

ارزیابی آزمایشگاهی اثر ترکیب متاکائولین و پومیس بر دوام و خوردگی میلگرد در بتن خودتراکم

طهماسب خزائی

دانشجوی کارشناسی ارشد سازه، گروه عمران، دانشگاه سیستان و بلوچستان

محمود میری*

دانشیار گروه عمران، دانشگاه سیستان و بلوچستان

مهراله رخشانی مهر

استادیار دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه الزهرا

عبدالقیوم دهواری

دانشجوی دکترای سازه، گروه عمران، دانشگاه سیستان و بلوچستان

چکیده

در این مقاله به تاثیر افزودن ترکیب پوزولانهای پومیس و متاکائولین بر دوام و خوردگی میلگرد در بتن خودتراکم، به منظور ارائه طرح اختلاطی مقاوم در برابر عوامل جوی، جهت استفاده در عرشه و پایه پل‌ها، اسکله‌ها و سازه‌های دریایی پرداخته شده است. برای ساخت نمونه‌های این تحقیق از جایگزینی ۱۰ درصد پومیس و ۱۰ درصد متاکائولین و ترکیب‌های ۱۰ و ۱۵ درصدی آن‌ها به عنوان جایگزین بخشی از سیمان، استفاده شده است. آزمایش‌های انجام شده شامل مقاومت فشاری، نفوذ آب، مقاومت الکتریکی ویژه، ضریب انتشار یون کلر (RCMT) و خوردگی تسریع شده می‌باشد. آزمایش‌ها در سن ۷، ۱۴، ۲۸، ۵۶، ۹۰ و ۱۸۰ روز انجام شده و نتایج نشان می‌دهد، ترکیب پومیس و متاکائولین ضمن حفظ خواص مکانیکی بتن خودتراکم، دوام بتن را بهبود و سن مشاهده ترک در آزمایش خوردگی تسریع شده را نسبت به نمونه شاهد، به طور چشمگیری افزایش می‌دهد. نمونه‌های ساخته شده ضریب نفوذ یون کلر را تا ۲۸/۱ درصد کاهش و سن مشاهده ترک را ۲۶/۴ درصد افزایش داده است.

واژه‌های کلیدی: بتن خودتراکم، پومیس، متاکائولین، خوردگی میلگرد.

* نویسنده مسئول: mmiri@eng.usb.ac.ir

۱- مقدمه

مقاومت بهترشان در برابر خوردگی نسبت به نمونه شاهد است. نتایج XRD طرح‌های تحقیق وی نشان‌دهنده وجود کمتر مقدار هیدروکسید کلسیم و شکل‌گیری نسبتاً بالاتر نمک فریدل (کاهش سطح کلر آزاد) در طرح‌های شامل خاکستر آتشفشانی و پومیس در مقایسه با بتن معمولی است. استفاده از این پوزولانها، انتشار یون کلر در بتن را کاهش داده و در نتیجه خوردگی موضعی فولاد را کاهش می‌دهد. همچنین بر اساس مطالعات این پژوهشگر نرخ خوردگی در نمونه‌های دارای پومیس در مقایسه با بتن معمولی کمتر است [۶].

Khandaker در تحقیق دیگری نشان داد که جای‌گزینی ۱۰ تا ۲۰٪ پومیس بجای سیمان تپ I و II، دوام بتن را در محیط‌های دریایی تقریباً به میزان ۶٪ افزایش می‌دهد [۷].

Demirel و Keles-temur تأثیر دما بر خواص مکانیکی بتن حاوی میکروسلیس و پومیس را مورد مطالعه قرار داده و نشان داده‌اند که مقاومت فشاری بتن با پومیس کاهش می‌یابد، علت این کاهش مقاومت، کم شدن مقدار سیمان به دلیل جای‌گزینی پومیس بوده است. تقریباً ۵۰٪ سیلیس موجود پومیس در حضور آب می‌تواند با هیدرواکسید کلسیم (تولید شده طی واکنش هیدراتاسیون سیمان پرتلند) ترکیب شود و ترکیب پایدار سیلیکات کلسیم (S-H) که خاصیت چسبندگی و سیمانی دارد را تشکیل دهد. چنین واکنش‌های پوزولانی در دراز مدت به دوام و مقاومت بتن کمک می‌کند [۸].

Bondar و همکاران در مطالعه‌ای نشان دادند که پومیس تفتان بدون افزایش حرارت، فعالیت پوزولانی بیشتری نسبت به سایر پوزولان‌های ایران دارد. پوزولان پومیس تفتان در مقایسه با سایر پوزولان‌های کشور (مطالعه شده در تحقیق وی) بیشترین فعالیت پوزولانی و کمترین مقدار کاهش وزن در اثر حرارت، بیشترین مقدار کلسیم محلول را دارد که از فاکتورهای مهم مواد معدنی طبیعی انتخابی جای‌گزین سیمان، است [۹].

در مطالعه‌ای که بر روی خواص مهندسی و دوام بتن خودتراکم حاوی پومیس توسط رضانیانپور و همکاران (۲۰۱۲) انجام شد، نتیجه گرفته شد که افزودن پومیس به بتن خودتراکم، ویسکوزیته این نوع بتن را در درصدهای مختلف آب به مواد سیمانی، تغییر می‌دهد [۴]. در بررسی مقاومت فشاری این بتن نیز ملاحظه شد که، مقاومت فشاری نمونه‌های SCC حاوی پومیس در سنین اولیه

بتن خودتراکم (SCC) به بتنی گفته می‌شود که به علت داشتن روانی بسیار زیاد بدون نیاز به تراکم یا لرزه به راحتی در هر قالبی و با هر تراکمی از آرماتور، قرار گرفته و با پر کردن قالب، بتنی با تراکم بالا ایجاد کند. در واقع SCC مخلوطی با روانی بالا است که قابلیت شکل‌پذیری بسیار زیادی دارد و بدون به وجود آمدن جداشدگی دانه‌ها و مسائلی از این قبیل می‌تواند محصولی یک دست و متراکم به وجود آورد. با اینکه در ابتدا هدف از بتن خودتراکم رسیدن به بتنی با دوام و طول عمر بیشتر از بتن‌های عادی و کاهش هزینه‌های سازه‌های بتنی بود، توانایی‌ها و قابلیت‌های این نوع بتن به سرعت آن را به یکی از پر کاربردترین انواع بتن تبدیل کرد [۱]. لذا بررسی مقاومت، دوام و خوردگی میلگرد در این بتن و در شرایط محیطی مختلف طی سال‌های اخیر مورد توجه محققان قرار گرفته است.

از سوی دیگر خوردگی میلگردها در بتن از جمله رایج‌ترین خرابی‌ها در سازه‌های بتن آرمه است. در گزارشی که در سال ۱۹۹۱ در مرکز تحقیقات حمل و نقل آمریکا تهیه شده است، هزینه‌ی تعمیر سالانه‌ی عرشه‌ی پل‌های دچار خوردگی، ۵۰ تا ۲۰۰ میلیون دلار تخمین زده شده است. که این رقم تا سال ۲۰۰۷ به بیش از ۱۵۰ میلیون دلار آمریکا رسیده است [۲].

بسیاری از محققان استفاده از مواد سیمانی (پوزولانی) را برای کاهش این نگرانی‌ها پیشنهاد کرده‌اند و سال‌ها است که تحقیقات در خصوص استفاده از مواد پوزولانی جهت بهبود خواص دوامی بتن در جریان است [۳].

