

بررسی بلندمدت نفوذپذیری یون کلرید در آزمون‌های اوی متاکائولن در شرایط رویارویی پاشش در جزیره قشم

محمد شکرچی زاده^{۱*}، عطیه فراهانی^۲، محمدحسین تدین^۳ و رایحه خاقانپور^۲

^۱ عضو هیأت علمی دانشکده مهندسی عمران و سرپرست انستیتو مصالح ساختمانی دانشگاه تهران

^۲ دانشجوی دکتری مهندسی عمران - سازه، دانشگاه تهران

^۳ دانشجوی دکتری مهندسی عمران - سازه‌های دریایی، دانشگاه تهران

* نویسنده مسئول

دریافت ۹۴/۱۰/۵ پذیرش ۹۵/۴/۱۲

چکیده

امروزه سازه‌های بتنی نقش بسیار مهمی در زیرساخت‌های هر جامعه‌ای دارند. بنابر این شرایط و عملکرد این سازه‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار هستند. در سال‌های اخیر تعداد زیادی از سازه‌های بتنی در مناطق جنوبی کشور در اثر پدیده خوردگی دچار آسیب‌دیدگی و یا خرابی زودرس شده‌اند. تخریب بتن در محیط‌های حاوی یون کلرید از جمله رایج‌ترین این خرابی‌ها در سازه‌های بتنی بوده و یکی از مهم‌ترین مشکلاتی است که مهندسان عمران در تعمیر و نگهداری سازه‌های بتنی منطقه خلیج فارس با آن مواجه می‌باشند. در راستای بررسی پدیده خوردگی ناشی از انتشار یون کلرید در بتن، نمونه‌هایی بتنی با ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد پوزولان متاکائولن با نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۴ و بدون پوزولان با نسبت‌های آب به سیمان مختلف (۰/۳۵، ۰/۴ و ۰/۵) در شرایط رویارویی پاشش به مدت ۵۰ ماه واقع در منطقه خلیج فارس (جزیره قشم) قرار داده شده است. نتایج حاکی از آن هستند که با افزایش نسبت آب به سیمان در آزمون‌های بتنی واقع در محیط پاششی، ضریب انتشارپذیری افزایش می‌یابد. میزان غلظت کلرید سطحی نیز در کوتاه مدت، با افزایش نسبت آب به سیمان افزایش می‌یابد. در حالی که مقدار غلظت کلرید سطحی در بلند مدت به تدریج ثابت می‌شود. همچنین با افزایش زمان رویارویی آزمون‌های بتنی در محیط کلریدی، میزان ضریب انتشارپذیری یون کلرید و غلظت کلرید سطحی در بتن کاهش می‌یابد. استفاده از متاکائولن نیز موجب کاهش ضریب انتشارپذیری یون کلرید در بتن و افزایش غلظت کلرید سطحی در مقایسه با آزمون شاهد می‌شود.

واژگان کلیدی: بتن، کلرید سطحی، ضریب انتشارپذیری یون کلرید، نسبت آب به سیمان، متاکائولن.

۱- مقدمه

مطالعات بر روی بتن ساخته شده از سیمان پرتلند حاکی از دوام ناکافی آن به خصوص در محیط‌های خورنده مانند مناطق دریایی می‌باشد. بنابر این استفاده از مواد پوزولانی علاوه بر افزایش دوام بتن در محیط‌های خورنده، یکی از روش‌های کاهش ایجاد گاز CO₂ در تولید سیمان می‌باشد [۳].

پوزولان به عنوان جایگزین سیمان در ASTM C618 به عنوان ماده سیلیکاتی یا سیلیسی آلومیناتی به خودی خود ارزش چسبندگی ندارد، اما به شکل ذرات بسیار ریز و در مجاورت رطوبت در دماهای معمولی با هیدروکسید کلسیم واکنش شیمیایی داشته و ترکیباتی را به وجود می‌آورد که خاصیت سیمانی و چسبندگی دارد. غالباً مواد پوزولانی از سیمان پرتلندی که جایگزین آن می‌شوند ارزان‌تر هستند. امتیاز عمده پوزولان‌ها در سرعت کم هیدراته شدن و در نتیجه کاهش نرخ گرمایی می‌باشد. همچنین پوزولان‌ها باعث کاهش نفوذپذیری بتن شده و تخلخل خمیر سیمان را کاهش می‌دهند [۱]. افزایش

بتن به عنوان یک ماده ساختمانی، نزدیک به دو قرن است که در صنعت ساختمان به کار می‌رود. خرابی‌های زودرس به خصوص در سازه‌های موجود در مناطق دریایی و خورنده، نگرانی وسیعی را در اذهان طراحان بتن به وجود آورده است. لذا گسترش کاربرد بتن و بتن مسلح به عنوان مصالح ساختمانی با دوام در سازه‌ها، شناخت خواص بتن، تکنولوژی و کاربرد صحیح، آن را برای تأمین عمر مفید طراحی شده ضروری می‌سازد [۱].

مطالعات نشان داده است تولید سیمان پرتلند علاوه بر این که موجب از بین بردن منابع طبیعی مانند سنگ آهک و سوخت‌های فسیلی می‌شود، با تولید هر تن سیمان یک تن دی‌اکسیدکربن نیز به عنوان یکی از گازهای گلخانه‌ای آلاینده محیط زیست ایجاد می‌شود. به طوری که تخمین زده شده است حدود ۶ درصد گاز CO₂ تولیدی در جهان ناشی از تولید سیمان می‌باشد [۲].

نشان داد بتن حاوی متاکائولن دارای قابلیت انتقال یون کلرید کمتری نسبت به بتن شاهد می‌باشد [۹]. بررسی تأثیر زمان رویارویی در نمونه‌های حاوی متاکائولن روی میزان نفوذ یون کلرید در بتن نشان داد با افزایش درصد متاکائولن جایگزین سیمان، با افزایش زمان رویارویی و کاهش نسبت آب به سیمان میزان نفوذ یون کلرید کاهش می‌یابد [۱۰، ۱۱]. در مطالعه دیگری تأثیر متاکائولن با مقادیر جایگزینی با سیمان شامل ۰، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد، روی نفوذ یون کلرید در ملات طی ۳۱۴ روز زمان رویارویی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد ملات حاوی ۲۰ درصد متاکائولن دارای نفوذ یون کلرید بسیار کمی می‌باشد. از طرفی، ضریب انتشار یون کلرید در ملات با افزایش میزان درصد جایگزینی متاکائولن از ۱۰ به ۱۵ درصد، حدود ۱۷۰ درصد کاهش یافت [۱۲]. همچنین تحقیقات نشان داده است که در نمونه بتنی حاوی ۱۵ درصد متاکائولن، انتشارپذیری یون کلرید ۴۷ درصد بهبود یافته است [۱۳].

