

ارزیابی آزمایشگاهی استفاده از ترکیب پومیس و زئولیت بر خوردگی میلگرد و دوام بتن خودتراکم

محمود میری^{۱*}، ناصر سارانی^۲

^۱ دانشیار گروه عمران، دانشگاه سیستان و بلوچستان

^۲ کارشناس ارشد سازه، گروه عمران، دانشگاه سیستان و بلوچستان

* نویسنده مسئول: mmiri@eng.usb.ac.ir

تاریخ دریافت: ۹۳/۰۳/۲۸ تاریخ پذیرش: ۹۳/۰۹/۲۴

چکیده:

در این مقاله، خوردگی میلگرد و دوام بتن‌های خودتراکم حاوی پوزولان‌های پومیس و زئولیت مورد ارزیابی قرار گرفته است. نمونه‌های بتن حاوی درصد‌های مختلف پوزولان پومیس و یا زئولیت ساخته شده و تحت آزمایش قرار گرفته‌اند. به منظور بررسی اثر استفاده همزمان این دو پوزولان، نمونه‌هایی نیز با درصد‌های مختلفی از ترکیب این دو ساخته شده است. آزمایش‌های مقاومت فشاری، نفوذ آب، جذب آب، مقاومت ویژه الکتریکی، ضریب مهاجرت یون کلر (RCMT) و خوردگی تسریع شده بر روی این نمونه‌ها انجام و نتایج حاصله با بتن شاهد (بدون پوزولان) مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد ترکیب پومیس و زئولیت، ضمن حفظ خواص مقاومتی، باعث کاهش ۲۳ درصد جذب آب، ۵۵ درصد نفوذ آب و ۴۰ درصد ضریب مهاجرت یون کلر و در کل تعویق زمان شروع خوردگی میلگرد و میزان آن می‌شود. همچنین استفاده همزمان از این دو پوزولان، مقاومت ویژه الکتریکی نمونه‌ها را ۱۶۱ درصد و طول مدت وقوع ترک طی آزمایش خوردگی تسریع شده را نیز، ۸۲ درصد افزایش داده است. لذا بر اساس نتایج بدست آمده از آزمایشات و به منظور مقابله با خوردگی میلگرد، استفاده همزمان از پوزولانهای پومیس و زئولیت (به عنوان جایگزین بخشی از سیمان مصرفی) در شرایط محیطی بسیار شدید (مطابق آیین‌نامه پیشنهادی پایایی بتن در حاشیه خلیج فارس) قابل توصیه است.

کلمات کلیدی: بتن خودتراکم، ضریب مهاجرت یون کلر (RCMT)، خوردگی میلگرد.

Laboratory Assessment of the Effect of Using Pumice-Zeolite Combination on Corrosion of Rebar and Durability of Self-Compacting Concrete

M. Miri^{1*}, N. Sarani²

¹ Associate Professor, Civil Eng. Dept., University of Sistan and Baluchestan.

² M.Sc of Civil Eng., Civil Eng. Dept., University of Sistan and Baluchestan.

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

Submission: 2014,06,18 Acceptance: 2014,12,15

Abstract:

In this paper corrosion of reinforcing bar (rebar) and durability of self-compacting concretes containing pumice and zeolite pozzolans were investigated. The mixed concrete samples contained various percentage of pumice, zeolite, and their combination. The specimens were subjected to different tests and the obtained results were compared with the control one which contained no pozzolan. Compressive strength test, water penetration, water absorption, electrical resistivity, rapid chloride migration test (RCMT), and accelerated corrosion test were carried out on specimens. The results showed that pumice-zeolite combination, while maintaining the strength-related characteristics, led to a 23% reduction in water absorption, 55% reduction in water penetration, and 40% reduction in chloride ion migration. Also, the electrical resistivity and the cracking age of the specimens during the accelerated corrosion tests were increased by 161% and 82% respectively. According to the results using of combination of these pozzolans are advisable.

Keywords: Self-compacting concrete, rapid chloride migration test (RCMT), rebar corrosion

۱- مقدمه

نفوذ یون کلر مهمترین دلیل خوردگی آرماتورها در اکثر سازه‌های بتن مسلح است [۱]. از آنجا که خوردگی میلگرد در بتن یک فرآیند الکتروشیمیایی است و نیاز به آند، کاتد و یک الکترولیت دارد، یون‌های موجود در آب شور با ورود به بتن باعث فراهم شدن شرایط خوردگی میلگردها می‌شوند. در عمل، کیفیت خوب و ضخامت مناسب پوشش بتن روی آرماتورها بصورت فیزیکی و شیمیایی مانع خوردگی آرماتورهای موجود در بتن می‌شود [۲]. بطوریکه با ایجاد مانع فیزیکی از آرماتورها در برابر شرایط مخرب محافظت کرده و توسط خاصیت قلیایی بالای خود، حفاظت شیمیایی میلگردها را در برابر خوردگی، تأمین می‌نماید [۳].