یکی از ارزان‌ترین و پر کاربردترین این پوزولان‌ها پومیس است. پومیس تلفیقی از مواد معدنی و خاکستر آتشفشانی است که با توجه به فوران‌های مکرر آتشفشانی در اقصی نقاط جهان یافت می‌شود و امروزه با توجه به فعالیت پوزولانی مناسب و مواد سیلیسی موجود در آن به‌طور گسترده‌ای در ترکیب با سیمان پرتلند یا مخلوط بتن استفاده می‌شود [۴].

نتایج تحقیق Khandaker و Lachemi نشان می‌دهد که استفاده از پوزولان پومیس باعث افزایش مقاومت در برابر خوردگی شده و ضریب انتشار یون کلر را در سنین بالا کاهش می‌دهد [۵]. همچنین Khandaker نشان داد، کاهش وزن کمتر میلگردهای داخل بتن در نمونه‌های حاوی پومیس نشان‌دهنده

در همین تحقیق نشان داده شد که وجود متاکائولین در بتن خودتراکم مقاومت الکتریکی را به ازای نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۳۲، ۰/۳۸ و ۰/۴۵ به ترتیب ۲۴٪، ۲۶٪ و ۲۰٪ افزایش داده است. با توجه به تأثیرات کلی متاکائولین در این پژوهش، به نظر می‌رسد که می‌توان ۱۰ درصد متاکائولین را به عنوان یک جای‌گزین مناسب در نظر گرفت [۱۱].

با توجه به مطالعات فوق در این مقاله اثر استفاده از متاکائولین که پوزولانی با سطح ویژه بالاست به عنوان مکمل و به همراه پومیس برای بهبود خواص کلی بتن خودتراکم مورد بررسی قرار گرفته است.

بر این اساس در این پژوهش اثر ترکیب این دو پوزولان به منظور استفاده از مزایای توأم آن‌ها در جلوگیری از خوردگی میلگرد در بتن خود تراکم مد نظر قرار گرفته است.

خواص مکانیکی و دوام مخلوط های SCC ساخته شده شامل مقاومت فشاری، نفوذ آب، مقاومت الکتریکی ویژه، ضریب انتشار یون کلر (RCMT) و خوردگی تسریع شده است.

۲- برنامه آزمایشگاهی

۱-۲- مواد و مصالح مصرفی

مصالح سنگی مورد استفاده از معادن اطراف زاهدان تهیه گردیده است. آزمایش وزن مخصوص و جذب آب مصالح درشت دانه بر اساس استاندارد ASTM C127-07 و آزمایش وزن واحد حجم آن بر اساس استاندارد ASTM C29/C29 M-09 انجام شده که مشخصات اندازه‌گیری شده در جدول شماره ۱ ارائه شده است. آزمایش وزن مخصوص و جذب آب مصالح ریز دانه بر اساس استاندارد ASTM C128-07a انجام و مشخصات اندازه‌گیری شده در جدول شماره ۲ آمده است.

به منظور دانه بندی یکسان، بیشترین تراکم و حذف ترکیبات زیان آور، مصالح ابتدا به خوبی شسته و پس از خشک نمودن در اون، الک گردیده و حد وسط استاندارد ASTM C33-03 مطابق شکل ۱ از مصالح مانده روی هر الک انتخاب گردید.

وزن مخصوص فوق روان کننده و پودر سنگ استفاده شده به ترتیب برابر ۱۱۰۰ و ۲۶۲۰ کیلو گرم بر متر مکعب بوده است. نتایج حاصل از آنالیز XRF سیمان مصرفی، پوزولان تفتان و متاکائولین در جدول شماره ۳ ذکر شده است.

نسبت به نمونه شاهد، کاهش یافته است. اما نکته جالب این است که در سن ۲۷۰ روز، مقاومت بتن حاوی پومیس از بتن خودتراکم معمولی بیشتر گزارش شده است.

علاوه بر آن نتایج این پژوهش نشان داد که استفاده از میکروسیلیس و پومیس به طور قابل توجهی مقاومت در برابر نفوذ کلر (در مقایسه با بتن شاهد) را افزایش داده است. در سن ۹۰ روز نمونه‌های بتن معمولی مقدار شار عبوری ۲۶۷۵ کلمب داشته است در حالی که شار عبوری در طرح‌های پومیس و میکروسیلیس به ترتیب برابر ۵۳۹ و ۱۴۵۷ کلمب بوده است [۴]. در نهایت عملکرد پومیس و میکروسیلیس در مقابل نفوذ آب و یون کلر از SCC معمولی بهتر بوده است. مثلاً افزودن ۱۵٪ پومیس و ۷٪ میکروسیلیس به بتن خودتراکم در سن ۹۰ روز، عمق نفوذ آب نمونه‌ها را به ترتیب ۱۹٪ و ۵۴٪ کاهش داده است.

Hassan و همکاران (۲۰۱۲) در تحقیقی پیرامون تأثیر متاکائولین بر دوام بتن‌های خودتراکم نشان داده‌اند که اضافه کردن متاکائولین نیاز به فوق‌روان‌کننده را افزایش می‌دهد. وقتی درصد متاکائولین تا ۲۵٪ در بتن خودتراکم افزایش پیدا می‌کند نیاز به فوق‌روان‌کننده تا ۳۰٪ بالا می‌رود. به هر حال در مقایسه با میکروسیلیس، نیاز به فوق‌روان‌کننده کمتری دارد.

نتایج مقاومت فشاری بتن حاوی متاکائولین و میکروسیلیس در سن ۲۸ روز نشان می‌دهد که مقاومت فشاری بتن خودتراکم نسبت به نمونه‌های شاهد افزایش یافته است [۱۰].

در تحقیق دیگری که در سال ۲۰۱۲ توسط مدن دوست و موسوی بر روی خواص بتن خودتراکم تازه و سخت شده حاوی متاکائولین با نسبت‌های آب به مواد سیمانی ۰/۳۲، ۰/۳۸ و ۰/۴۵ انجام شد، نتایج نشان داد که وجود متاکائولین در بتن خودتراکم مقاومت فشاری را در سنین اولیه و دراز مدت بهبود یافته است. با این حال، این اثر در مدت ۱۴ روز بارزتر بوده است (تا ۲۷٪). سرعت عبور امواج فراصوت نیز مشابه نتایج مقاومت فشاری است [۱۱].

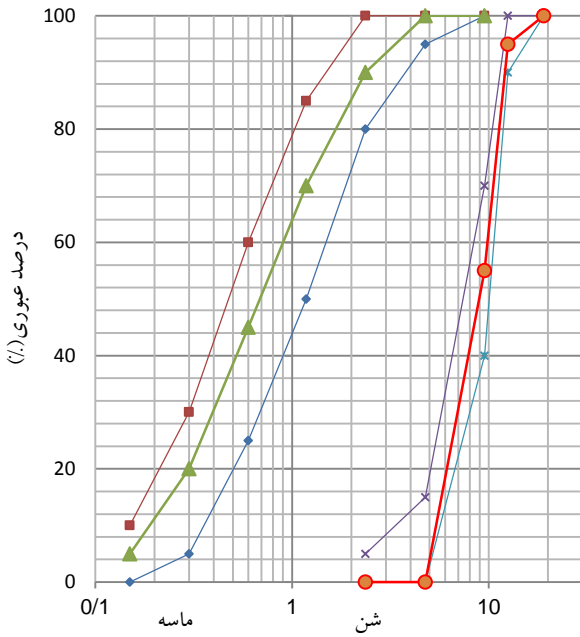
از دیگر نتایج تحقیق فوق به این نکته می‌توان اشاره کرد که وجود متاکائولین باعث کاهش نفوذ آب در بتن خودتراکم شده است. همه مخلوط‌های حاوی متاکائولین نفوذ آب کمی (کمتر از ۳٪ در ۳۰ دقیقه) داشته، که نشان دهنده کیفیت خوب بتن است.