۳- روند آزمایشگاهی

۳-۱- مصالح مصرفی

سیمان مصرفی در طرح‌های اختلاط سیمان پرتلند نوع ۲ هرمزگان می‌باشد. مصالح سنگی ریزدانه به صورت گردگوشه و سیلیسی-آهکی و مصالح سنگی درشت‌دانه به صورت شکسته و آهکی با بزرگ‌ترین اندازه سنگ‌دانه ۱۹ میلی‌متر و مخلوط سنگ‌دانه با نسبت ۶۲ درصد درشت‌دانه به ۳۸ درصد ریزدانه می‌باشند. همچنین پوزولان متاکائولن از شرکت آسان سرام تهیه شده است. در طرح‌های اختلاط به منظور تأمین روانی بتن تازه از مواد فوق روان‌کننده با پایه کربوکسیلات استفاده شده است. همچنین ظرفیت جذب آب سنگ‌دانه‌ها به دست آمد و قبل از ساخت بتن با اندازه‌گیری درصد رطوبت سنگ‌دانه‌ها، مقدار آب طرح اختلاط اصلاح شد. مشخصات مربوط به آنالیز شیمیایی فازهای سیمان پرتلند نوع ۲ هرمزگان در جدول (۲) و آنالیز شیمیایی اجزاء سیمان پرتلند و متاکائولن در جدول (۳) ارائه شده است.

جدول ۲- آنالیز شیمیایی فازهای سیمان پرتلند مصرفی

C ₃ S (%)	C ₂ S (%)	C ₃ A (%)	C ₄ AF (%)
۴۸	۲۶	۶	۱۱

میزان تولید و کاربرد سیمان‌های پوزولانی علاوه بر حفظ محیط زیست، به توسعه پایدار فعالیت‌های مربوط به صنعت ساختمان منجر خواهد شد [۳].

به منظور شناخت و درک بهتر وضعیت موجود و ارائه راهکارهای عملی و اجرایی برای حل مشکلات موجود، انستیتو مصالح ساختمانی دانشگاه تهران سایت دانشگاهی- تحقیقاتی را در زمینه پایایی بتن در منطقه آزاد قشم احداث کرده است. در این تحقیق تأثیر متاکائولن به عنوان ماده پوزولانی جایگزین سیمان و نسبت آب به مواد سیمانی روی مقدار غلظت کلرید سطحی و ضریب انتشار یون کلرید در آزمون‌های بتنی واقع در منطقه پاششی جزیره قشم به مدت ۵۰ ماه مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- مشخصات پایایی بتن‌های حاوی متاکائولن

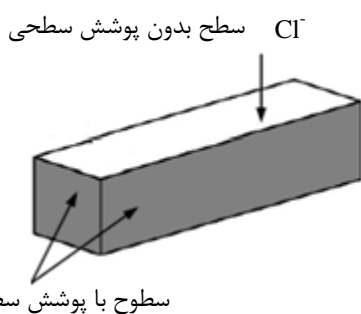
متاکائولن یک پوزولان بسیار فعال با پایه سیلیسی است که مواد خام اولیه در تولید آن، رس کائولن می‌باشد. رس کائولن یک ماده معدنی است که در دماهای ۱۰۰ و ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد، بیشتر آب جذب شده خود را از دست می‌دهد. کائولینیت به عنوان جزء اصلی تشکیل دهنده کائولن، در دمای بین ۵۰۰ و ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد، دی‌هیدراکسیونیزه شده و آب خود را از دست می‌دهد [۴، ۵]. همچنین متاکائولن خواص فیزیکی بتن را در کوتاه مدت و بلند مدت بهبود می‌دهد. جدول (۱) خواص فیزیکی متاکائولن را نشان می‌دهد.

جدول ۱- خواص فیزیکی متاکائولن [۶]

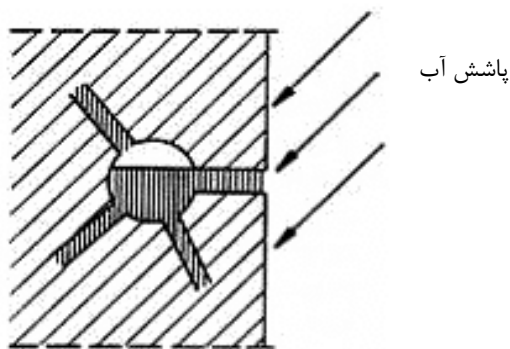
مشخصات	مقدار
جرم مخصوص	۲/۶
چگالی انبوهی (g/cm ³)	۰/۳-۰/۴
سطح ویژه (m ² /g)	۱/۷
شکل فیزیکی	پودری
رنگ	سفید

مطالعات نشان داده‌اند استفاده از ۱۰ درصد متاکائولن جایگزین سیمان در طرح مخلوط بتن با نسبت آب به سیمان ۰/۳ دارای مقاومت فشاری بیشتر و نفوذپذیری کمتری در برابر یون کلرید نسبت به طرح حاوی دوده سیلیس جایگزین سیمان می‌باشد [۷، ۸]. همچنین نتایج حاصل از مقایسه بتن حاوی ۱۰ درصد متاکائولن با بتن معمولی با نسبت آب به سیمان ۰/۴

در ناحیه پاشش هنگامی که سطح بتن بر اثر پاشش آب دریا خیس می‌گردد در ابتدا انتقال آب و یونها با ساز و کار مکش موئینه انجام می‌گیرد، به طوری که منافذ و حفرات سطحی بتن سریعاً اشباع می‌گردد (شکل (۲)) و نفوذ گازها به طور کامل متوقف می‌شود. هنگامی که انتقال آب و یون‌های محلول در آن بر اثر مکش موئینه منافذ به حالت پایداری رسید، ساز و کار انتشار آغاز خواهد شد و تا هنگامی که سطح بتن بر اثر باد و تابش آفتاب خشک شود ساز و کار غالب می‌باشد. میزان تاثیر ساز و کار مکش موئینه در انتقال آب و املاح به میزان کشش سطحی منافذ بتن وابسته می‌باشد [۱۴].