با توجه به اینکه تشکیل آهک آزاد (CH) طی فرآیند هیدراتاسیون سیمان، باعث ایجاد نقاط ضعف و کاهش کیفیت و دوام بتن می‌شود، استفاده مناسب از برخی پوزولان‌ها می‌تواند باعث بهبود برخی خواص بتن و افزایش مقاومت در برابر خوردگی میلگرد شود. پوزولان‌ها در واقع بعنوان یکی از فاکتورهای مهم کنترل‌کننده انتشار یون‌های کلرید به سطح میلگرد به‌شمار می‌روند [۴]. واکنش‌های پوزولانی با آلومین و سیلیس فعال باعث مصرف هیدروکسید کلسیم شده و تشکیل سیلیکات کلسیم هیدراته (CSH) می‌دهد که این مواد سیمانی ثانویه تولید شده، باعث افزایش مقاومت و دوام بتن می‌شوند [۵-۷]. نحوه عملکرد پوزولان‌ها در بتن، به اثرات فیزیکی و شیمیایی آنها وابسته است [۸]. به عبارت دیگر عملکرد فیزیکی آنها به اندازه، شکل و بافت ذرات پوزولان وابسته بوده و عملکرد شیمیایی آنها نیز به توانایی پوزولان در فراهم کردن سیلیس و آلومین فعال برای واکنش با هیدروکسید کلسیم (CH) و آب بستگی دارد [۹].

با توجه به اینکه در سال‌های اخیر بتن خودتراکم (SCC) به دلیل مزایای زیاد آن نسبت به بتن معمولی، از جمله افزایش سرعت اجرا، کاهش نیروی انسانی، اطمینان از تراکم کافی بتن در مناطق با تراکم بالای آرماتور، کاهش آلودگی صوتی، بالارفتن کیفیت محصول نهایی و صرفه‌جویی اقتصادی، توجه زیادی را در صنعت بتن به خود معطوف نموده است [۱۰]. اما این نوع از بتن با وجود داشتن مزایای فوق، برای رسیدن به خواص خودتراکمی (جلوگیری از جداشدگی سنگدانه‌ها و افزایش ویسکوزیته)، در مقایسه با بتن معمولی نیازمند سیمان بیشتری بوده و لذا جایگزینی پوزولان در این بتن از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است [۱۱ و ۱۲].

در تحقیقات انجام شده مشخص شده است که اگر چه استفاده از پوزولان طبیعی خاکستر آتشفشانی و پومیس، باعث کاهش ضریب انتشار یون کلر و افزایش مقاومت در برابر خوردگی می‌شود ولی

درصد‌های زیاد آن باعث کاهش مقاومت فشاری می‌شود [۱۳ و ۱۴]. خان داکر (khandaker) در سال ۲۰۰۸ خوردگی بتن‌های حاوی پوزولان‌های پومیس و خاکستر آتشفشانی را مورد مطالعه قرار داد، و نتیجه گرفت که استفاده از ۱۰ تا ۲۰ درصد پومیس به عنوان جایگزین سیمان تیپ I و II، دوام بتن در برابر شرایط مهاجم آب دریا را افزایش می‌دهد [۱۵]. دمیرل (demirel) و همکاران نیز در سال ۲۰۱۰ نشان دادند که می‌توان با استفاده از مواد معدنی مانند پومیس، با کاهش مقدار هیدروکسید کلسیم در بتن، دوام بتن را بهبود بخشید [۱۶]. باندر (bondar) و همکاران در سال ۲۰۱۱ بیان داشته‌اند که پومیس تفتان تنها پوزولانی است که بدون بهبود حرارتی، فعالیت پوزولانی بیشتری نسبت به سایر پوزولان‌های کشور دارد [۱۷]. نتایج ارائه شده توسط دیگر محققین نیز نشان می‌دهد که فعالیت پوزولانی مناسب پومیس، به‌طور قابل توجهی مقاومت در برابر نفوذ کلر و خوردگی میلگرد در بتن را افزایش می‌دهد [۱۸ و ۱۹].

ولی‌پور و همکاران در سال ۱۳۸۹ به این نتیجه رسیدند که با افزایش ژئولیت، میزان جذب آب کاهش و مقاومت الکتریکی افزایش یافته است به‌طوری که افزودن ۳۰٪ ژئولیت، مقاومت الکتریکی را نسبت به نمونه شاهد ۴۰٪ در صد افزایش داده است [۲۰]. در بررسی بتن‌های حاوی ژئولیت و دوده سیلیس در معرض اسید سولفوریک توسط مرادیان و همکاران در سال ۱۳۸۹ مشخص شد که افزودن ژئولیت به بتن در شرایط اسیدی، عملکرد بهتری نسبت به نمونه شاهد داشته و باعث کاهش نفوذ اسید سولفوریک به درون نمونه‌ها شده است [۲۱]. همچنین جایگزینی ژئولیت میزان شار عبوری یون کلراید را به‌طور چشمگیری کاهش می‌دهد و در جلوگیری از خوردگی کلرایدی موثر واقع می‌شود [۲۲].

شکرچی‌زاده و همکاران در سال ۱۳۹۰ نشان دادند که بتن‌های حاوی ترکیب ۵٪ ژئولیت و ۵٪ دوده سیلیسی و ترکیب ۱۰٪ ژئولیت و ۱۰٪ خاکستر بادی باعث بهبود پارامترهای مقاومت فشاری، جذب آب، عمق نفوذ آب، مقاومت الکتریکی و نفوذ یون کلر می‌شوند [۲۳]. نتایج سایر بررسی‌ها نشان داده است که با افزایش مقدار جایگزینی ژئولیت، مقاومت الکتریکی افزایش و نفوذ یون کلر در نمونه‌های بتنی حاوی ژئولیت نسبت به نمونه شاهد کاهش می‌یابد [۲۴ و ۲۵]. همچنین در برخی تحقیقات انجام شده مشخص شده است که افزودن ژئولیت به بتن، منجر به کاهش مقاومت فشاری شده است اما این کاهش مقاومت، به نسبت درصد کاهش سیمان، قابل توجه نیست [۲۶ و ۲۷]. با توجه به مطالعات فوق و مشاهده مزایای هر کدام از پوزولان‌های پومیس و ژئولیت، در این تحقیق به منظور استفاده بهینه از ترکیبات و اکسیدهای موجود در این دو پوزولان، تأثیر ترکیب این دو بر خوردگی آرماتور و دوام بتن خودتراکم بررسی شده است.