جدول ۱- مشخصات فیزیکی درشت دانه مصرفی

مقادیر	خصوصیات فیزیکی	نوع سنگدانه
۲۷۳۱	وزن مخصوص اشباع با سطح خشک (کیلوگرم بر متر مکعب)	درشت دانه
۰/۸۴	جذب آب (درصد)	
۱۲/۵	اندازه بزرگترین دانه (میلیمتر)	
۱۶۳۵	وزن واحد حجم (کیلوگرم بر متر مکعب)	

جدول ۲- مشخصات فیزیکی ریزدانه مصرفی

مقادیر	خصوصیات فیزیکی	نوع سنگدانه
۲۶۰۴	وزن مخصوص اشباع با سطح خشک (کیلوگرم بر متر مکعب)	ریز دانه
۱/۵۸	جذب آب (درصد)	
۳/۱۷۵	اندازه بزرگترین دانه (میلیمتر)	
۲/۷۰	مدول نرمی	



شکل ۱- منحنی دانه بندی مصالح مصرفی

جدول ۳- نتایج حاصل از آنالیز XRF بر روی سیمان، پوزولان تفتان و متاکائولین

نوع مصالح	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Mgo	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	L.O.I
سیمان	۲۱/۰۴	۵/۱۲	۳/۶	۱/۷۵	۶۳/۰۴	۰/۶	۰/۴۳	۲/۳۶	۱/۰۸
پوزولان تفتان	۶۱	۱۸/۵	۵	۲/۶	۶/۵	۱/۸	۱/۶	۰/۳۸	۲
متاکائولین	۵۲/۱	۴۴/۷	۰/۸	۰/۰۳	۰/۰۹	۱/۹	۰/۰۳	-	۰/۷

جدول ۴- طرح مخلوط نمونه‌های مورد آزمایش (kg/m³)

نام طرح	شن*	ماسه*	سیمان	پودر سنگ	آب به پودر	آب اختلاط	درصد فوق‌روان کننده	اصلاح کننده لزجت	پومیس	متاکائولین
Control	۶۶۰	۸۵۴	۴۵۰	۱۱۰	۰/۴	۲۲۴	۱/۵	۱/۷۱۴	۰	۰
M10	۶۴۷	۸۳۹	۴۰۵	۱۱۰	۲۲۴	۱۹	۱/۹	۱/۷۱۴	۰	۴۵
P10	۶۵۵	۸۵۱	۴۰۵	۱۱۰	۰/۴	۲۲۴	۱/۸	۱/۷۱۴	۴۵	۰
M5P5	۶۴۹	۸۴۰	۴۰۵	۱۱۰	۲۲۴	۱۹	۱/۹	۱/۷۱۴	۲۲/۵	۲۲/۵
M10P10	۶۴۳	۸۳۵	۳۶۰	۱۱۰	۲۲۴	۱۹	۲/۵	۱/۷۱۴	۴۵	۴۵

* (اشباع با سطح خشک)

۲-۲- مشخصات طرح اختلاط ها

متاکائولین و ۵ درصد پومیس و در نهایت ترکیب ۱۰ درصد

متاکائولین و ۱۰ درصد پومیس می‌باشد. نسبت آب به پودر ثابت و

به میزان ۰/۴ در نظر گرفته شده، نسبت سنگ‌دانه ها بر اساس

طرح اختلاط‌های ساخته شده شامل نمونه خودتراکم شاهد، بتن با

۱۰ درصد متاکائولین، ۱۰ درصد پومیس، ترکیب ۵ درصد

فرکانس ۱۲۸ کیلوهرتز و ولتاژ ۳ ولت (جریان AC) و با کمک دو صفحه مسی قرار گرفته بر روی دو وجه مقابل آزمون، مقاومت الکتریکی بتن محصور در صفحات را اندازه گیری می کنند [۱۵]. برای تعیین مقاومت ویژه الکتریکی، از رابطه (۱)، استفاده شده است.

$$\rho = \frac{Z A}{L} \quad (1)$$

که در آن:

ρ = مقاومت ویژه الکتریکی [$\Omega \cdot m$]

Z = مقاومت الکتریکی اندازه گیری شده [Ω]

A = سطح مقطع آزمون در تماس با خمیر [m^2]

L = ارتفاع آزمون یا فاصله بین دو صفحه مسی [m]

آزمایش نفوذ تسریع شده (انتشار) یون کلر (RCMT): در این آزمایش ضریب انتشار یون کلر بر اساس استاندارد NT BUILD 492 با نمونه های استوانه ای ساخته شده به قطر ۱۰۰ و ارتفاع ۲۰۰ میلیمتر اندازه گیری شده است. [۱۶].

برای محاسبه ضریب مهاجرت یون کلر پس از شکستن آزمون ها و پاشیدن محلول نیترات نقره ۰/۱ نرمال و محاسبه عمق نفوذ میانگین (شکل ۲)، بر اساس فرمول (۲) ضریب مهاجرت یون کلر تعیین شده است.



شکل ۲- آزمون ها پس از آزمایش RCMT

$$D_{nssm} = \frac{0.239(273+T)L}{(U-2)t} \left(X_d - 0.238 \sqrt{\frac{(273+T)LX_d}{U-2}} \right) \quad (2)$$

T : مقدار متوسط درجه حرارت اولیه و نهایی در محلول آنولیت،

(درجه سانتیگراد)

L : ضخامت نمونه، (میلیمتر)

X_d : مقدار متوسط عمق نفوذ، (میلیمتر)

که در آن:

D_{nssm} : ضریب انتشار غیر پایدار یون کلر،

(10^{-12} to 10^{-10} m^2/s)

U : قدر مطلق مقدار ولتاژ اعمال شده، (V)

پیشنهاد Ambroise وهمکاران انتخاب و طرح اختلاط بتن خودتراکم منطبق بر روش ارائه شده در مرجع EFNARC تهیه شده است (جدول ۴) [۱۲ و ۱۳].

۳-۲- آزمایش های انجام شده

مقاومت فشاری: آزمایش مقاومت فشاری براساس استاندارد ASTM C39 M-09a با آزمون های مکعبی ۱۰۰ میلیمتری و در سنین ۷، ۲۸، ۵۶، ۹۰ و ۱۸۰ روز انجام شده است.

آزمایش عمق نفوذ آب: آزمایش نفوذ آب بر اساس استاندارد DIN 1048، با آزمون های استوانه ۱۵×۱۵ سانتیمتری در سن ۲۸ روزه تحت فشار ثابت ۵ اتمسفر انجام شده است.

آزمایش جذب آب حجمی: درصد جذب آب حجمی براساس استاندارد BS 1881 part 122، با آزمون های بتن مغزه-گیری شده از سازه یا اجزای پیش ساخته به شکل استوانه به قطر ۷۵ و ارتفاع ۱۵۰-۳۲ میلیمتر تعیین می شود در این پژوهش اندازه-گیری جذب آب حجمی با الگوبرداری از استاندارد فوق عمدتاً شبیه به BS 1881 قدیمی، بر روی آزمون های مکعبی ۱۰×۱۰×۱۰ سانتی متری در سن ۲۸ روز انجام گردید. از آنجا که آزمون های مورد استفاده مکعبی بوده، باید برای مقایسه با الزامات آیین نامه های مربوطه لازم است نتایج به نمونه استاندارد استوانه ای تبدیل گردد. بدین منظور برای تبدیل آزمون های مکعبی به استوانه ای استاندارد به قطر و ارتفاع ۷/۵ سانتیمتر، از روش پیشنهادی نعمتی چاری و شکرچی زاده استفاده شد [۱۴].

