی بتن شامل خرابی‌های ناشی از عوامل فیزیکی و یا شیمیایی می‌باشد. عملاً، خرابی‌های ناشی از عوامل فیزیکی و یا شیمیایی، تقریباً همیشه به‌خاطر نفوذ سیالات (مایعات و گازها) به داخل بتن است. بنابراین قابلیت کلی نفوذپذیری بتن مخصوصاً در شرایط محیطی خاص، عامل اصلی در تعیین دوام و میزان بهره‌برداری نهایی آن می‌باشد. لذا نفوذپذیری اغلب به عنوان توصیف کننده بتن از نظر پایایی در برابر شرایط نامطلوب مورد استفاده می‌باشد. [۱]. تخلخل کلی، اندازه منافذ، اتصال منافذ به یکدیگر، و درجه اشباع منافذ همگی در ضرایب نفوذپذیری اندازه‌گیری شده تأثیر می‌گذارند [۲ و ۳ و ۴].

نرخ اغلب فرآیندهای تخریبی بتن تحت تأثیر قدرت انتقال‌پذیری آنها از میان بتن می‌باشد. بنابراین ضرورت دارد که ساز و کارهای انتقال مختلفی که ممکن است در تخریب تدریجی یک سازه بتنی رخ دهد شناسایی شوند. انتشار یونی، یکی از رایج‌ترین فرآیندهای نفوذ در بتن و حمله شیمیایی به آن است. انتشار یونی در حقیقت حرکت ماده تحت تأثیر اختلاف غلظت می‌باشد و یا به صورت دقیق‌تر می‌توان گفت انتشار یونی حاصل اختلاف پتانسیل شیمیایی یک محیط با غلظت زیاد با یک محیط با غلظت کم می‌باشد. باید توجه داشت که وقتی در مورد انتقال یون صحبت می‌شود، فقط یون‌های آزاد هستند که در این اختلاف غلظت یا پتانسیل شیمیایی می‌توانند شرکت داشته‌باشند [۵].

عمده نفوذ کلرید در بتن از طریق منافذ موئینه می‌باشد. نفوذ کلرید از طریق منافذ موئینه بزرگ و متوسط و نیز منافذ ژلی بزرگ (منافذ موئیه ریز بسته که کشش سطحی بزرگ دارند) انجام می‌شود و ساده‌ترین راه برای انتشار هستند [۶]. بنابراین منافذ موئینه متصل با ابعاد بیش از ۵۰ ن.م. سهم اصلی را در انتشار کلرید دارند.

## بتن‌های دوجزئی و سه‌جزئی

طبق تعریف، پوزولان‌ها مواد سیلیسی یا سیلیسی آلومینی هستند که به تنهایی دارای قابلیت چسبانندگی نبوده و یا دارای قابلیت چسبانندگی می‌باشند ولی می‌توانند با هیدروکسید کلسیم واکنش دهند و موادی با قابلیت چسبانندگی ایجاد نمایند. افزودن پوزولان‌هایی مانند دوده سیلیسی و خاکستر بادی باعث تبدیل منافذ بزرگ به منافذ ریز می‌گردد. دلیل این رخداد بدین صورت است [۷]:

- واکنش‌های پوزولانی باعث می‌شوند تا آهک‌های حاصل از فرآیند هیدراته شدن سیمان پرتلند، تبدیل به ژل C-S-H شوند و در نتیجه اندازه، پیوستگی و گاه حجم منافذ موئینه در بتن کاهش یابد.

- برخی پوزولان‌ها به دلیلی ریزی بیش‌تر از سیمان پرتلند، می‌توانند در ناحیه انتقالی (فاصله بین خمیر سیمان و سنگدانه) جای بگیرند و همین موضوع باعث تقویت این ناحیه می‌گردد. بنابراین یکی از نقاط ضعف بتن در برابر نفوذ آب، بهبود می‌یابد.