۲- مواد و روش آزمون:

EFNARC انجام شده است [۲۹]. نمونه‌ها با استفاده از روش پیشنهادی تمیمی (Tamimi)، ساخته شده‌اند. به این منظور ابتدا سنگدانه‌ها داخل مخلوط کن ریخته شده و سپس بخشی از فوق روان کننده (که قبلاً در آب حل شده است) به آن اضافه شده و به مدت ۳۰ ثانیه اختلاط انجام شده است. بعد از آن سیمان، پودر سنگ، پومیس و زئولیت (بسته به نوع طرح)، اضافه و به مدت ۶۰ ثانیه، مخلوط شده و سپس، باقیمانده محلول آب و فوق‌روان کننده به مخلوط اضافه و به مدت ۹۰ ثانیه دیگر عمل اختلاط انجام شده است [۳۰].

۲-۱- مصالح مصرفی

مشخصات مصالح مصرفی مورد استفاده در جدول شماره ۲ ارائه شده است. به منظور دانه‌بندی یکسان، دستیابی به بیشترین تراکم و حذف ترکیبات زیان‌آور، مصالح ابتدا به خوبی شسته شده و پس از خشک شدن در اون، الک شده و از مصالح مانده روی هر الک در حد وسط استاندارد ASTM C33 انتخاب شده است.

در این تحقیق برای ارزیابی و مقایسه خواص بتن خود تراکم ساخته شده با پوزولان‌های پومیس و زئولیت و ترکیب آنها، ۸ طرح اختلاط مختلف مطابق جدول ۱ ساخته شد. نحوه نامگذاری مخلوط‌های بتن در این جدول بدین صورت است که حروف، نمایانگر نوع پوزولان (P برای پومیس و Z برای زئولیت) و عدد بعد از هر حرف نشان دهنده درصد پوزولان جایگزین سیمان است. همانطور که در این جدول نشان داده شده، یک نمونه با ۱۰٪ پومیس، دو نمونه با نسبت‌های جایگزینی ۱۰ و ۱۵ درصد زئولیت و ۴ نمونه هم با استفاده همزمان از هر دو پوزولان ساخته شده است. علاوه بر آن به منظور مقایسه نتایج یک نمونه نیز به عنوان نمونه شاهد و بدون پوزولان ساخته شده است.

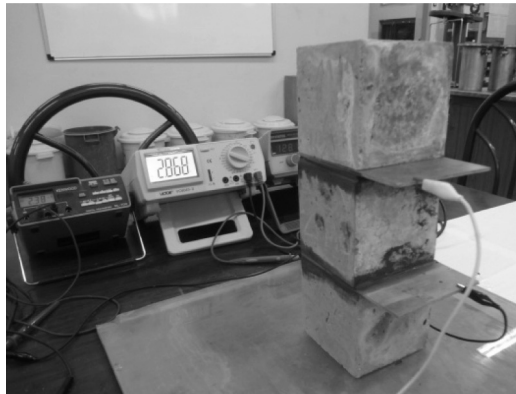
نسبت آب به پودر در کلیه مخلوط‌ها برابر ۰/۴ در نظر گرفته شده است. مشابه نسبت‌های پیشنهادی امبرویز (Ambrose) و همکاران [۲۸] نسبت شن به کل سنگدانه‌ها ۴۴٪ و نسبت ماسه به کل سنگدانه‌ها ۵۶٪ انتخاب و طرح اختلاط بتن نیز مطابق روش

جدول ۱- طرح‌های اختلاط مورد آزمایش و وزن اجزای هر کدام (kg/m³)

نام طرح	شن (اشباع با سطح خشک)	ماسه (اشباع با سطح خشک)	سیمان	پودر سنگ	آب به پودر	آب اختلاط	درصد فوق‌روان کننده	اصلاح کننده لزوجت	پومیس	زئولیت
Control	۶۶۰	۸۵۴	۴۵۰	۱۱۰	۰/۴	۲۲۴	۱/۵	۱/۷۱۴	۰	۰
Z10	۶۴۹	۸۴۶	۴۰۵	۱۱۰	۰/۴	۲۲۴	۱/۹	۱/۷۱۴	۰	۴۵
P10	۶۵۵	۸۵۱	۴۰۵	۱۱۰	۰/۴	۲۲۴	۱/۸	۱/۷۱۴	۴۵	۰
Z5P5	۶۵۴	۸۵۰	۴۰۵	۱۱۰	۰/۴	۲۲۴	۱/۹	۱/۷۱۴	۲۲/۵	۲۲/۵
Z10P10	۶۴۵	۸۴۳	۳۶۰	۱۱۰	۰/۴	۲۲۴	۲/۵	۱/۷۱۴	۴۵	۴۵
Z15	۶۴۴	۸۴۲	۳۸۲/۵	۱۱۰	۰/۴	۲۲۴	۲/۴	۱/۷۱۴	۰	۶۷/۵
Z5P10	۶۵۱	۸۴۵	۳۸۲/۵	۱۱۰	۰/۴	۲۲۴	۲/۳	۱/۷۱۴	۲۲/۵	۴۵
Z10P5	۶۴۷	۸۴۵	۳۸۲/۵	۱۱۰	۰/۴	۲۲۴	۲/۳	۱/۷۱۴	۴۵	۲۲/۵