مقاومت ویژه الکتریکی: برای سنجش مقاومت ویژه الکتریکی نمونه های بتنی، همانند تحقیقات انجام شده توسط بسیاری از محققین از جمله McCarter، از دستگاهی استفاده شده که با

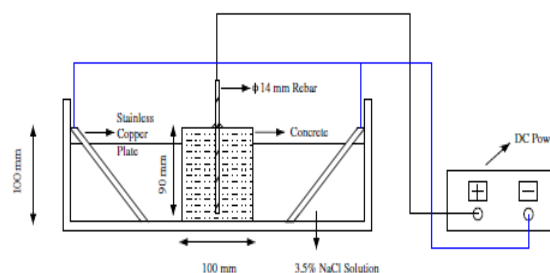
T : مدت زمان آزمایش، (ساعت)

صورت روزانه اندازه گیری شده و به منظور حفظ خواص اولیه محلول الکترولیت هر ده روز یکبار تعویض شده است (شکل ۳).



شکل ۴- نحوه انجام آزمایش خوردگی تسریع شده

آزمایش خوردگی تسریع شده: با توجه به طولانی بودن فرآیند خوردگی، در آزمایشگاه از روش های تسریع شده استفاده می شود، آزمایش فوق با الگوبرداری از تحقیقات انجام شده توسط Hassan و همکاران، Erne و همکاران، Binici و همکاران و Topcu و Bog'a انجام شده است [۱۰ و ۱۶ و ۱۷]. در شکل (۳) نحوه انجام آزمایش خوردگی تسریع شده به صورت شماتیک نمایش داده شده است.

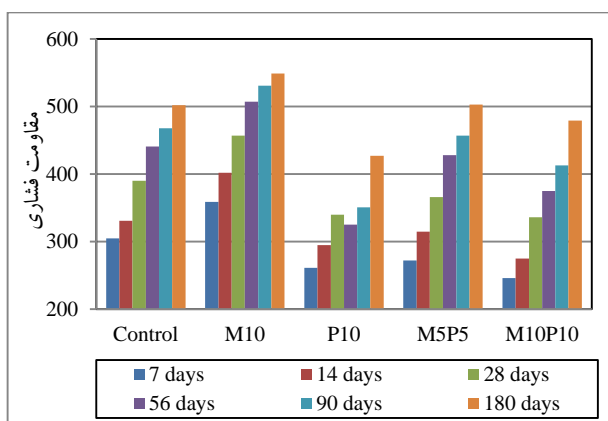


شکل ۳- مکانیزم آزمایش خوردگی تسریع شده

۳- نتایج و بررسی آنها

۳-۱- نتایج مقاومت فشاری

نتایج آزمایش مقاومت فشاری در سنین ۷، ۱۴، ۲۸، ۵۶، ۹۰ و ۱۸۰ روز بر روی آزمون های مکعبی ۱۰۰ میلی متری بر حسب کیلوگرم بر سانتی متر مربع در شکل ۵ مشاهده می شود.



شکل ۵- نتایج مقاومت فشاری نمونه ها در سنین مختلف

طرح حاوی متاکائولین تنها، در تمامی درصدها و تمامی سنین مقاومت فشاری بیشتری نسبت به نمونه ی شاهد کسب کرده است، در مقابل پومیس باعث افت مقاومت فشاری گردیده است. نتایج نشان می دهد که افزودن متاکائولین به پومیس افت مقاومت ناشی از پومیس را تا اندازه ای جبران نموده است به طوری که طرح M5P5 در سن ۱۸۰ روز مقاومت نمونه شاهد را کسب نموده است.

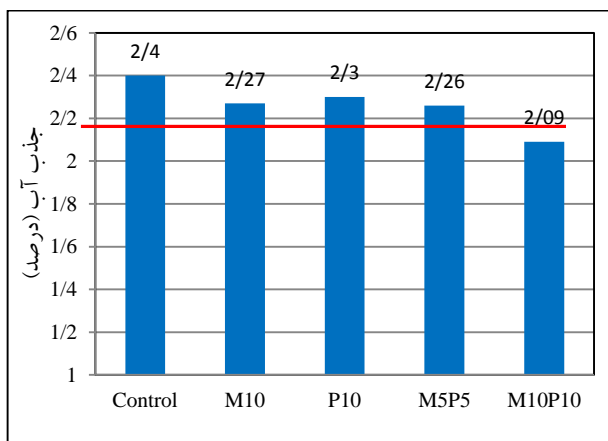
به منظور انجام این آزمایش برای هر طرح یک آزمون و مجموعاً ۵ آزمون ساخته شد. آزمون های استفاده شده در این آزمایش استوانه ای به قطر ۱۵۰ میلی متر و ارتفاع ۳۰۰ میلی متر بود که در محور مرکزی آنها، میلگرد آجدار، به قطر اسمی ۱۸ میلی متر و طول ۳۵۰ میلی متر قرار داده شد. این میلگردها طوری تعبیه شده که سر آنها در حدود ۱۰۰ میلی متر از بتن بیرون و انتهای آنها نیز در حدود ۵۰ میلی متر از کف قالب فاصله دارد. به جهت برقراری اتصال مناسب جریان به میلگردها، ضمن زنگ زدایی با برس سیمی، در انتهای بیرونی میلگرد جهت اتصال سیم، سوراخی تعبیه گردید. همچنین به منظور جلوگیری از تماس آب با قسمت بیرون زده میلگرد از آزمون در مدت عمل آوری، طول ۱۳۰ میلی متر (۱۰۰ میلی متر بیرون آزمون و ۳۰ میلی متر از میلگرد درون آزمون) با پوشش اپوکسی عایق شده است. سیستم خوردگی تسریع شده استفاده شده (شکل ۳) در این تحقیق شامل یک حوضچه فایبرگلاس، محلول الکترولیت (آب مقطر شامل ۵٪ جرمی کلرید سدیم) و شبکه فلزی واقع شده در کف حوضچه و یک منبع تغذیه ۱۲ ولت، می باشد. نمونه ها طوری در محلول الکترولیت روی شبکه فلزی قرار می گیرد که یک سوم ارتفاع نمونه جهت سهولت ورود اکسیژن خارج از آب قرار گیرد. جریان عبوری در این سیستم به

جدول ۵- مقادیر مجاز عمق نفوذ آب در شرایط مختلف محیطی

در آیین نامه پایایی

شرایط محیطی	A	C و B	F و E, D
عمق نفوذ آب در سن ۲۸ روز (mm)	حداکثر ۵۰	حداکثر ۳۰	حداکثر ۱۰

افزایش درصد پومیس و متاکائولین ارتباط مستقیم با کاهش جذب آب نشان می‌دهد به گونه‌ای که کمترین جذب آب مربوط به طرح M10P10 با ۲۰ درصد جایگزینی سیمان است. این طرح جذب آب بتن را ۱۴/۸ درصد کاهش داده است. می‌توان نتیجه گرفت با تشکیل ژل‌های ثانویه ناشی از واکنش $Ca(OH)_2$ با SiO_2 موجود در پومیس و متاکائولین و در نتیجه بهتر شدن ریز ساختار بتن، ارتباط موئینه حفرات جذب آب مخلوط SCC به شدت کاهش یافته است.