- از آنجایی که پوزولان‌ها در واکنش‌های شیمیایی شرکت می‌کنند، باعث تغییر در غلظت و محتوای شیمیایی محلول‌منفذی بتن می‌شوند. این امر موجب تغییر رفتار بتن در انتقال محلول‌های مهاجم به خصوص در فرآیند انتشار می‌گردد.

## بتن حاوی دوده سیلیسی

در نسبت آب به مواد سیمانی ثابت، در سن ۲۸ روز و ۵۶ روز مقاومت فشاری بتن حاوی دوده سیلیسی بالاتر از مقاومت بتن کنترل بوده است. همچنین نسبت مقاومت ۵۶ روزه به ۲۸ روزه نسبت به مخلوط کنترل کمتر می‌باشد که نشانگر روند سریع‌تر کسب مقاومت در بتن حاوی دوده سیلیسی می‌باشد [۸]. نتایج تحقیقات متعددی نشان می‌دهد که استفاده از دوده سیلیسی در نسبت آب به مواد سیمانی مشابه مخلوط کنترل، تأثیر قابل توجهی بر حجم کل تخلخل ندارد اما ابعاد حفرات و خلل و فرج را

ریزتر می‌کند [۳و۶]. همچنین با توجه به بهبود خواص توسط دوده سیلیسی، عمق نفوذ کلرید، با افزایش جایگزینی دوده سیلیسی به جای سیمان پرتلند کاهش می‌یابد. پژوهش‌ها نشان می‌دهد که عمق نفوذ یون کلرید در تمام سنین آزمایش شده در بتن حاوی دوده سیلیسی کمتر از بتن معمولی می‌باشد [۳].

### بتن حاوی خاکستر بادی

خاکستر بادی به علت کروی بودن شکل ذرات، از اصطکاک زیاد بین دانه‌های سیمان و سنگدانه جلوگیری می‌کند. از سوی دیگر با توجه به اینکه ذرات خاکستر بادی به لحاظ دانه‌بندی مشابه سیمان می‌باشند، تغییر قابل توجهی در سطح ویژه ایجاد نمی‌نمایند و در مجموع کارایی بتن را افزایش می‌دهد [۳]. با توجه به خواص شیمیایی خاکستر بادی، در سنین پایین (تا ۷ روز) روند کسب مقاومت نسبت به بتن کنترل بسیار کند می‌باشد. از این سن به بعد که واکنش‌های پوزولانی خاکستر بادی آغاز می‌شود، کسب مقاومت، سرعت بیشتری به خود می‌گیرد. با علم به تفاوت در ریزی خاکستر بادی و ترکیب شیمیایی آن، ممکن است در سن ۲۸ روز بتن پوزولانی، به مقاومتی برابر با بتن کنترل برسد [۹].

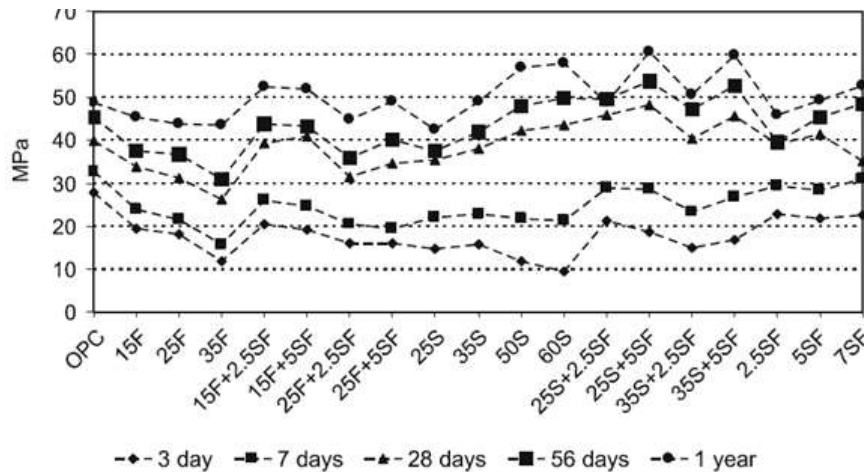
همچنین خاکستر بادی در درازمدت، عمق نفوذ یون کلرید را به مقدار قابل توجهی را کاهش می‌دهد. این کاهش به علت نفوذپذیری کمتر بتن ناشی از واکنش پوزولانی و اندرکنش قوی‌تر بین دیواره منفذی و یون‌های کلرید است.