جدول ۲- مشخصات مصالح مصرفی در نمونه‌های بتنی

نوع سنگدانه	خصوصیات فیزیکی	مقادیر	نوع سنگدانه	خصوصیات فیزیکی	مقادیر
درشت‌دانه	وزن مخصوص اشباع با سطح خشک (kg/m ³)	۲۷۳۱	ریزدانه	وزن مخصوص اشباع با سطح خشک (kg/m ³)	۲۶۰۴
	جذب آب (درصد)	۰/۸۴		جذب آب (درصد)	۱/۵۸
	اندازه بزرگترین دانه (mm)	۱۲/۵		اندازه بزرگترین دانه (mm)	۳/۱۷۵
	وزن واحد حجم (kg/m ³)	۱۶۳۵		مدول نرمی	۲/۷۰
سیمان	وزن مخصوص (kg/m ³)	۳۱۰۷	زئولیت	وزن مخصوص (kg/m ³)	۲۰۶۴
پومیس تفتان	وزن مخصوص (kg/m ³)	۲۵۴۳	پودر سنگ	وزن مخصوص (kg/m ³)	۲۶۲۰
فوق روان کننده (P10-3R)	وزن مخصوص (kg/m ³)	۱۱۰۰	اصلاح کننده لزوجت (VMA)	ساخت کارخانه شیمی ساختمان	



شکل ۱- نحوه انجام آزمایش مقاومت ویژه الکتریکی

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

که در آن:

p = 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]

۲-۶- آزمایش نفوذ تسریع شده (مهاجرت) یون کلر (RCMT)

در این آزمایش ضریب مهاجرت یون کلر براساس استاندارد NT BUILD 492 [۳۴] اندازه گیری شده است. نمونه‌ها پس از آماده سازی طبق استاندارد فوق در دستگاه نفوذ تسریع شده قرار گرفته و سپس مطابق شکل ۲ عمق متوسط نفوذ اندازه گیری و ضریب مهاجرت یون کلر براساس فرمول زیر محاسبه شده است [۳۴].



شکل ۲- آزمون‌ها پس از آزمایش RCMT

سیمان مورد استفاده نیز از نوع پر تلمد تیپ II انتخاب شده است. مشخصات سیمان و سایر مصالح مصرفی در جدول شماره ۳ ذکر شده است.

۲-۲- آزمایش مقاومت فشاری

آزمایش مقاومت فشاری براساس استاندارد BS EN 12390-3 با آزمون‌های مکعبی ۱۰ سانتی متری و در طول مدت ۷، ۲۸، ۵۶، ۹۰ و ۱۸۰ روز انجام شده است.

۲-۳- آزمایش عمق نفوذ آب

جهت انجام آزمایش نفوذ آب بر اساس استاندارد DIN 1048، آزمون‌های استوانه‌ای ۱۵×۱۵ سانتی متری بتن در طول مدت ۲۸ روزه تحت فشار ثابت ۵ اتمسفر مورد آزمایش قرار گرفته است.

۲-۴- آزمایش جذب آب حجمی

درصد جذب آب حجمی براساس استاندارد BS 1881 part 122، با آزمون‌های بتن مغزه گیری شده از سازه یا اجزای پیش ساخته به شکل استوانه به قطر ۷۵ و ارتفاع ۱۵۰-۳۲ میلی متر تعیین می شود در این پژوهش اندازه گیری جذب آب حجمی با الگوبرداری از استاندارد فوق، بر روی آزمون‌های مکعبی ۱۰×۱۰×۱۰ سانتی متری در طول مدت ۲۸ روز انجام گردیده است، بدین ترتیب که ابتدا آزمون‌های غوطه‌ور شده از آب خارج، و در اون به مدت ۲±۷۲ ساعت در دمای ۱۱۰ درجه سانتیگراد قرار گرفته و پس از خشک سازی و توزین، به مدت ۳۰ دقیقه در داخل آب قرار داده شده اند، سپس سطح نمونه‌ها با پارچه خشک، و دوباره وزن آن‌ها ثبت گردیده است. در انتها برای تبدیل نتایج آزمون‌های مکعبی به استوانه‌ای استاندارد، از روش پیشنهادی نعمتی جاری و همکاران [۳۱] استفاده شده است.

۲-۵- مقاومت ویژه الکتریکی

برای سنجش مقاومت ویژه الکتریکی نمونه‌های بتنی، با الگوبرداری از تحقیقات انجام شده جوشی (Joshi & Bhole) و بهول [۳۲]، مطابق شکل ۱، نمونه‌ها بین دو صفحه مستقیم قرار گرفته و سپس جریانی با فرکانس ۱۲۸ کیلوهرتز و ولتاژ ۳ ولت (جریان AC) اعمال و مقاومت الکتریکی بتن محصور بین صفحات اندازه گیری شده است. حداقل صفحات مسی و سطح نمونه با لایه نازکی از خمیر سیمان با نسبت آب به سیمان ۰/۵ پر شده است.