شکل ۱- شمای آزمون‌های منشوری پس از اجرای پوشش



شکل ۲- اشباع شدن منافذ و حفرات سطحی بتن در منطقه پاشش [۱۴]

۳-۴- تعیین میزان نفوذ یون کلرید

۳-۴-۱- عملیات پودرگیری از آزمون‌ها

پس از گذشت زمان‌های رویارویی ۳، ۹، ۲۷ و ۵۰ ماه آزمون‌های منشوری در جزیره قشم، عملیات پودرگیری از آزمون‌ها طبق استاندارد NT Build 443 برای تعیین میزان نفوذ یون کلرید در محل سایت انجام شد. طبق این استاندارد لایه‌ای به ضخامت یک میلی‌متر از روی نمونه برداشته شده که به دلیل تأثیر عوامل دیگر بر نفوذ یون کلرید از جمله

جدول ۳- آنالیز شیمیایی اجزاء سیمان پرتلند و متاکائولن

مشخصات	سیمان	متاکائولن
اکسید کلسیم (CaO) (%)	۶۳	۰/۲
دی اکسید سیلیسیم (SiO ₂) (%)	۲۱	۵۱/۹
اکسید آلومینیوم (Al ₂ O ₃) (%)	۵	۴۳/۹
اکسید آهن (Fe ₂ O ₃) (%)	۳/۵	۱/۰
اکسید منیزیم (MgO) (%)	۱/۸	۰/۲
تری اکسید سولفور (SO ₃) (%)	۱/۶	-
اکسید پتاسیم (K ₂ O) (%)	۰/۶	۰/۱
اکسید سدیم (Na ₂ O) (%)	۰/۵	-
افت وزنی در اثر حرارت (LOI) (%)	۲	۰/۶

۳-۲- طرح‌های اختلاط

طرح‌های بتنی حاوی متاکائولن با مقادیر ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد جایگزین سیمان با نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۴ و طرح شاهد (بدون متاکائولن) با نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۳۵، ۰/۴۰ و ۰/۵۰ در محیط پاششی جزیره قشم قرار گرفتند. مقدار آب مصرفی در طرح‌های اختلاط ۱۶۰ کیلوگرم بر متر مکعب بتن می‌باشد. جزئیات ۶ طرح اختلاط در جدول (۴) آمده است.

پس از آماده‌سازی مصالح، کلیه طرح‌ها در محل سایت در دمای ۲۰±۲ درجه سانتی‌گراد ساخته شدند. نتایج آزمایش اسلامپ روی بتن تازه در جدول (۴) آمده است. پس از پر کردن قالب‌های منشوری از میز لرزان به منظور تراکم بتن استفاده شده و به مدت ۲۴ ساعت در شرایط محیطی آزمایشگاه نگهداری شدند. پس از باز کردن قالب‌ها، آزمون‌های بتنی به مدت ۳ روز در شرایط آب و هوایی گرم و مرطوب جزیره قشم عمل‌آوری مرطوب شدند.

۳-۳- قرارگیری آزمون‌ها در منطقه پاشش

پس از پایان عمل‌آوری، چهار سطح جانبی و سطح تحتانی آزمون‌های منشوری با پوشش سطحی با پایه پلی اورتان که در برابر شرایط حاد جنوب بسیار مقاوم است، پوشانده شد تا نفوذ یون کلرید به صورت یک بعدی صورت گیرد (شکل (۱)).

آزمون‌های منشوری در منطقه پاششی اسکله کاوه واقع در جزیره قشم قرار داده شده‌اند. ارتفاع محل قرارگیری آزمون‌های ناحیه پاشش بالاتر از حداکثر ارتفاع مد منطقه و به گونه‌ای انتخاب شده است که آزمون‌ها هیچ‌گاه در طول سال در آب دریا مستغرق نباشند. به طوری که تنها پاشش آب دریا بر روی آن‌ها وجود داشته باشد.

$$C(x,t) = C_s - (C_s - C_0) \times \operatorname{erf}(x/\sqrt{4Dt}) \quad (2)$$

که در آن C میزان یون کلرید (درصد وزنی بتن)، x فاصله از سطح بتن (متر)، t مدت زمان رویارویی (ثانیه)، D ضریب انتشار یون کلرید در بتن (متر مربع بر ثانیه)، C_s میزان یون کلرید در سطح بتن (درصد وزنی بتن)، C_0 میزان یون کلرید اولیه در بتن (درصد وزنی بتن) و erf تابع خطا می‌باشد. میزان کلرید اولیه در آزمون بدون پوزولان برابر 0.15 درصد وزنی بتن و در آزمون‌های حاوی متاکائولن برابر 0.1 درصد وزنی بتن به دست آمده است. از برازش هر پروفیل یون کلرید بر حسب عمق پودرگیری با رابطه (۲)، مقادیر D و C_s به دست می‌آید.

۴- نتایج و تجزیه و تحلیل آن‌ها

۴-۱- بررسی تأثیر زمان بر ضریب انتشار یون کلرید در بتن

در ناحیه پاشش، بررسی نتایج مربوط به آزمون‌های بتنی در شکل‌های (۳) و (۴) نشان می‌دهد که با گذشت زمان رویارویی بتن در محیط کلریدی، میزان ضریب انتشار یون کلرید در بتن کاهش می‌یابد. علت این امر، تکمیل فرایند هیدراته شدن و پر شدن منافذ بتن با محصولات این فرایند با گذشت زمان می‌باشد. همان‌طور که در شکل (۳) مشاهده می‌شود، با گذشت زمان رویارویی آزمون‌های بتنی حاوی متاکائولن در محیط کلریدی، به ضریب انتشارپذیری یون کلرید یکسانی نزدیک می‌شود. همچنین آزمون‌های حاوی 10 و 15 درصد متاکائولن جایگزین سیمان پرتلند دارای روند کاهشی تقریباً مشابه با زمان هستند.

شکل (۴) نشان می‌دهد آزمون C3 نسبت به آزمون‌های C1 و C2، در بازه زمانی ۳ ماه تا ۹ ماه نرخ کاهش ضریب انتشارپذیری بیشتری نسبت به بازه زمانی ۹ ماه تا ۵۰ ماه دارد.

کلرشتگی یا بلوری شدن بر روی آن آزمایشی انجام نمی‌شود. پس از آن در حداقل ۸ لایه از بتن پودرگیری می‌شود [۱۵]. عمق متوسط هر لایه پس از خارج کردن پودر نسبت به سطح بتن به دست می‌آید.

۳-۴-۲- تعیین میزان یون کلرید در پودرهای تهیه شده

اندازه‌گیری درصد یون کلرید به صورت یون کلرید محلول در اسید طبق ASTM C1152 انجام شده است [۱۶].