### بتن حاوی دو پوزولان (بتن سه جزئی)

تأثیر مکمل سیمانی مانند خاکستر بادی و دوده سیلیسی بر روی خواص مکانیکی، دوام و پایایی بتن در تحقیقات متعددی نشان داده شده است. بنابراین با مصرف این مصالح، امکان بهبود قابل توجه در خواص مکانیکی و دوام از طریق واکنش پوزولانی و بهبود ریزساختار وجود دارد. به دلیل تفاوت خواص فیزیکی و شیمیایی مواد مکمل سیمانی مختلف با یکدیگر، سرعت و مکانیزم عملکرد آن‌ها در بتن متفاوت می‌باشد. بسیاری از مواد مکمل سیمانی نظیر خاکستر بادی، علی‌رغم عملکرد خوب به لحاظ ارتقای دوام و خواص مکانیکی در دراز مدت، دارای روند کسب مقاومت کندتر نسبت به سیمان پرتلند هستند. در صورت استفاده از مقادیر قابل توجه از این مواد، جهت دستیابی به خواص مناسب دراز مدت، نفوذپذیری کوتاه مدت آنها، حتی در سن ۲۸ روزه دچار کاهش قابل توجه می‌گردد. در عین حال برخی مواد پوزولانی نظیر دوده سیلیسی، به علت سطح ویژه بسیار زیاد دارای روند سریع‌تر کسب مقاومت در برابر نفوذ کلرید می‌باشند، به نحوی که در سن ۲۸ روزه باعث کاهش نفوذپذیری نسبت به بتن کنترل می‌گردد. از سوی دیگر کاربرد این نوع پوزولان‌ها به ویژه در مقادیر زیاد باعث افت شدید کارایی می‌گردد. فلسفه استفاده از بتن‌های سه جزئی، بهره‌مندی همزمان از مزایای پوزولانهای مختلف با خواص و روندهای متفاوت کاهش نفوذپذیری می‌باشد. علاوه بر بهبود روند کسب مقاومت در برابر نفوذ کلرید، استفاده از ترکیب توأم دو نوع ماده مکمل سیمانی مختلف در مقادیر و نسبت‌های مناسب، امکان بهبود خواص بتن تازه به لحاظ زمان گیرش، میزان کارایی و نرخ افت آن و همچنین خواص بتن سخت شده به لحاظ دوام و مقاومت را فراهم می‌سازد. [۷]

پژوهش‌های کمی، مزیت کاربرد دوده سیلیسی به همراه خاکستر بادی در بهبود خواص مکانیکی و دوامی نشان داده‌اند. به عنوان مثال، نتایج نشان می‌دهد که مصرف دوده سیلیسی به همراه باعث افزایش مقاومت فشاری میان‌مدت و بلندمدت (۲۸، ۷، ۵۶، ۹۱ و ۲۸ روزه) بتن سه جزئی می‌شود. همچنین اثر دوده سیلیسی بر روی مقاومت فشاری بتن در صورت جایگزینی مقادیر زیاد خاکستر بادی، ناچیز گزارش شده است [۱۰].

همچنین در تحقیق دیگری، در شکل ۱، مقاومت فشاری بتن دو جزئی و سه جزئی با بتن معمولی در نسبت آب به مواد سیمانی برابر در سنین ۳، ۷، ۲۸، ۵۶ روز و یک سال مقایسه شده است. بنابراین با مصرف دوده سیلیسی به همراه خاکستر بادی، کاهش مقاومت جبران می‌شود و روند کسب مقاومت بهبود می‌یابد. در سن ۷ روزه مقاومت فشاری بتن سه جزئی حاوی دوده سیلیسی تقریباً برابر با بتن کنترل می‌شود. به هر حال افزودن دوده سیلیسی به بتن حاوی خاکستر بادی، باعث کاهش جزئی تخلخل بتن می‌شود. شایان ذکر است که در بتن سه جزئی ساختار حفرات بتن تغییر می‌کند، اما کاهش مقدار کل حفرات زیاد نمی‌باشد در حالی که حفرات ریزتر می‌شود و پیوستگی آن‌ها کم‌تر می‌گردد [۱۱].