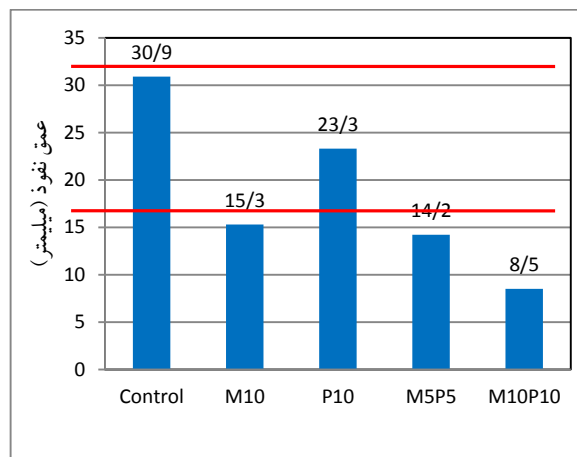
شکل ۷- نتایج جذب آب نمونه‌ها

از مقایسه‌ی نتایج جذب آب بدست آمده در این تحقیق با الزامات آیین‌نامه‌ی ملی پایایی بتن در محیط خلیج فارس و دریای عمان (پیشنهادی) (جدول ۶)، ترکیب ۱۰ درصد متاکائولین با ۱۰ درصد پومیس بهترین نتیجه را در قرارگیری در شرایط محیطی بسیار شدید آئین‌نامه (شرایط F و E و D) کسب نموده است.

همچنین از آنجا که در توصیه‌های CIRIA برای مناطق عربی در حاشیه خلیج فارس و دریای سرخ و غیره، جذب آب کوتاه مدت اندازه‌گیری شده مطابق روش BS 1881 part 122، حداکثر به ۲ درصد محدود شده است، مشاهده می‌گردد تقریباً طرح اختلاط M10P10 برای استفاده در شرایط مناطق ساحلی خلیج فارس مناسب است. [۱۸]

۲-۳- نتایج آزمایش عمق نفوذ و جذب آب

نتایج آزمایش عمق نفوذ آب طرح‌های خودتراکم در شکل ۶ نشان داده شده است. نتایج بیانگر تأثیر چشمگیر افزودن پوزولان و ترکیب آنها بر مقاومت در برابر نفوذ آب در بتن خودتراکم است. کمترین نفوذ آب مربوط به طرح M10P10 است که ۳۶۳ درصد نسبت به نمونه‌ی شاهد بهبود داشته است. می‌توان گفت عمق نفوذ آب با درصد پوزولان جایگزین سیمان نسبت عکس دارد و نیز ترکیب پوزولان‌های متاکائولین و پومیس در مقایسه با طرح‌های تک پوزولانی عملکرد بهتری داشته است. ذرات پوزولان به علت اندازه ریز خود در ساختار خمیر سیمان، باعث کمتر شدن خلل و فرج بتن و در نتیجه کاهش عمق نفوذ گردیده اند.



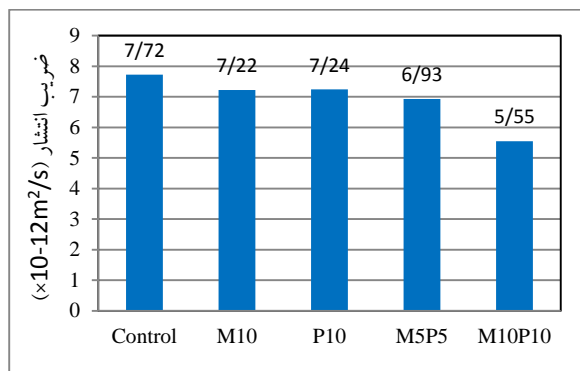
شکل ۶- نتایج عمق نفوذ

در مقایسه با الزامات آیین‌نامه ملی پایایی در خصوص عمق نفوذ آب (جدول ۵)، طرح M10P10 قابلیت استفاده در شرایط محیطی فوق‌العاده شدید (F و E و D) را دارا است که نشان‌دهنده‌ی این امر است که ترکیب پومیس و متاکائولین می‌تواند بتنی با خاصیت نفوذناپذیری بالا و مناسب برای اسکله‌ها و عرشه پل‌ها را ایجاد نماید. سایر طرح‌های حاوی ترکیب پومیس و متاکائولین نیز با کاهش عمق نفوذ آب نسبت به نمونه‌ی شاهد در محدوده‌ی شرایط محیطی شدید (C و B) قرار گرفته است که عملکرد مناسبی است. نمونه‌ی شاهد که بیشترین عمق نفوذ را دارد، تنها در شرایط محیطی متوسط قابل استفاده است.

نتایج آزمایش جذب آب نیم ساعته در شکل ۷ ارائه گردیده است. همان‌گونه که در این شکل نشان داده شده طرح‌های حاوی ترکیب پوزولان‌های پومیس و متاکائولین در مقایسه با بتن شاهد و نمونه‌های حاوی متاکائولین و پومیس تنها، جذب آب کمتری داشته است.

۳-۴- نتایج آزمایش نفوذ یون کلر

شکل ۹ نتایج انتشار یون کلر در سن ۹۰ روز را نشان می‌دهد. بر اساس این نتایج اضافه نمودن پومیس و متاکائولین به مخلوط بتن نفوذ یون کلر در بتن را کاهش داده است. بیشترین کاهش ضریب نفوذ باز هم در طرح M10P10 مشاهده می‌شود که ۲۰ درصد پوزولان دارد و ضریب انتشار یون کلر نمونه‌ی شاهد را ۲۸,۱ درصد بهبود بخشیده است.



شکل ۹- مقایسه ضریب انتشار یون کلر طرح‌ها

ترکیب پوزولان‌ها و افزایش درصد آن‌ها نسبت مستقیم با کاهش نفوذپذیری بتن داشته است. با توجه به این که پس از سخت شدن بتن، حفره‌هایی برجا می‌ماند، بنابراین محصولات واکنش‌های پوزولانی پومیس و متاکائولین باعث پر شدن حفره‌ها و کاهش ابعاد و یا مسدود شدن ارتباط حفرات با یکدیگر گردیده و در نتیجه با کاهش نفوذپذیری باعث بهبود دوام بتن در برابر حمله‌ی یون‌ها شده و عملکرد بتن را در برابر محیط‌های خورنده کلرایدی افزایش داده است.

۳-۵- نتایج آزمایش خوردگی تسریع شده

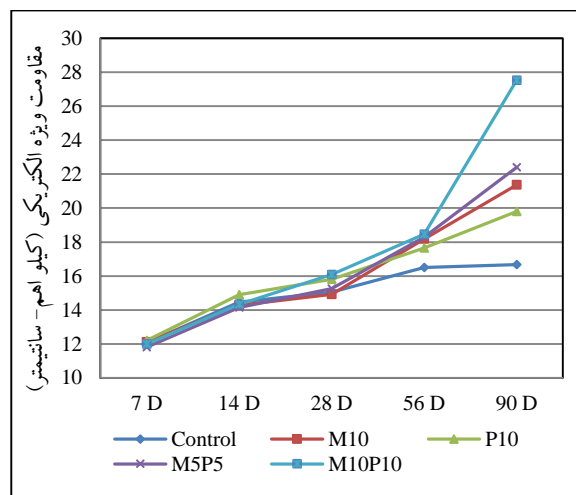
در شکل ۱۰ روند تغییرات جریان عبوری نمونه‌های استوانه‌ای دارای میلگرد در سن ۹۰ روز تحت اختلاف پتانسیل ثابت ۱۲ ولت و در محلول NaCl پنج درصد قرار گرفته، مشاهده می‌شود. طرح‌های دارای پوزولان، جریان عبوری اولیه کمتری نسبت به نمونه شاهد داشته است که نشان دهنده کاهش رسانایی بتن ناشی از انسداد و قطع اتصال زنجیره‌ای بین حفرات و همچنین کوچک‌تر شدن ارتباط حفرات متأثر از واکنش‌های پوزولانی است. می‌دانیم که رسیدن جریان به آرماتور از طریق زنجیره‌ی حفرات داخل بتن صورت می‌گیرد لذا با انسداد بسیاری از این زنجیره‌ها به دلیل تشکیل ژل‌های ثانویه سیلیکات جریان کمتری از این نمونه‌ها عبور نموده است.