۳-۵- محاسبه ضریب انتشارپذیری و غلظت کلرید سطحی

یون کلرید هم از محیط خارجی (بیرونی)، در صورت تماس با خاک آلوده یا آب دریا، و هم از محیط داخلی (مصالح حاوی یون کلر) وارد بتن می‌شوند. با توجه به اهمیت زیاد نفوذ کلر به عنوان یک عامل بسیار مهم در کاهش پایایی بتن، مکانیزم‌های نفوذ یون کلرید به داخل بتن باید به خوبی شناخته شوند. ورود یون کلرید به داخل بتن از طریق سازوکارهای انتشار یونی، مکش موئینه، نفوذ، مهاجرت، جذب و یا ترکیبی از آن‌ها انجام می‌گیرد. انتقال ترکیبی مانند شرایط جزر و مد و پاشش است که بتن به طور مداوم در حال تر و خشک شدن و تشدید انتقال یون به داخل بتن می‌باشد.

پدیده نفوذ یون کلرید به داخل بتن به عوامل مختلفی نظیر نسبت آب به سیمان، نوع سیمان، کاربرد افزودنی‌های معدنی جایگزین سیمان (نظیر دوده سیلیسی، خاکستر بادی، سرباره، متاکائولن و زئولیت)، نوع و مدت عمل‌آوری، استفاده از پوشش‌های سطحی، رطوبت و دمای محیط و شرایط بارگذاری (سطح تنش و وجود ترک) وابسته است.

طبق رابطه (۱) میزان نفوذ یون کلرید بر حسب فاصله از سطح بتن در زمان مشخص توسط قانون دوم انتشار Fick در حالت یک بعدی بیان می‌شود:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (1)$$

از حل معادله دیفرانسیل فوق با شرایط اولیه و مرزی زیر، رابطه (۲) به دست می‌آید [۱۷]:

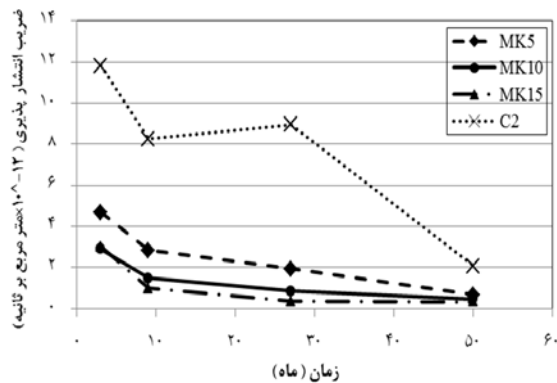
$$C(x=0, t > 0) = C_s$$

$$C(x > 0, t = 0) = C_0$$

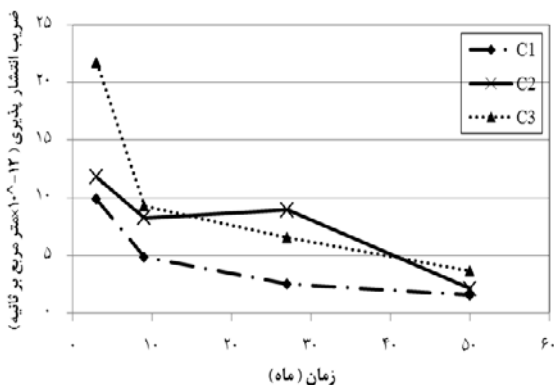
جدول ۴- مشخصات نسبت‌های اختلاط

کد نمونه	نسبت آب به مواد سیمانی	عیار سیمان (kg/m ³)	پوزولان جایگزین (kg/m ³)	مقدار آب (kg/m ³)	فوق روان کننده (kg/m ³)	اسلامپ (cm)
C1	۰/۳۵	۴۰۰	۰	۱۴۰	۰/۳۵	۸
C2	۰/۴۰	۴۰۰	۰	۱۶۰	۰/۲۰	۷
C3	۰/۵۰	۴۰۰	۰	۲۰۰	۰/۰۰	۱۸
MK5	۰/۴۰	۳۸۰	۲۰	۱۶۰	۰/۸۰	۵
MK10	۰/۴۰	۳۶۰	۴۰	۱۶۰	۱/۴۰	۵/۵
MK15	۰/۴۰	۳۴۰	۶۰	۱۶۰	۱/۶۰	۸

۰/۳۵ به ۰/۴۰ و ۰/۵۰ به ترتیب ضریب انتشارپذیری یون کلرید در بتن ۲۰ و ۱۲۱ درصد پس از ۳ ماه، ۷۱ و ۹۲ درصد پس از ۹ ماه، ۲۶۰ و ۱۶۲ درصد پس از ۲۷ ماه و ۳۷ و ۱۳۹ درصد پس از ۵۰ ماه رویارویی در ناحیه پاششی جزیره قشم افزایش یافته است. لازم به ذکر است خطا در اندازه‌گیری می‌تواند عامل افزایش قابل ملاحظه (۲۶۰ درصد) ضریب انتشارپذیری نمونه با نسبت آب به سیمان ۰/۴۰ نسبت به نمونه با نسبت آب به سیمان ۰/۳۵ در زمان رویارویی ۲۷ ماه باشد.



شکل ۳- تغییرات ضریب انتشارپذیری یون کلرید در بتن با زمان در طرح‌های اختلاط حاوی ۰، ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد متاکائولن



شکل ۴- تغییرات ضریب انتشارپذیری یون کلرید در بتن با زمان در طرح‌های اختلاط با نسبت آب به سیمان ۰/۳۵، ۰/۴۰ و ۰/۵۰

۴-۲- بررسی تأثیر درصد متاکائولن جایگزین سیمان بر ضریب انتشار یون کلرید در بتن

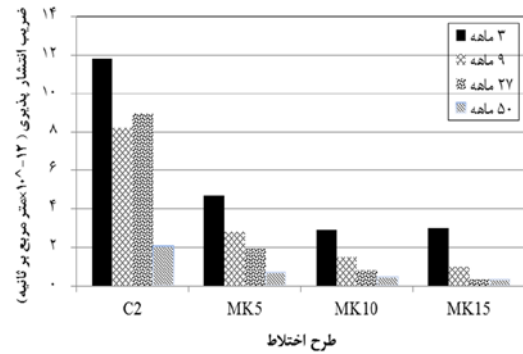
استفاده از متاکائولن به عنوان جایگزینی برای سیمان پرتلند در بتن موجب بهبود ریزساختار، تخلخل و نفوذناپذیری بتن شده و در نتیجه پایایی و دوام بتن در معرض نفوذ یون کلرید در محیط‌های دریایی را افزایش می‌دهد. بنابر این، نمونه‌های حاوی ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد متاکائولن جایگزین سیمان پرتلند نسبت به نمونه فاقد متاکائولن، دارای ضریب انتشارپذیری کمتری هستند. با توجه به شکل (۵)، ضریب انتشارپذیری یون کلرید در بتن در نمونه‌های MK5، MK10 و MK15 در مقایسه با نمونه C2، به ترتیب ۶۰، ۷۵ و ۷۴ درصد در سه ماه، ۶۶، ۸۲ و ۸۸ درصد در ۹ ماه، ۷۸، ۹۰ و ۹۶ درصد در ۲۷ ماه و ۶۷، ۷۷ و ۸۴ درصد در ۵۰ ماه رویارویی با محیط کلریدی، کاهش یافته است.