شکل ۱- مقایسه نتایج مقاومت فشاری بتن سه جزئی حاوی دوده سیلیسی و خاکستر بادی [۱۱] - خاکستر بادی (F) و دوده سیلیسی (SF)

از سوی دیگر نشان داده شده است که مقاومت بتن سه جزئی حاوی خاکستر بادی و دوده سیلیسی، نسبت به بتن دوجزئی حاوی خاکستر بادی یا دوده سیلیسی، در برابر نفوذ یون کلرید بیش تر است. نتایج نشانگر آن است که ضریب انتشار یون کلرید بتن سه جزئی حاوی خاکستر بادی و دوده سیلیسی از بتن دوجزئی حاوی خاکستر بادی یا دوده سیلیسی در سنین مختلف کمتر است. همچنین مقایسه غلظت یون کلرید تخمینی در اعماق مختلف براساس ضرایب انتشار یون کلرید در بتن و تغییرات زمانی آن نشان می دهد که غلظت یون کلرید بعد از ۱۰۰ سال در بتن سه جزئی حاوی خاکستر بادی و دوده سیلیسی در عمق ۴ سانتی متری از سطح بتن، ناچیز است. در حالی که در بتن دوجزئی دوده سیلیسی یا خاکستر بادی غلظت یون کلرید در این عمق نزدیک ۰/۱۵ و در بتن کنترل، بیش از ۰/۶ درصد وزنی بتن است [۱۲].

همچنین Thomas و همکاران در سال ۲۰۰۵ نشان دادند که زمان شروع خوردگی میلگرد با ضخامت های مخالف پوشش بتنی، در بتن سه جزئی حاوی ۴ درصد دوده سیلیسی و ۲۰ درصد خاکستر بادی با عملکرد بتن دوجزئی حاوی ۸ درصد دوده سیلیسی و یا حاوی ۲۵ درصد خاکستر بادی، بیش تر است. نتایج، نشانگر عملکرد بهتر مخلوط سه جزئی در مقایسه با مخلوط دوجزئی حتی با مقدار بالاتر دوده سیلیسی می باشد [۱۷]. با توجه به به اهمیت تعیین عامل توانی تغییرات زمانی ضریب انتشار کلرید در مدلسازی عمر مفید مخلوط های مورد مطالعه تحقیق حاضر، از نتایج آزمایش تعیین ضریب انتشار کلرید در مخلوط های سه جزئی انجام گردید.

#### برنامه آزمایشگاهی

در این پژوهش، عملکرد بتن کنترل، دوجزئی حاوی ۷/۵٪ دوده سیلیسی، دوجزئی حاوی ۳۰٪ خاکستر بادی و بتن سه جزئی حاوی ۵٪ دوده سیلیسی و ۱۵٪ خاکستر بادی در برابر نفوذ کلرید با استفاده از آزمایش مهاجرت سریع کلرید (RCMT) در طی زمان بررسی شده است. همه مخلوط ها نسبت آب به سیمان ۰/۳۸ و عیار مواد سیمانی ۴۲۰ کیلوگرم دارد. با استفاده از نتایج آزمایش مهاجرت سریع کلرید در ۵ سن مختلف ۲۸، ۵۶، ۹۰، ۱۸۰ روز و ۱ سال، در مخلوط های کنترل، دوجزئی و سه جزئی، عامل توانی تغییرات زمانی ضریب انتشار با استفاده از رابطه توانی محاسبه شد. جدول ۱، مقادیر مصالح مصرفی در طرح های مخلوط را نشان می دهد.