جدول ۶- مقادیر مجاز درصد جذب آب کوتاه مدت در شرایط مختلف محیطی در آیین نامه پایایی (خط افقی نمودار)

شرایط محیطی	A	C و B	F و E, D
درصد جذب آب (%)	حداکثر ۴	حداکثر ۳	حداکثر ۲

۳-۳- نتایج آزمایش مقاومت ویژه الکتریکی

شکل ۸ مقاومت ویژه الکتریکی تمامی طرح‌ها را در سنین ۷، ۱۴، ۲۸، ۵۶ و ۹۰ روز نشان می‌دهد. نتایج این آزمایش نشان‌دهنده‌ی تاثیر پوزولان‌ها در افزایش مقاومت ویژه الکتریکی بتن خودتراکم و به ویژه در سنین بالاتر است.



شکل ۸- نتایج مقاومت ویژه الکتریکی

این تاثیر از سن ۱۴ روز به بعد کاملاً مشهود است و هرچه سن بتن افزایش یافته واکنش‌های تشکیل ژل ثانویه در بتن‌های حاوی پومیس و متاکائولین تکمیل‌تر شده و بلورهای بزرگ و ناپایدار $Ca(OH)_2$ به بلورهای کوچک‌تر تبدیل شده است، در نتیجه حجم فضاهای خالی را کم کرده است. با کوچک شدن منافذ، چسبندگی مخلوط SCC بیشتر، حفرات موئینه کمتر و مقاومت الکتریکی بتن بیشتر شده است. مقاومت الکتریکی بتن با افزایش درصد پوزولان در همه‌ی طرح‌ها، افزایش یافته است. طرح اختلاط M10P10 بهترین عملکرد در افزایش مقاومت الکتریکی را دارد. می‌توان گفت طرح‌های دارای ترکیب پومیس و متاکائولین نسبت به طرح‌های حاوی متاکائولین و پومیس تنها، دارای مقاومت الکتریکی بیشتری است. باز هم این مسئله با افزایش عمر بتن نمود بهتری دارد.

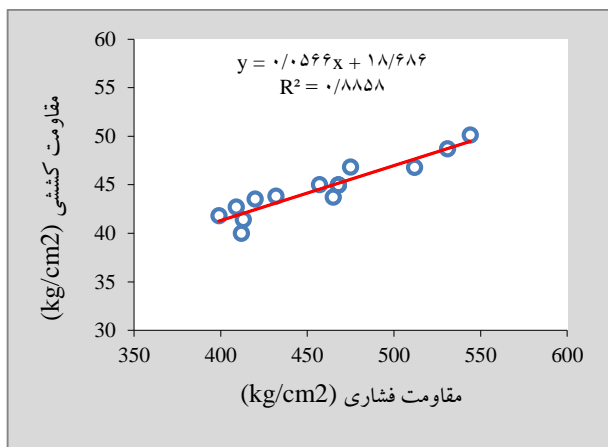
۳-۶- ارتباط نتایج آزمایش های دوام بتن با یکدیگر

برای بررسی دقیق داده‌ها و ویژگی‌های بتن و طرح‌های اختلاط، انجام آزمایش‌های گوناگون ضروری است. از آنجا که یک ویژگی از بتن و خمیر سیمان در نتایج چند آزمایش مختلف تأثیر می‌گذارد لذا نمی‌توان با اکتفا به نتایج یک یا دو آزمایش با قطعیت در مورد مشخصات آن بتن یا خمیر سیمان داوری کرد. بنابراین برای پیش‌بینی دقیق‌تر از برخی ویژگی‌های بتن با در دست داشتن برخی ویژگی‌های دیگر همان بتن، می‌توان رابطه میان نتایج آزمایش‌های مختلف را بررسی نمود. در اینجا به ارتباط بین آزمایش‌های انجام شده می‌پردازیم.

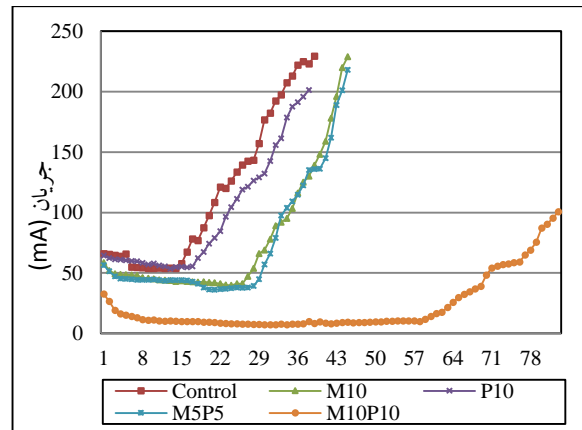
شکل ۱۲ ارتباط بین مقاومت فشاری و کششی در سن ۹۰ روز را نشان می‌دهد این شکل نشان‌دهنده‌ی ارتباط مستقیم این دو پارامتر است و با افزایش مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی پوزولان، مقاومت کششی نیز افزایش یافته است.

در شکل ۱۳ ارتباط بین عمق نفوذ و جذب آب در سن ۲۸ روز را نشان داده شده است. بر این اساس با افزایش عمق نفوذ نمونه‌های حاوی پوزولان، درصد جذب آب نیز افزایش یافته است.

از مهم‌ترین پارامترهای دوامی، ضریب نفوذ(انتشار) یون کلر و سن مشاهده ترک است. وجود ارتباط مناسب بین این دو، در شکل ۱۴ نشان داده شده است. (ضریب همبستگی $R^2=0.882$) ترکیب پوزولان‌های پومیس و متاکائولین، مقاومت در برابر خوردگی را بصورت چشمگیر افزایش داده و ضریب مهاجرت یون کلر را کاهش داده است. این امر می‌تواند به علت انسداد حفرات، تشکیل بلورهای ریزتر و کوچک شدن حفرات باشد.

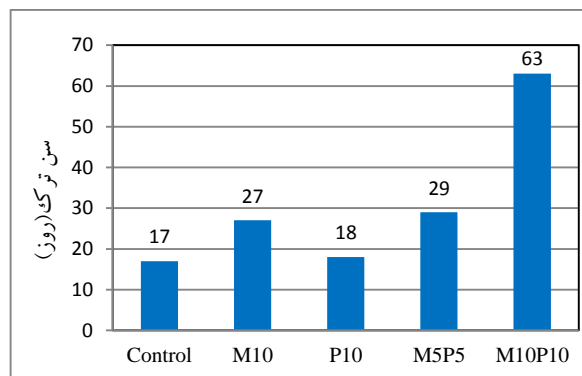


شکل ۱۲- ارتباط بین مقاومت فشاری و کششی



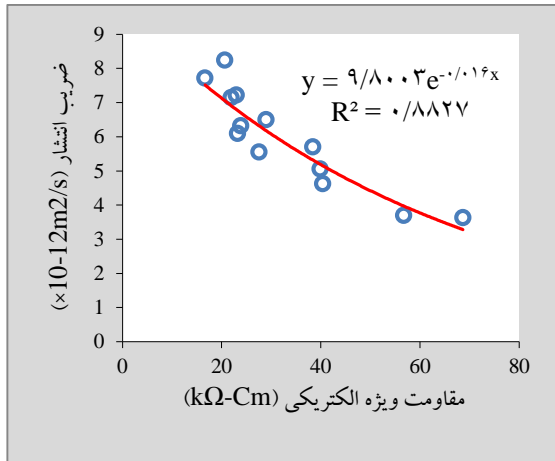
شکل ۱۰- نتایج جریان عبوری در طی آزمایش خوردگی تسریع شده