با توجه به اختلاف درصد کاهش قابل ملاحظه ۱۵، ۱۶، ۱۲ و ۱۰ درصدی به ترتیب در نمونه‌های ۳، ۹، ۲۷ و ۵۰ ماهه برای مقدار ضریب انتشارپذیری یون کلرید بین نمونه‌های MK5 و MK10 در مقایسه با اختلاف ۱، ۶، ۶ و ۷ درصدی همین مقادیر بین نمونه‌های MK10 و MK15، چنین استنباط می‌شود که درصد بهینه برای پوزولان متاکائولن در منطقه پاششی جزیره قشم بین ۱۰ تا ۱۵ درصد می‌باشد.

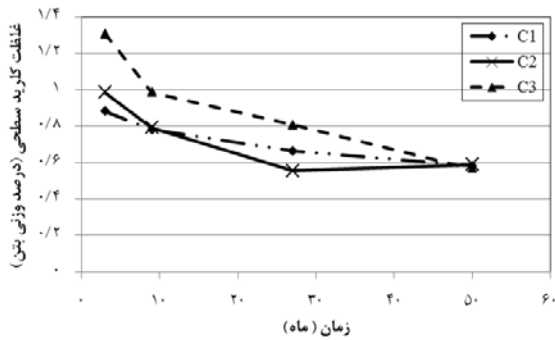
۴-۳- بررسی تأثیر نسبت آب به سیمان بر ضریب انتشار یون کلرید در بتن

افزایش نسبت آب به سیمان در بتن موجب افزایش فضاهای متخلخل داخل بتن شده و در نتیجه نفوذ یون کلرید به داخل بتن افزایش می‌یابد. بنابر این، همان گونه که در شکل (۶) مشاهده می‌شود، با افزایش نسبت آب به سیمان در نمونه‌های دارای آب به سیمان ۰/۳۵، ۰/۴۰ و ۰/۵۰ ضریب انتشارپذیری افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر، با افزایش نسبت آب به سیمان از

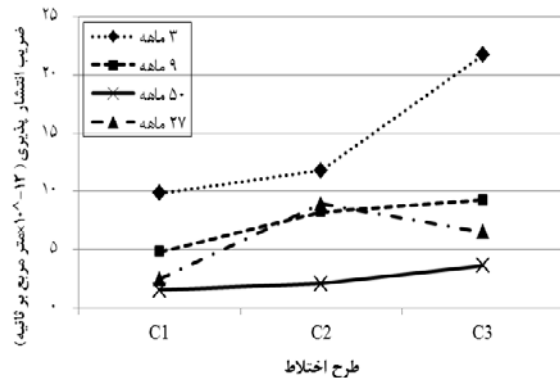
از ۵۰ ماه رویارویی با محیط کلریدی افزایش یافته است (شکل ۹)). به طور کلی، می‌توان گفت آزمون‌ها حاوی متاکائولن با ضریب انتشار کمتر، دارای مقدار کلرید سطحی بیشتری می‌باشد. دلیل این امر، پر شدن منافذ موئینه و متخلخل داخل بتن بر اثر واکنش پوزولان با آب و همچنین ایجاد قیده‌های فیزیکی و شیمیایی ناشی به کارگیری پوزولان می‌باشد که در نتیجه نفوذ کمتر یون کلرید به داخل بتن و تجمع بیشتر و در نهایت افزایش غلظت یون کلرید در سطح بتن اتفاق می‌افتد.



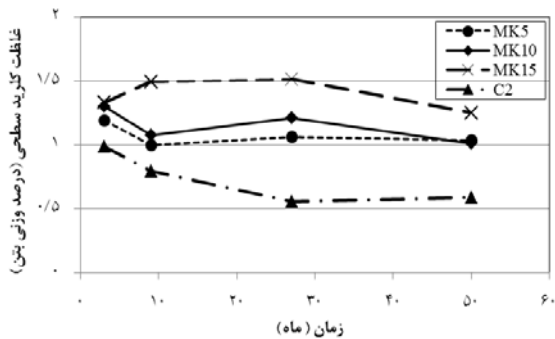
شکل ۵- تغییرات ضریب انتشارپذیری یون کلرید در بتن در طرح‌های اختلاط حاوی ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد متاکائولن



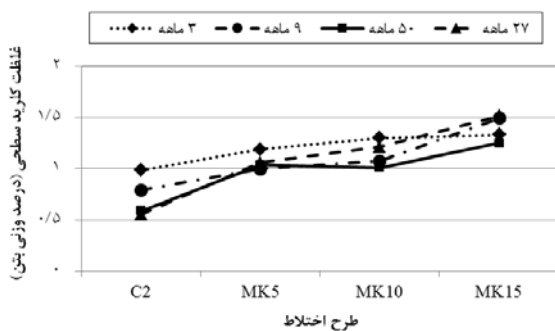
شکل ۷- تغییرات غلظت کلرید سطحی بتن با زمان در طرح‌های اختلاط با نسبت آب به سیمان ۰/۳۵ و ۰/۴ و ۰/۵



شکل ۶- تغییرات ضریب انتشارپذیری یون کلرید در بتن در طرح‌های اختلاط با نسبت آب به سیمان ۰/۳۵ و ۰/۴ و ۰/۵



شکل ۸- تغییرات غلظت کلرید سطحی بتن با زمان در طرح‌های اختلاط حاوی ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد متاکائولن



شکل ۹- تغییرات غلظت کلرید سطحی بتن در طرح‌های اختلاط حاوی ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد متاکائولن

۴-۴- بررسی تأثیر زمان بر غلظت کلرید سطحی در بتن همان طور که در شکل (۷) مشاهده می‌شود، با گذشت زمان غلظت کلرید سطحی در آزمون‌های دارای آب به سیمان ۰/۳۵، ۰/۴۰ و ۰/۵۰ به علت نفوذ هرچه بیشتر یون کلرید به مرور زمان به داخل آزمون بتنی، کاهش می‌یابد. در ضمن، در سن ۵۰ ماه، هر سه آزمون به مقدار کلرید سطحی یکسان رسیده‌اند. در شکل (۸) نیز مشاهده می‌شود با گذشت زمان غلظت کلرید سطحی در آزمون‌های حاوی متاکائولن، برای هر طرح، تقریباً ثابت و البته با روند کاهشی است.