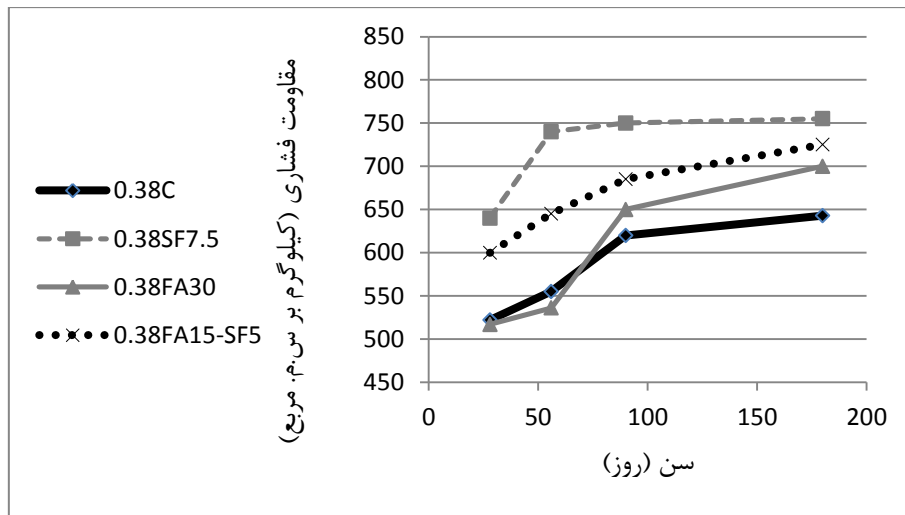
جدول ۱- مقادیر مصالح طرح های مخلوط مورد مطالعه [۱۳]

کد مخلوط	w/b	سیمان	سیلیسی دوده	خاکستر بادی	تین	ماسه	روان کننده فوق
کنترل 0.38C	۰/۳۸	۴۲۰	-	-	۸۷۶	۸۷۶	۸۸۰
0.38SF7.5		۳۸۸	۳۱/۵	-	۸۷۰	۸۷۰	۱۳۴۰
0.38FA30		۲۹۴	-	۱۲۶	۸۶۶	۸۶۶	۶۷۵
0.38FA15-SF5		۳۳۶	۲۱	۶۳	۸۶۲	۸۶۲	۱۲۲۰

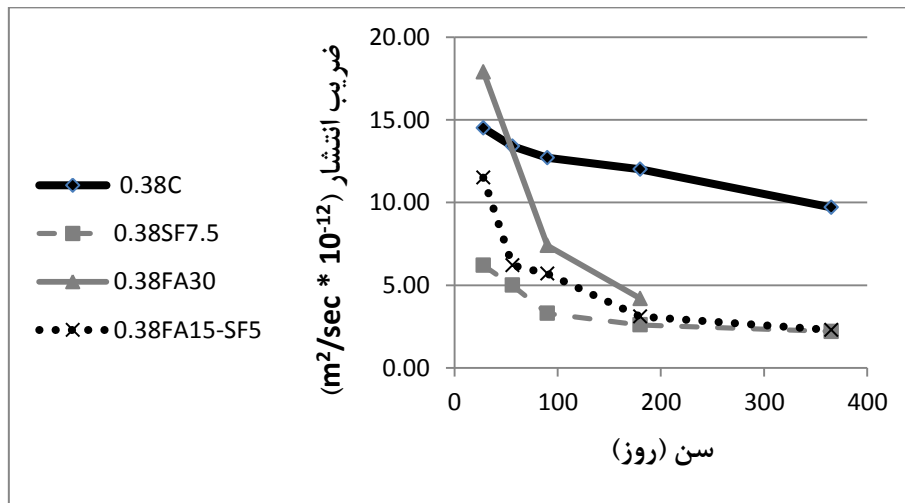
برای تعیین مقاومت فشاری از آزمون‌های مکعبی ۱۰۰ میلی‌متری عمل‌آوری شده در شرایط آزمایشگاهی، طبق استاندارد ISIRI 1608-3 استفاده شد. آزمون‌های آزمایشگاهی در سنین مورد نظر از آب خارج شدند و آزمایش تعیین مقاومت فشاری بر روی آنها به عمل آمد. آزمایش مقاومت فشاری در سنین ۲۸، ۹۰ و ۱۸۰ روز انجام شده است که در شکل ۲ نشان داده شده است. جهت اندازه‌گیری نفوذ کلرید در بتن از آزمایش مهاجرت سریع کلرید طبق استاندارد AASHTO T357 استفاده شد. با استفاده از نتایج و با توجه به روابط موجود، می‌توان ضریب انتشار را با استفاده از نتایج این آزمایش محاسبه نمود [۱۴]:

$$D_{nssm} = \frac{R.T}{z.F.E} \times \frac{x_d - \alpha\sqrt{x_d}}{t}, \quad E = \frac{U-2}{L}, \quad \alpha = 2 \cdot \sqrt{\frac{R.T}{z.E.F}} \cdot \text{erf}^{-1}\left(1 - \frac{2C_d}{C_0}\right)$$

که در این رابطه،  $D_{nssm}$ : ضریب مهاجرت در حالت ناپایدار [m<sup>2</sup>/s]،  $z$ : مقدار مطلق والانس یون، برای کلرید  $z=1$ ،  $F$ : ثابت فارادی [J/(V.mol)]،  $U$ : مقدار مطلق ولتاژ آزمایش (پس از تنظیم) [V]،  $R$ : ثابت گازها [J/(K.mol)]،  $T$ : میانگین دمای آزمایش [K]،  $L$ : ضخامت آزمون [m]،  $x_d$ : عمق متوسط نفوذ یون کلرید [m]،  $t$ : زمان آزمایش [s]،  $\text{erf}^{-1}$ : معکوس تابع خطا،  $N = Cd$ ،  $0.07$ ،  $0.07$ : غلظت کلرید که با نیترات‌نقره تغییر رنگ می‌دهد،  $N \sim C_0$  ۲: غلظت کلرید محلول کاتولیت است.



شکل ۲- نتایج آزمون مقاومت فشاری آزمون‌های مکعبی ۱۰×۱۰ [۱۳]



شکل ۳- ضریب انتشار بدست آمده از نتایج آزمایش مهاجرت سریع کلرید [۱۳]

برای پیش‌بینی عملکرد مخلوط‌های بتنی در برابر نفوذ کلرید در درازمدت، نیاز به دانستن تغییرات زمانی ضریب‌انتشار وجود دارد. در مدل‌سازی عمرمفید سازه‌ها در شرایط کلریدی معمولاً از روابط توانی برای تخمین تغییرات زمانی ضریب‌انتشار بر اساس نتایج ضریب‌انتشار در سن مرجع استفاده می‌شود. با برازش آماری نتایج آزمایشگاهی ضرایب‌انتشار RCMT در سنین مختلف، می‌توان بر اساس رابطه زیر عامل توانی تغییرات زمانی ضریب‌انتشار را برای هر طرح بدست آورد:

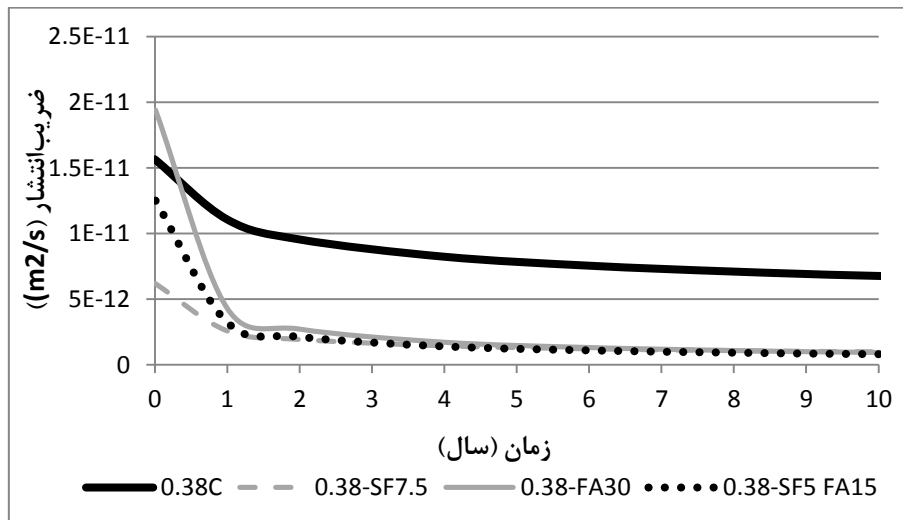
$$D_{RCMT}(t) = D_{RCMT}^{ref} \left( \frac{t_{ref}}{t} \right)^k$$