برای این منظور از آزمون‌های مکعبی ۱۰۰ میلیمتری استفاده شده و آزمایش در طول مدت ۷، ۱۴، ۲۸، ۵۶ و ۹۰ روز انجام شده است. مقاومت ویژه الکتریکی، طبق رابطه ۱ محاسبه شده است [۳۳]:

جدول ۳- نتایج حاصل از آنالیز XRF بر روی پومیس، ژئولیت و سیمان تیپ II سیستم

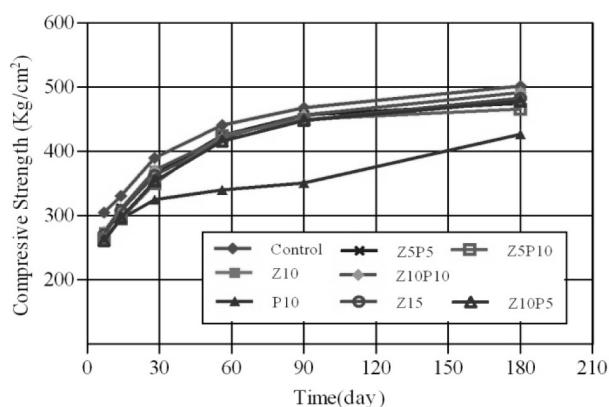
AL ₂ O ₃	AL ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	L.O.I	نوع مصالح
۶۱	۱۸/۵	۵	۲/۶	۶/۶	۱/۸	۱/۶	۰/۳۸	۲	پومیس تفتان
۶۷/۴۴	۱۰/۹	۰/۸۴	۰/۳۳	۱/۲۴	۳/۷۱	۴/۳۹	۰/۴۷	۱۱/۰۵	ژئولیت
۲۱/۳۸	۵/۳۷	۳/۸۴	۱/۶۹	۶۲/۷۱	۰/۶	۰/۴۳	۲/۴۸	۱/۴۱	سیمان تیپ ۲

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

۳- نتایج و بحث

۳-۱- نتایج آزمایش مقاومت فشاری

نتایج آزمایش مقاومت فشاری در طول مدت ۷، ۱۴، ۲۸، ۵۶، ۹۰ و ۱۸۰ روز در شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل ۵- مقاومت فشاری نمونه‌ها در طول مدت‌های مختلف

بررسی نتایج ارائه شده در این شکل نشان می‌دهد که علی‌رغم کاهش درصد سیمان در طرح‌های حاوی ترکیب پومیس و زئولیت کاهش قابل ملاحظه‌ای در مقاومت این نمونه‌ها در طول مدت ۹۰ و ۱۸۰ روز نسبت به نمونه شاهد مشاهده نشده است و در طرح حاوی ۱۰ درصد پومیس و ۱۰ درصد زئولیت (در مجموع ۲۰ درصد پوزولان جایگزین سیمان) در طول مدت ۱۸۰ روز تنها ۶/۶ درصد کاهش مقاومت نسبت به نمونه شاهد ملاحظه می‌شود. آهنگ رشد مقاومت فشاری طرح‌های حاوی پوزولان تا طول مدت ۷ روز کندتر از نمونه شاهد، و از طول مدت ۷ تا ۵۶ روز به علت تکمیل شدن واکنش‌های پوزولانی این آهنگ رشد، تندتر از نمونه شاهد شده است. در مجموع استفاده از زئولیت به تنهایی یا ترکیب آن با پومیس در تمامی طرح اختلاط‌های مورد آزمایش و تا طول مدت ۱۸۰ روز، باعث کاهش مقاومت فشاری شده است. بیشترین مقاومت فشاری در همه طول مدت، مربوط به نمونه‌های شاهد است که با توجه به کمتر بودن سیمان مورد استفاده در این نمونه‌ها نتیجه قابل انتظاری است. اما در طول مدت بیشتر، اختلاف مقاومت نمونه شاهد و نمونه‌های ساخته شده با پوزولان (به علت تکمیل شدن واکنش‌های پوزولانی) کمتر شده است. همانطور که در شکل مشخص است مقاومت فشاری نمونه P10 در تمامی سنین، نسبت به سایر نمونه‌ها کمتر است. به نظر می‌رسد که مکانیزم اثر این نوع پوزولان در کاهش مقدار، اندازه و همچنین برهم زدن نظم قرارگیری کریستال‌های هیدروکسید کلسیم

که در آن مقادیر به شکل زیر هستند:

D_{nssm} : ضریب مهاجرت غیر پایدار یون کلر ($\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$)

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

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

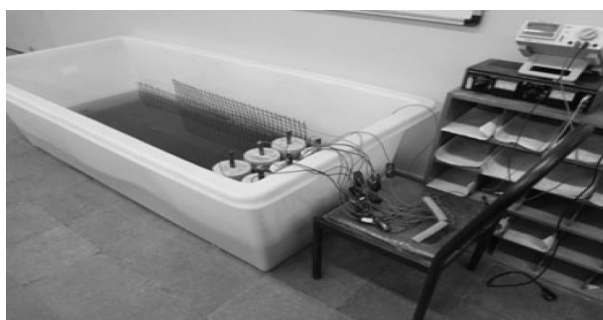
L: ضخامت نمونه، (میلی متر)

X_d : مقدار متوسط عمق نفوذ، (میلی متر)

t: مدت زمان آزمایش، (ساعت)

۳-۲- آزمایش خوردگی تسریع شده

آزمایش فوق مشابه روش پیشنهادی توسط حسن (Hassan) و همکاران [۳۵] و به گونه‌ای که در شکل ۳ نشان داده شده، صورت گرفته است. نمونه‌های استفاده شده در این آزمایش مطابق شکل ۴، استوانه‌ای به قطر ۱۵۰ میلی‌متر و ارتفاع ۳۰۰ میلی‌متر می‌باشند که در محور مرکزی آن‌ها، میلگرد آجدار از فولاد ST 37، به قطر اسمی ۱۸ میلی‌متر و طول ۳۵۰ میلی‌متر قرار داده شد. این میلگردها طوری تعبیه شده که انتهای آن‌ها از یک طرف در حدود ۱۰۰ میلی‌متر بیرون از بتن قرار داشته و انتهای دیگر آن‌ها نیز در حدود ۵۰ میلی‌متر از کف قالب فاصله دارد. به منظور جلوگیری از تماس آب با قسمت بیرون زده، میلگرد مذکور با اپوکسی روکش شده است.