افزایش محصولات خوردگی آرماتور و انبساط ناشی از آن، علت ایجاد ترک در بتن می‌باشد. در طول اندازه‌گیری جریان اولیه نمونه‌ها مشاهده شد که شروع ترک ابتدا پس از ثابت بودن جریان در یک بازه زمانی، با تغییر ناگهانی جریان حداقل به میزان ۵ میلی آمپر اتفاق می‌افتد که این امر ناشی از وقوع ترک‌های ریز در بتن و برقراری ارتباط بیشتر محلول با آرماتور می‌باشد، و پس از چند روز با تسریع روند خوردگی و به تبع آن افزایش محصولات ناشی از خوردگی، ترک‌ها بزرگتر گردیده و به وضوح قابل مشاهده می‌شود. نتایج سن مشاهده ترک همه طرح‌ها در شکل ۱۱ ارائه گردیده است. این شکل نشان‌دهنده‌ی تأثیر مهم ترکیب پومیس و متاکائولین بر مقاومت در برابر خوردگی در مخلوط SCC است. می‌توان گفت که با افزایش درصد پوزولان جایگزین سیمان، سن مشاهده ترک در طرح‌های حاوی پومیس و متاکائولین افزایش یافته است. این افزایش نسبت مستقیم با درصد پوزولان جایگزین شده دارد. در مقایسه‌ی نمونه‌ی شاهد با طرح‌های دارای ترکیب پومیس و متاکائولین مشاهده می‌شود که این طرح‌ها از ۱۷۰/۶ درصد تا بیش از ۳۷۰ درصد مقاومت بیشتری در برابر خوردگی کسب کرده و به همان نسبت دیرتر ترک خورده است.

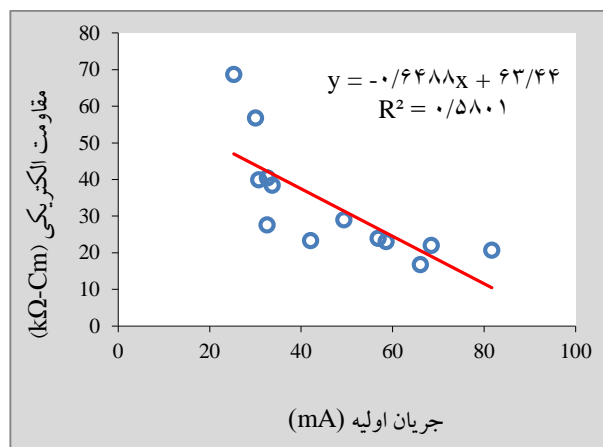


شکل ۱۱- سن مشاهده ترک نمونه‌ها

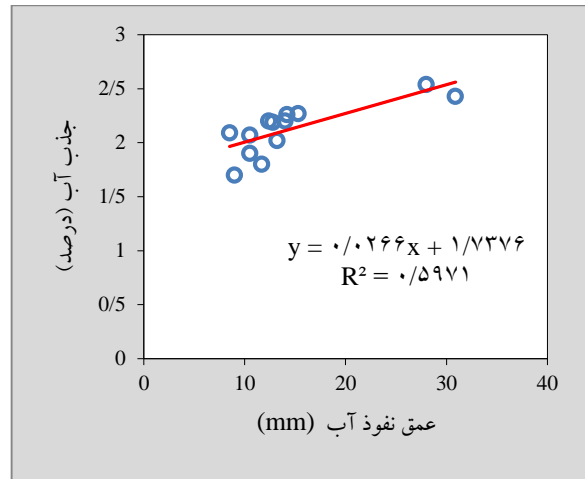
با کاهش و ریزش حفرات که در اثر تکمیل واکنش های پوزولانی اتفاق می افتد، مقاومت الکتریکی بتن افزایش می یابد که این امر در کاهش ضریب نفوذ (انتشار) یون کلر نیز همان تاثیر را دارد. درستی این مطلب در شکل ۱۶ مشخص است.



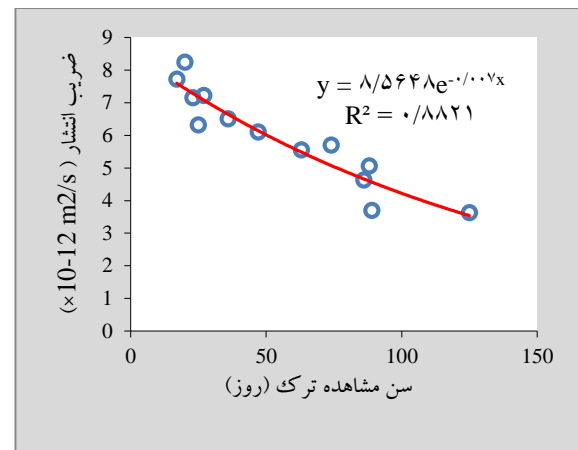
شکل ۱۶- ارتباط بین مقاومت ویژه الکتریکی و ضریب انتشار یون کلر در شکل ۱۷ ارتباط بین مقاومت الکتریکی و شدت جریان عبوری (اولیه) از بتن ارائه شده است. از رابطه معکوس بین مقاومت و جریان (قانون اهم) انتظار داریم در طرح هایی که مقاومت بیشتری کسب کرده است جریان کمتری را شاهد باشیم که در شکل به وضوح قابل مشاهده است. انتظار می رود در طرح هایی که جریان کمتری از آن ها عبور می کند، مهاجرت یون ها کمتر بوده و نرخ خوردگی کمتر باشد و سن مشاهده ی ترک در آنها نیز بیشتر باشد. در شکل ۱۸ در بررسی رابطه ی سن مشاهده ی ترک و جریان اولیه مشاهده می شود که نمونه هایی که مقاومت بیشتری در برابر عبور جریان داشته دیرتر ترک خورده است. این موضوع اثر مثبت ترکیب متاکائولین و پومیس را ثابت می کند.



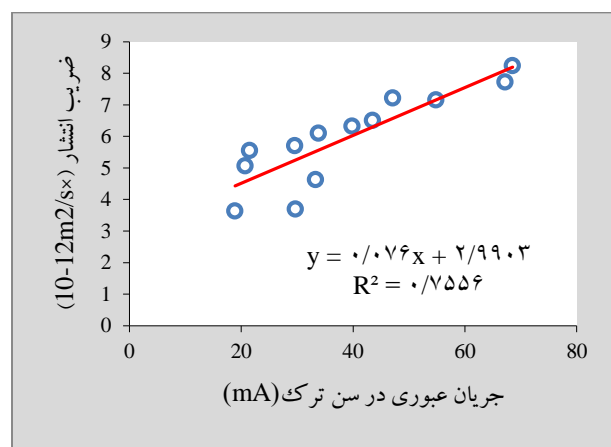
شکل ۱۷- ارتباط بین مقاومت الکتریکی و جریان اولیه



شکل ۱۳- ارتباط بین عمق نفوذ و جذب آب



شکل ۱۴- ارتباط بین ضریب انتشار یون کلر و سن مشاهده ترک شکل ۱۵ ارتباط بین جریان عبوری در سن ترک و ضریب مهاجرت یون کلر در سن ۹۰ روز را نشان می دهد. از نمودار مشخص است در نمونه های حاوی پوزولان، با افزایش جریان عبوری در سن ترک، ضریب انتشار یون کلر نیز افزایش یافته است.



شکل ۱۵- ارتباط بین جریان عبوری و ضریب انتشار یون کلر

Ions on Compression and Durability of Cement-Based Materials with Mineral Admixtures”, Materials, 6, pp. 1851-1872.

[3]. Toutanjia H., Delattec N., Aggounb S., Duvalb R. Danson A, (2004) "Effect of supplementary cementations materials on the compressive strength and durability of short-term cured concrete", Cement and Concrete Research 34 311 –319.