در این رابطه،  $D_{RCMT}^{ref}$ ، ضریب‌انتشار پایه (۲۸ روز)،  $t_{ref}$ ، سن پایه (۲۸ روز) و  $k$ ، عامل توانی تغییرات زمانی ضریب‌انتشار بر اساس نتایج آزمایش مهاجرت سریع کلرید در آزمایشگاه می‌باشد. در جدول ۲، نتایج برازش نتایج آزمایشگاهی ارائه شده است. در شکل ۴ نیز تغییرات ضریب‌انتشار مخلوط‌های مختلف بر اساس عامل توانی محاسباتی در جدول ۲، ارائه شده است.

جدول ۲- عامل توانی ( $k$ ) تغییرات ضریب‌انتشار بر پایه ضریب‌انتشار ۲۸ روز

طرح	$D_{rcmt}(28)$	$k_{28}$	$r^2$ *
0.38C	۱۴/۵	۰/۱۹۳	۰/۹
0.38SF7.5	۶/۲	۰/۴۲۲	۰/۹۵
0.38FA30	۱۹/۴	۰/۶۵۰	۰/۹۹
0.38FA15-SF5	۱۲/۵	۰/۶۰۷	۰/۹۸

\* ضریب دقت برازش



شکل ۴- تخمین ضریب‌انتشار در طول زمان برای مخلوط‌های مورد مطالعه [۱۳]

## نتیجه گیری

۱. مقاومت فشاری بتن دوجزئی حاوی دوده‌سیلیسی و بتن سه‌جزئی در سن کم (۲۸ روز) از مخلوط‌های دیگر بزرگتر است، در صورتی که مخلوط دوجزئی حاوی خاکستر بادی کمترین مقدار را دارد. در سن یک سال، به ترتیب بتن‌های دوجزئی دوده‌سیلیسی، سه‌جزئی، دوجزئی حاوی خاکستر بادی و بتن کنترل بیش‌ترین مقاومت فشاری را کسب کرده‌اند.

۲. با توجه به نتایج آزمایشگاهی، ضریب‌انتشار مخلوط دوجزئی حاوی دوده‌سیلیسی در سن کم (۲۸ روز) کمترین مقدار (حدود  $6 \times 10^{-12}$  مترمربع بر ثانیه) را دارد و مخلوط سه‌جزئی بعد از این مخلوط دارای بهترین عملکرد می‌باشد. در سن ۲۸ روز ضریب‌انتشار مخلوط دوجزئی حاوی خاکستر بادی حتی از بتن کنترل نیز مقدار بیش‌تری دارد (حدود  $18 \times 10^{-12}$  مترمربع بر ثانیه). بعد از گذشت ۲ ماه، بتن دوجزئی حاوی خاکستر بادی بیش‌ترین کاهش در ضریب‌انتشار اندازه‌گیری شده را نشان می‌دهد، هرچند همچنان از مخلوط‌های دوجزئی حاوی دوده‌سیلیسی و سه‌جزئی ضریب‌انتشار بیش‌تری دارد. در سن ۶ ماه، ضریب‌انتشار