شکل ۳- نحوه انجام آزمایش خوردگی تسریع شده



شکل ۴- نحوه آماده سازی آزمونه‌ها

شاهد در رده A (شرایط محیطی متوسط) قرار گرفته است. اما طرح‌های حاوی پوزولان قابلیت استفاده در شرایط محیطی شدید (B و C) را دارا می‌باشد که نشانگر بهبود خواص بتن و افزایش دوام آن می‌باشد و از این حیث تمامی نمونه‌های حاوی پوزولان قابلیت استفاده در مناطق با شرایط محیطی شدید را دارد.

۳-۳- نتایج آزمایش جذب آب

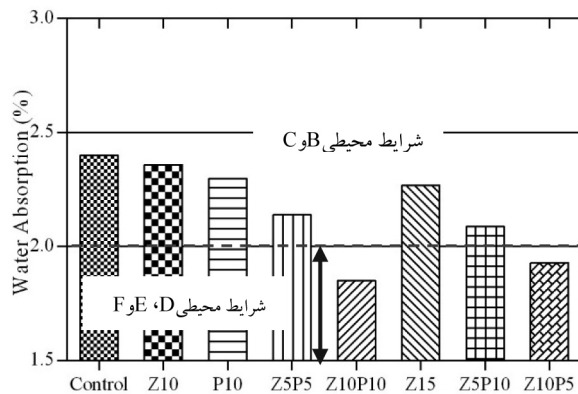
در شکل ۷ نتایج آزمایش جذب آب نیم‌ساعته (پس از تبدیل به جذب آب نیم‌ساعته استوانه‌ای با قطر و ارتفاع ۷۵ میلی‌متر [۳۱]) نشان داده شده است. همانطور که در این شکل نشان داده شده نمونه‌ی شاهد در مقایسه با طرح‌های دارای پوزولان پومیس و زئولیت، بیشترین جذب آب را دارد. طرح‌های حاوی ترکیب پوزولان پومیس و زئولیت در مقایسه با طرح‌های دارای زئولیت و پومیس تنها، جذب آب کمتری داشته و کمترین آن مربوط به ترکیب ۱۰ درصد زئولیت با ۱۰ درصد پومیس بوده که جذب آب نمونه‌ها را ۲۳ درصد کاهش داده است. می‌توان گفت که ترکیب زئولیت و پومیس با همپوشانی مکانیزم‌های اثر هر یک از این دو پوزولان به تنهایی، موجب متراکم‌تر شدن ساختار خمیر سیمان شده و با کاهش تخلخل باعث کم شدن جذب آب بتن خودتراکم شده است. 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

موجود، جهت رسیدن به انسجام بیشتر در ساختار ژل C-S-H، ضعیف‌تر از پوزولان زئولیت می‌باشد. مطالعات قبلی انجام شده در مورد پوزولان‌های پومیس و زئولیت نیز موید عملکرد بهتر نمونه‌های حاوی زئولیت است [۱۳، ۱۴، ۲۶ و ۲۷].

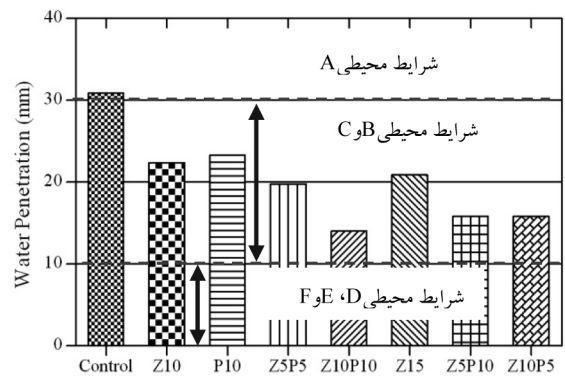
۳-۲- نتایج آزمایش عمق نفوذ آب

شکل ۶ نتایج آزمایش عمق نفوذ آب در طول مدت ۲۸ روز را نشان می‌دهد. از مشاهده نتایج آزمایش عمق نفوذ آب مشخص می‌شود که جایگزینی پوزولان در تمامی طرح‌ها موجب کاهش عمق نفوذ آب نسبت به نمونه شاهد است. این بهبود حداقل ۳۶ و حداکثر تا ۵۵ درصد بوده است. کمترین مقدار عمق نفوذ مربوط به طرح Z10P10 با ۵۵ درصد کاهش نفوذ نسبت به نمونه شاهد می‌باشد. تشکیل ژل‌های ثانویه در اثر واکنش Ca(OH)_2 با SiO_2 موجود در پومیس و زئولیت و در نتیجه بهتر شدن ریز ساختار بتن و انفصال ارتباط شبکه منافذ مویینه می‌تواند دلیل این امر باشد. به‌طور کلی از نتایج این آزمایش می‌توان نتیجه گرفت کاهش عمق نفوذ ارتباط مستقیم با افزایش درصد پوزولان دارد. همچنین طرح‌های دارای ترکیب پوزولان‌های پومیس و زئولیت، عملکرد مناسب‌تری نسبت به طرح‌های تک پوزولان از خود نشان داده است.