۴-۵- بررسی تأثیر درصد متاکائولن جایگزین سیمان بر غلظت کلرید سطحی در بتن

مقادیر غلظت کلرید سطحی به ترتیب در آزمون‌های MK5، MK10 و MK15 در مقایسه با آزمون C2، به میزان ۲۱، ۳۲ و ۳۵ درصد پس از سه ماه، ۲۶، ۳۶ و ۸۹ درصد پس از ۹ ماه، ۹۱ و ۱۱۹ و ۱۷۳ درصد پس از ۲۷ ماه و ۷۶، ۷۲ و ۱۱۳ درصد پس

پاششی جزیره قشم بین ۱۰ تا ۱۵ درصد می باشد. با گذشت زمان رویارویی آزمون‌های بتنی حاوی متاکائولن در محیط کلریدی، میزان ضریب انتشارپذیری یون کلرید به مقدار یکسانی نزدیک می‌شود. با افزایش نسبت آب به سیمان از ۰/۳۵ به ۰/۵۰، ضریب انتشارپذیری یون کلرید در بتن طی مدت زمان ۵۰ ماه رویارویی در محیط پاششی، ۱۳۹ درصد افزایش می‌یابد. با گذشت زمان، به علت نفوذ هرچه بیشتر یون کلرید به داخل آزمون بتنی، غلظت کلرید سطحی کاهش می‌یابد. کاربرد پوزولان متاکائولن به عنوان جایگزین سیمان پرتلند سبب افزایش مقدار کلرید سطحی در مقایسه با آزمون بدون متاکائولن می‌شود. به طوری که استفاده از ۵ تا ۱۵ درصد متاکائولن جایگزین سیمان پرتلند ۷۶ تا ۱۱۳ درصد میزان کلرید سطحی را نسبت به آزمون بدون این پوزولان، پس از ۵۰ ماه رویارویی در محیط پاششی، افزایش می‌دهد. با افزایش نسبت آب به سیمان، غلظت کلرید سطحی در کوتاه مدت افزایش می‌یابد و در سنین بیشتر به مقدار ثابت و یکسانی می‌رسد.

۶- تشکر و قدردانی

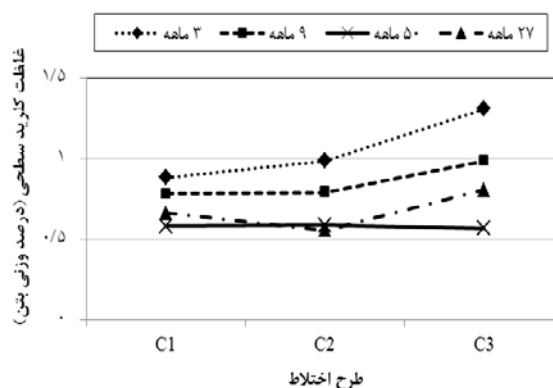
نویسندگان این مقاله از همکاری‌های سازمان منطقه آزاد قشم به ویژه معاونت عمرانی این سازمان در احداث این سایت تحقیقاتی کمال تشکر و قدردانی را دارند.

۷- مراجع

- [۱] رمضانپور، ع. ا.، پیدایش، م.، "دوام بتن و نقش سیمان‌های پوزولانی"، نشریه شماره ۲۷۴، چاپ اول، انتشارات مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، ۱۳۷۶.
- [۲] فامیلی، ه.، "تولید سیمان و بتن از دیدگاه حفظ منابع طبیعی و محیط زیست"، چهارمین کنفرانس سدسازی، ۱۰۲۹-۱۰۲۴.
- [3] Mehta, P. K., "Concrete Technology for Sustainable Development", Concrete International, 1999, 21 (11), 47-53.
- [۴] شکرچی‌زاده، م.، میردامادی، ع.، بنگدار، ا.، بخشی، م.، "بهبود خواص بتن‌های توانمند با استفاده از متاکائولن"، مجله تحقیقات بتن، ۱۳۸۷، ۲، ۵۵-۶۳.
- [5] Bonakdar, A., Bakhshi, M., Ghalibafian, M., "Properties of High-Performance Concrete Containing High Reactivity Metakaolin", 7th

۴-۶- بررسی تأثیر نسبت آب به سیمان بر غلظت کلرید سطحی در بتن

همان طور که در شکل (۱۰) مشاهده می‌شود، با توجه به این که در ابتدا سرعت جذب سطحی در آزمون‌های با نسبت آب به سیمان بالاتر، بیشتر است، غلظت یون کلرید سطحی بیشتری نیز در سطح انتظار می‌رود؛ اما، به مرور زمان و پس از اشباع شدن بتن، به علت ظرفیت کم قیده‌های فیزیکی و شیمیایی در برابر نفوذ یون کلرید و پس از به تعادل رسیدن پدیده انتشار در طولانی مدت، غلظت یون کلرید سطحی در نسبت‌های مختلف آب به سیمان به مقدار مشابهی رسیده است. در نتیجه، با افزایش نسبت آب به سیمان در آزمون‌های دارای آب به سیمان ۰/۳۵، ۰/۴۰ و ۰/۵۰ غلظت کلرید سطحی در کوتاه مدت، افزایش می‌یابد و در سنین بیشتر به مقدار ثابت و یکسانی می‌رسد.



شکل ۱۰- تغییرات غلظت کلرید سطحی بتن در طرح‌های اختلاط با ۰/۳۵، ۰/۴ و ۰/۵ نسبت آب به سیمان

۵- نتیجه‌گیری

با گذشت زمان رویارویی آزمون‌های بتنی در محیط کلریدی، ضریب انتشارپذیری یون کلرید در بتن کاهش می‌یابد. ضریب انتشارپذیری آزمون‌های حاوی متاکائولن جایگزین سیمان پرتلند نسبت به آزمون بدون این پوزولان کمتر است. به طوری که استفاده از ۵ تا ۱۵ درصد متاکائولن جایگزین سیمان پرتلند، ۶۷ تا ۸۴ درصد میزان ضریب انتشارپذیری یون کلرید در بتن را نسبت به آزمون بدون این پوزولان، طی مدت زمان ۵۰ ماه رویارویی در محیط پاششی کاهش می‌دهد. با افزایش درصد متاکائولن جایگزین سیمان پرتلند، مقدار ضریب انتشارپذیری یون کلرید در بتن کاهش می‌یابد. درصد بهینه متاکائولن جایگزین سیمان پرتلند در منطقه