بتن دوجزئی حاوی دوده سیلیسی و بتن سه جزئی تقریباً برابر یکدیگر (حدود  $2/2 \times 10^{-12}$  مترمربع بر ثانیه) می باشد و ضریب انتشار بتن حاوی خاکستر بادی به میزان کمی بیش تر از آن ها می باشد. بتن کنترل در فاصله ۲۸ روز تا ۱ سال تغییرات زیادی ندارد و از مقدار  $15 \times 10^{-12}$  تا  $10 \times 10^{-12}$  مترمربع بر ثانیه کاهش خواهد یافت. بنابراین بتن حاوی خاکستر بادی به علت سرعت کم پوزولانی در سن کم، ضریب انتشار بزرگتری نسبت به مخلوط های دیگر دارد. از سوی دیگر مخلوط حاوی دوده سیلیسی در سن کم فعالیت پوزولانی زیادی دارد و باعث کاهش ضریب انتشار قابل توجهی نسبت به بتن کنترل شده است. در سن ۱ سال، ضرایب انتشار مخلوط های پوزولانی مشابه یکدیگر می باشند.

۳. بتن حاوی دوده سیلیسی و کنترل، کمترین تغییرات ضریب انتشار را دارند و شاخص توانی تغییرات زمانی ضریب انتشار به ترتیب حدود ۰/۴ و ۰/۲ بدست آمد. از سوی دیگر این مقدار برای بتن دوجزئی حاوی خاکستر بادی حدود ۰/۶۵ محاسبه شد. بنابراین همانطور که قبلاً ذکر شد، به علت سرعت واکنش پوزولانی کمتر خاکستر بادی در سنین کم، بهبود عملکرد بتن حاوی خاکستر بادی در سنین بعد از ۲ ماه بسیار زیاد است در حالی که بتن حاوی دوده سیلیسی در فاصله ۲ ماه تا یک سال، عملکرد نسبتاً ثابتی دارد. شاخص توانی تغییرات زمانی ضریب انتشار برای مخلوط سه جزئی حدود ۰/۶ می باشد. این مقدار نشانگر افت قابل توجه ضریب انتشار مخلوط سه جزئی در طی زمان است.

### فهرست مراجع

1. Powers, T.C., "Structure and Physical properties of hardened Portland Cement Paste", Journal of the American Ceramic Society, Vol.41, pp.1-6, 1985.
2. Neville, A. M., "Properties of Concrete", 4th ed, Pearson-Prentice Hall, 2002.
3. Mehta P. K., Monteiro P., "Concrete: microstructure, properties, and materials", McGraw-Hill, 2006.
4. Basheer, L., Kroop, J., and Cleland, D.J., "Assessment of Durability of Concrete from Its Permeation Properties: A Review", Construction and Building Materials, No.15, pp. 93-103, 2001
5. Tang, L., "Chloride Transport in Concrete, Measurement and Prediction", Thesis presented for the degree of PhD, Chalmers University of Technology, Department of Building Materials, Goteborg, Sweden, 1996.6. Mindes 2002
۷. باقری، علیرضا، زنگانه، حامد، "بررسی کاربرد سیمان سه جزئی در ساخت بتن های توانمند قابل استفاده در پروژه های بندر سازی"، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، ۱۳۹۰.
8. ACI 234.R-06, "Guide for the Use of Silica Fume in Concrete", ACI Committee 234, American Concrete Institute, 2008.
9. ACI 232.2R-03, "Use of Fly Ash in Concrete", ACI Committee 232, American Concrete Institute, 2008.10. Bouzoubaa et.al., 2004
11. Lane, D. S., & Ozyildirim, C., "Combinations of Pozzolans and Ground, Granulated Blast-Furnace Slag for Durable Hydraulic Cement Concrete", FHWA/VTRC 00-R1, 1999.
12. Thomas, M. D. A., Shehata, M. H., Shashiprakash, S. G., Hopkins, D. S., & Cail, K., "Use of ternary cementitious systems containing silica fume and fly ash in concrete", Cement & Concrete Research, 29, 1207:1214, 1999.
۱۳. تدین، ع.،، بررسی پارامترهای انتشار یون کلرید در بتن های حاوی سیمان های دوجزئی و سه جزئی و تخمین عمر مفید آن ها در محیط های دریایی، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، ۱۳۹۵.
14. NT BUIDL 492, "CHLORIDE MIGRATION COEFFICIENT FROM NON-STEADY-STATE MIGRATION EXPERIMENTS", 1999.