در مقایسه با الزامات آیین‌نامه ملی پایایی بتن در محیط خلیج فارس و دریای عمان [۳۶] در خصوص عمق نفوذ آب (جدول ۴)، نمونه



شکل ۷- جذب آب طرح‌ها در طول مدت ۲۸ روز



شکل ۶- عمق نفوذ آب طرح‌ها در طول مدت ۲۸ روز

جدول ۴- مقادیر مجاز عمق نفوذ آب در شرایط مختلف محیطی در آیین‌نامه پایایی [۳۶]

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

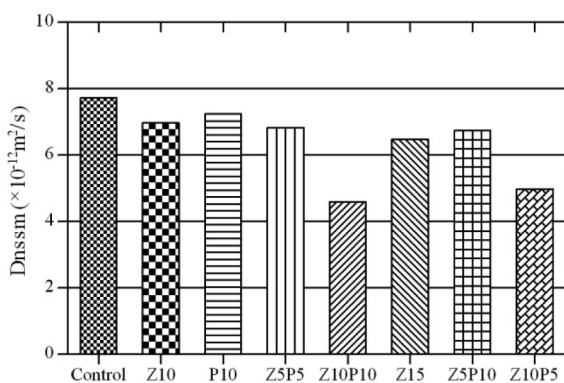
جدول ۵- مقادیر مجاز درصد جذب آب کوتاه مدت در شرایط مختلف محیطی در آیین‌نامه پایایی [۳۶]

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

افزایش پیدا می‌کند. این نتیجه هم در واقع تأیید کننده نتایج سایر آزمایشات از جمله مقاومت فشاری، جذب آب و نفوذ آب بوده و باز هم عملکرد بهتر نمونه‌های ساخته شده با استفاده از ترکیب دو پوزولان با همدیگر می‌باشد.

۳-۵- نتایج آزمایش نفوذ تسریع شده (مهاجرت) یون کلر

نتایج مهاجرت یون کلر در سن ۹۰ روز در شکل ۹ نشان می‌دهد که استفاده از پومیس و زئولیت در بتن موجب کاهش نفوذپذیری در برابر یون کلر نسبت به نمونه شاهد شده است. این کاهش در نمونه‌هایی که از ترکیب این دو پوزولان استفاده شده، چشمگیر است.



شکل ۹- ضریب مهاجرت یون کلر طرح‌ها در طول مدت ۹۰ روز

میزان تأثیرگذاری پوزولان‌های فوق با افزایش درصد جایگزینی آن افزایش می‌یابد، به طوری که در طرح Z10P10 (با ۲۰٪ پوزولان جایگزین سیمان) کمترین ضریب مهاجرت مشاهده می‌شود. که باعث بهبود ۴۰/۴ درصد در کاهش ضریب مهاجرت نسبت به نمونه‌ی شاهد شده است. دلیل این امر را می‌توان چنین بیان نمود که ترکیب پوزولان‌ها در درصد‌های زیاد، علاوه بر واکنش‌های آن با آهک آزاد شده طی هیدراتاسیون سیمان، با خاصیت پرکنندگی بیشتر خود موجب مسدودسازی حفرات و کاهش خلل و فرج در بتن گردیده است. با توجه به اینکه پس از سخت شدن بتن، حفره‌هایی برجامی‌ماند، محصولات واکنش‌های پوزولانی پومیس و زئولیت باعث پر شدن این حفره‌ها، کاهش ابعاد و یا انفصال حفرات می‌گردد در نتیجه با کاهش نفوذپذیری دوام بتن افزایش یافته و عملکرد آن در برابر محیط‌های خورنده کلرایدی بهبود می‌یابد.

۳-۶- نتایج آزمایش خوردگی تسریع شده

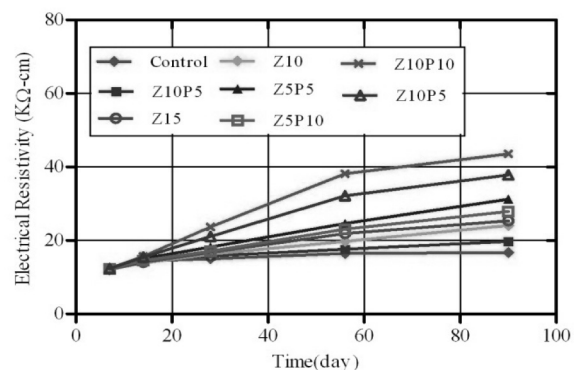
شکل ۱۰ روند تغییرات روزانه جریان عبوری نمونه‌های استوانه‌ای دارای میلگرد در طول مدت ۹۰ روز و تحت اختلاف پتانسیل ثابت ۱۲ ولت که در محلول NaCl پنج درصد قرار گرفته را نشان می‌دهد. از همان شروع آزمایش مشخص شد که جریان عبوری اولیه در نمونه‌های حاوی پوزولان‌های پومیس و زئولیت کمتر از نمونه شاهد بوده است. همانطور که قبلاً ذکر شد این امر می‌تواند به علت انسداد و قطع اتصال زنجیر بین حفرات و همچنین کوچک‌تر شدن حفرات

part 122، حداکثر به ۲ درصد محدود شده است [۳۷]. همچنین در آیین‌نامه پیشنهادی پایایی بتن در حاشیه خلیج فارس، معیارهای جدول ۵ برای شرایط مختلف محیطی حاکم ارائه شده است [۳۶].