- [16] ASTM C1152/C1152M, "Standard Test Method for Acid-Soluble Chloride in Mortar and Concrete", ASTM, West Conshohocken, 2012.
- [17] Luping, T., "Chloride Transport in Concrete, Measurement and Prediction", PhD Thesis, Chalmers University of Technology, Department of Building Materials, Goteborg, Sweden, 1996.
- [6] ولی پور، م.، پرگر، ف.، شکرچی زاده، م.، "بررسی خوردگی آرماتور در شرایط محیطی خلیج فارس در بتن های حاوی پوزولان متاکائولن"، دومین کنفرانس ملی بتن ایران، ۱۳۸۹.
- [7] Poon, C., Kou, S., Lam, L., "Compressive Strength, Chloride Diffusivity and Pore Structure of High Performance Metakaolin and Silica Fume Concrete", Construction and Building Materials, 2006, 20 (10), 858-865.
- [8] Ganjian, E., Sadeghi Pouya, H., "The Effect of Persian Gulf tidal Zone Exposure on Durability of Mixes Containing Silica Fume and Blast Furnace Slag", Construction and Building Materials, 2009, 23 (2), 644-652.
- [9] Zhang, M. H., Malhotra, V. M., "Characteristics of a Thermally Activated Alumino-Silicate Pozzolanic Material and its Use in Concrete", Cement and Concrete Research, 1995, 25 (8), 1713-1725.
- [10] Boddy, A., Hooton, R. D., Gruber, K. A., "Long-term Testing of The Chloride-Penetration Resistance of Concrete Containing High-Reactivity Metakaolin", Cement and Concrete Research, 2001, 31 (5), 759-765.
- [11] Gruber, K. A., Ramlochan, T., Boddy, A., Hooton, R. D., Thomas, M. D. A., "Increasing Concrete Durability with High-Reactivity Metakaolin", Cement and Concrete Research, 2001, 23 (6), 479-484.
- [12] Courard, L., Darimont, A., Schouterden, M., Ferauche, F., Willem, X., Degeimbre, R., "Durability of Mortars Modified with Metakaolin", Cement and Concrete Research, 2003, 33, 1473-1479.
- [13] Shekarchi, M., Bonakdar, A., Bakhshi, M., Mirdamadi, A., Mobasher, B., "Transport Properties in Metakaolin Blended Concrete", Construction and Building Materials, 2010, 24, 2217-2223.
- [14] Comite Euro-International Du Beton, (CEB), "Durable Concrete Structures (Design Guide)", 1992.
- [15] NordTest NT Build 443, "Concrete, Hardened: Accelerated Chloride Penetration", ESPOO, Finland, 1995.

EXTENDED ABSTRACT

Long-Time Investigation of Chloride Permeation in Metakaolin Concrete in Splash Zone in Qeshm Island

Mohammad Shekarchizadeh*, Atiye Farahani, Mohammad Hosein Tadayon, Rayehe Khaghanpour

School of Civil Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

Received: 26 December 2015; **Accepted:** 03 July 2016

Keywords:

Concrete, Diffusion coefficient, Surface chloride, Metakaolin, Water to cement ratio

1. Introduction

Today, concrete structures have a crucial role in the infrastructure of society. The conditions and performance of these structures are important. In recent years, due to corrosion phenomenon, a number of concrete structures in Southern areas of Iran have suffered damage or premature failure. Concrete damage in the chloride environments is the most common failure of reinforced concrete structures and an important problem for civil engineers which today they are faced with the maintenance of them. Recent societal shift toward sustainable consumption and growth applied to civil infrastructure systems requires the construction materials to be designed and used with utmost attention to their durability and long term response. Pozzolanic materials including silica fume, fly ash, slag, and metakaolin have been used in recent decades for developing high performance concrete with improved workability, strength and durability. Metakaolin has been used as a pozzolan for high performance concrete applications. This material is a thermally activated alumino-silicate which is mostly manufactured by calcinations of kaolin clay at the temperature range of 500-850°C [1].

It was obtained that implementation of 10% metakaolin in concrete is more effective than silica fume concrete in reducing the chloride permeation and increasing the compressive strength [2, 3]. Additionally, it was reported that the chloride permeation reduces with water to cement ratio and over time by replacement of part of Portland cement with metakaolin in concrete [4, 5]. It was also investigated that substituting 15% level of metakaolin improves ionic diffusion and durability performance up to 47% [6].

In this paper, the performance of metakaolin concrete and Portland cement concrete with different water to cement ratios was investigated in terms of chloride diffusion coefficient and surface chloride content under splash exposure condition located in Qeshm Island.

2. Methodology

2.1. Experimental studies

2.1.1. Materials

The cement commercially available ASTM type II Portland Cement (*PC*) produced in Hormozgan, Iran. Metakaolin (*MK*) was supplied from Asan Saram manufacture, Iran. The substitution contents of metakaolin were 5, 10 and 15 by weight of cement and control mixture was without *MK* with a constant cement content of 400 kg/m³. The crushed limestone aggregates were from Metosak plant. Maximum size of coarse aggregate was 19 mm. Polycarboxylate based superplasticizer was implemented for improving the workability of fresh concrete. Table 1 gives the chemical properties of the cementitious materials.

2.1.2. Mixture proportions

Three mixtures containing 5, 10 and 15% *MK* were made with water to binder ratio (*w/b*) of 0.4. Additionally, three mixtures were developed at 0.35, 0.40 and 0.50 water to cement ratios. The mixture proportions of concretes are given in Table 2.

* Corresponding Author

E-mail addresses: shekarch@ut.ac.ir (Mohammad Shekarchizadeh), a_farahani87@ut.ac.ir (Atiye Farahani), tadayon@ut.ac.ir (Mohammad Hosein Tadayon), r_khaghanpour@ut.ac.ir (Rayehe Khaghanpour).

Table 1. Chemical properties of *Portlan Cement* and *Metakaolin*

	<i>PC</i>	<i>MK</i>
CaO (%)	63.0	0.2
SiO ₂ (%)	21.0	51.9
Al ₂ O ₃ (%)	5.0	43.9
Fe ₂ O ₃ (%)	3.5	1.0
MgO (%)	1.8	0.2
SO ₃ (%)	1.6	-
K ₂ O (%)	0.6	0.1
Na ₂ O (%)	0.5	-
Loss On Ignition (LOI) (%)	2.0	0.6

Table 2. Concrete mixture composition

Code	w/b	Cement (kg/m ³)	<i>MK</i> (kg/m ³)	Water (kg/m ³)	Superplasticizer (kg/m ³)
C1	0.35	400	0	140	0.35
C2	0.40	400	0	160	0.20
C3	0.50	400	0	200	0.00
MK5	0.40	380	20	160	0.80
MK10	0.40	360	40	160	1.40
MK15	0.40	340	60	160	1.60

2.1.3. Specimen preparation, casting and curing

The concrete mixtures were made in the laboratory of the Construction Materials Institute (CMI) at University of Tehran. Prisms of concrete were cast in steel molds and Specimens were compacted on a vibrating table. After casting for 24hr., the specimens were remolded and cured in Qeshm Island with hot and moist air. After that, The concrete specimens were transferred to the splash zone in a marine investigation site that located in Qeshm Island, Persian Gulf, Iran, for the period of investigations at ages of 3, 9, 27 and 50 months.