[4]. Ramezaniapour, A.A., Samadian, M., and Mahdikhani, M., (2012) “Engineering Properties and Durability of Self-Consolidating Concrete” (SCC) Containing Volcanic Pumice Ash, ASIAN JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING (BUILDING AND HOUSING) VOL. 13, NO. 4 pp. 521-530.

[5]. Khandaker M, A.H., Lachemi, M., (2004). “Corrosion resistance and chloride diffusivity of volcanic ash blended cement mortar”, Cement and Concrete Research, vol 34 695–702.

[6]. Khandaker M, A.H., (2005). “Chloride induced corrosion of reinforcement in volcanic ash and pumice based blended concrete”, Cement & Concrete Composites vol. 27, pp. 381–390

[7]. Khandaker M, A.H., (2008). “Pumice based blended cement concretes exposed to marine environment: Effects of mix composition and curing conditions”, Cement & Concrete Composites 30 pp. 97–105.

[8]. Demirel, B., Keles-temur, O., (2010).” Effect of elevated temperature on the mechanical properties of concrete produced with finely ground pumice and silica fume”, Fire Safety Journal 45 pp. 385–391,

[9]. Bondar, D., Lynsdale, C.J., Milestone, N.B., Hassani, N., Ramezaniapour, A.A., Effect of heat treatment on reactivity-strength of alkali-activated natural pozzolans, Construction and Building Materials 25 pp. 4065–4071, 2011.

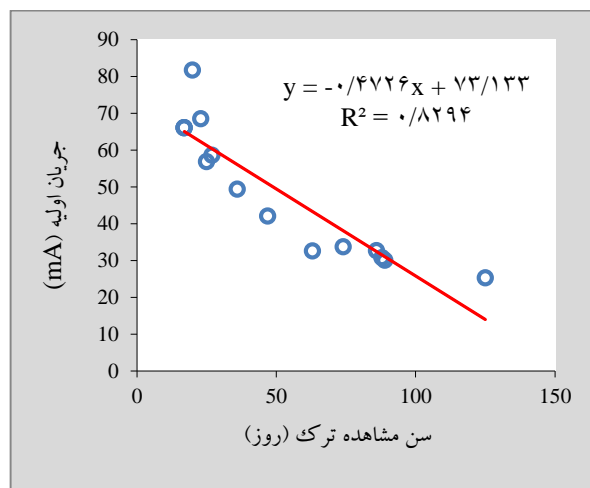
[10]. Hassan, A.A.A., Lachemi, M., Khandaker M, A.H., (2012) “Effect of metakaolin and silica fume on the durability of self-consolidating concrete”, Cement & Concrete Composites, vol. 34, 801–807.

[11]. Madandoust, R., Mousavi, S.Y., Fresh and hardened properties of self-compacting concrete containing metakaolin, Construction and Building Materials 35, pp. 752–760, 2012.

[12]. Ambroise, J., Rols., S and Pera, I., Self-Leveling Concrete Design and Properties, Concrete Science and Engineering, Vol 1, pp. 140-147, 1999.

[13]. EFNARC, Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete, European Federation. (2002).

[۱۴] نعمتی چاری م.، شکرچی زاده م.، تاثیر ابعاد و شکل نمونه‌ها روی مقدار جذب آب بتن در مدت زمان مشخص، چهارمین کنفرانس ملی سالیانه بتن تهران- مهرماه ۱۳۹۱.



شکل ۱۸- ارتباط بین جریان اولیه و سن مشاهده ترک

۴- نتیجه گیری

- بر خلاف طرح دارای متاکائولین تنها که از سنین اولیه باعث افزایش مقاومت نسبت به نمونه‌ی شاهد شده است، طرح‌های حاوی ترکیب (متاکائولین و پومیس)، در سنین اولیه شاهد افت مقاومت بوده است. کمترین افت مربوط به طرح با ۲۰ درصد پوزولان جایگزین بوده است.

- نتایج آزمایش عمق نفوذ آب با جای‌گزینی ۲۰ درصد پوزولان نسبت به نمونه‌ی شاهد، بهبود ۲۸/۱ درصد را نشان می‌دهد.

- ترکیب متاکائولین و پومیس باعث کاهش درصد جذب آب در بتن خودتراکم در سن ۲۸ روز گردیده است. این ترکیب دارای ۳۰ درصد جذب آب کمتر نسبت به نمونه‌ی شاهد است.

- جای‌گزینی متاکائولین و پومیس به جای بخشی از سیمان در بتن خودتراکم باعث بهبود چشمگیر مقاومت الکتریکی در سن ۹۰ روز به میزان ۱۶/۵ درصد افزایش می‌گردد.

- استفاده از ترکیب متاکائولین و پومیس در بتن خودتراکم، ضریب انتشار یون کلر را به میزان ۱۳/۹ درصد کاهش می‌دهد.

- نتایج آزمایش خوردگی تسریع شده نشان می‌دهد افزودن پوزولان، مقاومت بتن خودتراکم در برابر خوردگی را به میزان ۲۶/۴ درصد افزایش می‌دهد.

۵- مراجع

[۱]. یادگاران ا.، ماهوتیان م.، بررسی اقتصادی بتن خودتراکم، اولین کارگاه تخصصی بتن خودتراکم، دانشکده فنی دانشگاه تهران، ایران، اسفند، ۱۳۸۵.

[2]. An Cheng, Sao-Jeng Chao and Wei-Ting Lin, (2013) “Effects of Leaching Behavior of Calcium

[15]. McCarter, W. J., Starrs, G., Kandasami, S., Jones R., Chrisp M., Electrode configurations for resistivity measurements on concrete, ACI Materials Journal, Vol. 106, No. 3, pp. 258-264, 2009.

[16]. NT BUILD 492, Chloride Migration Coefficient from Non-Steady-State Migration Experiments, Published by NORDTEST, 1999.

[17]. Binici, H., Aksogan, O., Durgun, M. Y., Corrosion of basaltic pumice, colemanite, barite and blast furnace slag coated rebars in concretes, Construction and Building Materials 37 pp. 629–637, 2012.

[18]. CIRIA, The CIRIA Guide to Concrete Construction in the Gulf Region, Spec Pub.31, Construction Industry Research and Information Association, Ministry of Housing and Construction, Department of the Environment, London, 1984.

Experimental Investigate Composite Effect of Metakaolin and Pumice on Durability and Corrosion Rebar in Self-Compacting Concrete

Mahmud Miri *

Associate Professor, Department of Civil Engineering, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran
Tahmasb Khazaeni

MSc. candidate, Department of Civil Engineering, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran
Mehrollah Rakhshani Mehr

Assistant Professor, Faculty of Engineering, Alzahra University
Abdol.Ghaium Dehvare

Ph.D. Candidate, Department of Civil Engineering, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran

Abstract

This paper discussed the effect of adding a pumice pozzolans and metakaolin composition on durability properties of self-compacting concrete (SCC) to present a corrosion-resistant mixed to be used for decks and piers of bridges in sea areas, and marine structures. Replacement of 10% pumice and 10% metakaolin and their 10% and 15% compositions as the replacement of some part of cement were used for making mix plans of the research. Compressive strength, water permeability, specific electrical resistivity, rapid chloride migration tests (RCMT), and accelerated corrosion tests were carried out. The tests were performed at the ages of 7, 14, 28, 56, 90, and 180 days. The results showed that a pumice and metakaolin composition maintained SCC's mechanical properties, improved concrete durability, and increased age cracking in the accelerated tests considerably as compared with a control sample. The samples reduced RCMT up to 28.1% and increased age cracking by 26.4%.

Keywords: SCC, Pumice, Metakaolin, Rebar Corrosion.

* Corresponding Author: mmiri@eng.usb.ac.ir