2.1.4. Sampling and testing

After exposure to seawater, for each age, the specimens were taken to the laboratory for the obtaining of chloride profiles at the mentioned ages. Each specimen was grinded in 8 increments from the finished surface to an estimated depth of chloride penetration according to NT Build 443 [7]. Then, the total chloride content of concrete was measured by auto-titration equipment according to ASTM C1152 [8].

2.2. Calculation of chloride diffusion coefficient and surface chloride content

The diffusion coefficient and the surface chloride content for each chloride profile can be determined by Fick's second law of diffusion (Eq. (1)). Due to the concrete is assumed to be a homogenous material, Fick's second law is determined for one-dimensional diffusion.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (1)$$

The solution of Fick's second law of diffusion with initial and boundary conditions as followed Eq. (2) and Eq. (3), is proposed in Eq. 4.

$$C(x=0, t > 0) = C_s \quad (2)$$

$$C(x > 0, t = 0) = C_0 \quad (3)$$

$$C(x, t) = C_s - (C_s - C_0) \times \text{erf}(x / \sqrt{4Dt}) \quad (4)$$

where $C=C(x,t)$ is the chloride content at the depth of x from the surface of concrete specimen at the time t , D is the chloride diffusion coefficient, C_s is the surface chloride concentration, C_i is the initial chloride concentration and erf

is error function [9]. C_i is 0.015% and 0.01% by weight of concrete in specimens without and with *MK*, respectively. C_s and D are obtained from regression of Eq. (4) for the chloride profile of each specimen.

3. Results and discussion

3.1. Diffusion coefficient

The chloride diffusion coefficient decreases with increasing the metakaolin content and over exposure time in the concrete specimens in the splash zone located in Qeshm Island. The chloride diffusion coefficient increases 139% with increasing water to cement ratio from 0.35 to 0.50 after 50 months exposure time. Additionally, the chloride diffusion coefficient of metakaolin concrete is less than the concrete specimens without metakaolin. So, use of 5 to 15% metakaolin replacement of Portland cement in concrete reduces 67 to 84% the chloride diffusion coefficient compared with the concrete specimens without *MK* after 50 months exposure time in splash zone of Qeshm Island. After a certain age, in the *MK* concretes, the chloride diffusion coefficient will gradually be constant for different mixes. The optimum percent of metakaolin as a replacement of Portland cement is 10 to 15% in splash zone of Qeshm Island.

3.2. Surface chloride content

The surface chloride content in concrete specimens with 0.35, 0.40 and 0.50 water to cement ratio decreases over time since the capillary pore system will be altered as hydration continues. Specially, the surface chloride content increases with water to cement ratio at short-term and at long-term, this content will gradually be constant. In addition, the surface chloride concentration increases by implementation of metakaolin as a natural pozzolan and a replacement of Portland cement. So, use of 5 to 15% metakaolin increases 76 to 113% the surface chloride content compared with the concrete specimens without *MK* after 50 months exposure time in splash zone of Qeshm Island.

4. Conclusions

In this paper, the performance of concrete with and without metakaolin was investigated in terms of the chloride diffusion coefficient and the surface chloride content in the splash zone of Qeshm Island. In addition, to examine the performance of metakaolin, specimens with constant water to binder ratio of 0.40 containing 5, 10 and 15% metakaolin and specimens without metakaolin with 0.35, 0.40 and 0.5 water to cement ratios were prepared. All of the specimens were subjected to splash exposure conditions during 50 months. The results indicated that the chloride diffusion coefficient of concrete specimens increases with the water to binder ratio. While, the surface chloride content increases with water to cement ratio at short-term and at long-term, this content will gradually be constant. It was also obtained that the chloride diffusion coefficient and the surface chloride content of concrete specimens decrease over time. In addition, using metakaolin as supplementary materials in concrete improves ionic diffusion and durability properties of concrete and also increases the surface chloride content.

5. References

- [1] Bonakdar, A., Bakhshi, M., Ghalibafian, M., "Properties of High-performance Concrete Containing High Reactivity Metakaolin", 7th International Symposium on Utilization of High-Strength/High- Performance Concrete, Washington DC, US, Vol. 1, 2005, pp 228-295.
- [2] Poon, C., Kou, S., Lam, L., "Compressive Strength, Chloride Diffusivity and Pore Structure of High Performance Metakaolin and Silica Fume Concrete", Construction and Building Materials, 2006, 20 (10), 858-865.
- [3] Ganjian, E., Sadeghi Pouya, H., "The Effect of Persian Gulf Tidal Zone Exposure on Durability of Mixes Containing Silica Fume and Blast Furnace Slag", Construction and Building Materials, 2009, 23 (2), 644-652.
- [4] Boddy, A., Hooton, R. D., Gruber, K. A., "Long-term Testing of the Chloride-penetration Resistance of Concrete Containing High-reactivity Metakaolin", Cement and Concrete Research, 2001, 31 (5), 759-765.
- [5] Gruber, K. A., Ramlochan, T., Boddy, A., Hooton, R. D., Thomas, M. D. A., "Increasing Concrete Durability with High-reactivity Metakaolin", Cement and Concrete Research, 2001, 23 (6), 479-484.
- [6] Shekarchi, M., Bonakdar, A., Bakhshi, M., Mirdamadi, A., Mobasher, B., "Transport Properties in Metakaolin Blended Concrete", Construction and Building Materials, 2010, 24, 2217-2223.
- [7] NordTest NT Build 443, "Concrete, Hardened: Accelerated Chloride Penetration", ESPOO, Finland, 1995.
- [8] ASTM C1152/C1152M, "Standard Test Method for Acid-Soluble Chloride in Mortar and Concrete", ASTM, West Conshohocken, 2012.
- [9] Luping, T., "Chloride Transport in Concrete, Measurement and Prediction", PhD Thesis, Chalmers University of Technology, Department of Building Materials, Goteborg, Sweden, 1996.