نتایج نشان می‌دهد تنها جذب آب طرح ترکیبی حاوی ۱۰ درصد زئولیت به همراه ۱۰ درصد پومیس (Z10P10) و همچنین طرح Z5P10 محدودیت استفاده در شرایط بسیار شدید آیین‌نامه ایران (شرایط E، D و F) و همچنین CIRIA را ارضاء می‌نماید، لذا استفاده از این دو طرح برای مناطق فوق قابل توصیه است.

۳-۴- نتایج آزمایش مقاومت ویژه الکتریکی

مقاومت الکتریکی یکی از روش‌های غیر مستقیم برای اندازه‌گیری تخلخل و نفوذ است و به عنوان شاخصی برای دوام و مقاومت در برابر خوردگی بتن محسوب می‌شود. شکل ۸ مقاومت ویژه الکتریکی تمامی طرح‌ها را در طول مدت ۷، ۱۴، ۲۸، ۵۶ و ۹۰ روز نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود مقاومت ویژه الکتریکی به شدت متأثر از درصد پوزولان جایگزین سیمان است. بررسی نتایج نشان می‌دهد که تأثیر پوزولان‌ها در افزایش مقاومت ویژه الکتریکی بتن خودتراکم به خصوص از طول مدت ۱۴ روز به بعد قابل ملاحظه است. همانطور که مشاهده می‌شود مقاومت ویژه الکتریکی نمونه‌های حاوی ترکیب زئولیت و پومیس، به مراتب بالاتر از نمونه‌های دیگر می‌باشد. به طوری که بیشترین مقاومت ویژه الکتریکی در بین نمونه‌های مورد آزمایش مربوط به طرح Z10P10 (با ۲۰ درصد پوزولان) در طول مدت ۹۰ روز و به مقدار ۴۳/۶ کیلو اهم - سانتی متر بوده که نسبت به نمونه‌ی شاهد ۱۶۱ درصد رشد داشته است.

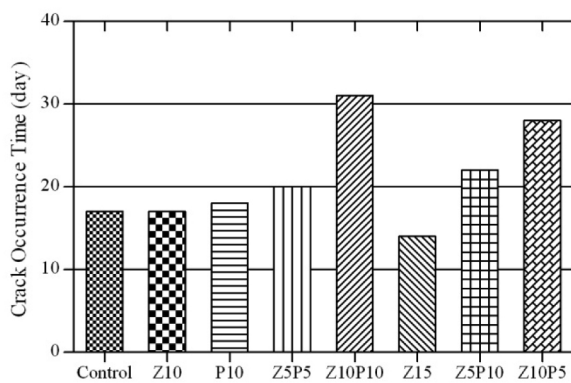


شکل ۸- مقاومت ویژه الکتریکی طرح‌ها در طول مدت‌های مختلف

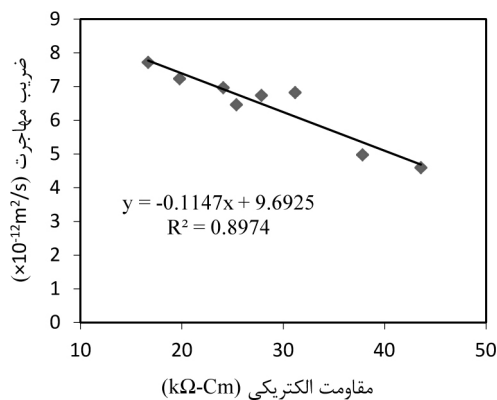
باتوجه به واکنش این پوزولان‌ها با بلورهای بزرگ و ناپایدار Ca(OH)_2 و تبدیل آن‌ها به بلورها کوچک، حجم فضاهای خالی موجود در بتن کمتر و در نتیجه تخلخل بتن نیز کم می‌شود. در حقیقت واکنش پوزولانی باعث کوچک شدن منافذ و چسبندگی بیشتر مخلوط بتن می‌شود. که در این صورت حفرات موئینه کمتر شده و مقاومت الکتریکی بتن

انجام شده توسط خان‌داکر (khandaker) کاملاً همخوانی دارد [۱۷-۱۶].

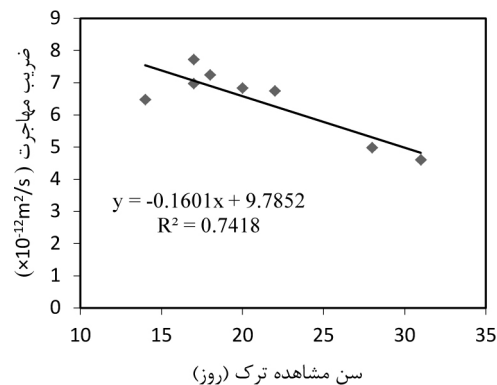
در شکل ۱۳ نیز ارتباط بین ضریب مهاجرت یون کلر و مقاومت الکتریکی نمونه‌ها نشان داده شده است. همانطور که در این شکل نشان داده شده با افزایش مقاومت ویژه الکتریکی بتن، مشابه سایر تحقیقات انجام شده [۴۴-۴۵]، ضریب مهاجرت یون کلر کاهش یافته که به معنی کاهش شدت خوردگی و افزایش طول مدت وقوع ترک نمونه است. به عبارت دیگر خوردگی نسبت مستقیم با جریان بین آندوکاتد داشته و با مقاومت الکتریکی نسبت عکس دارد.



شکل ۱۱- طول مدت مشاهده ترک طرح‌های آزمایش خوردگی تسریع شده

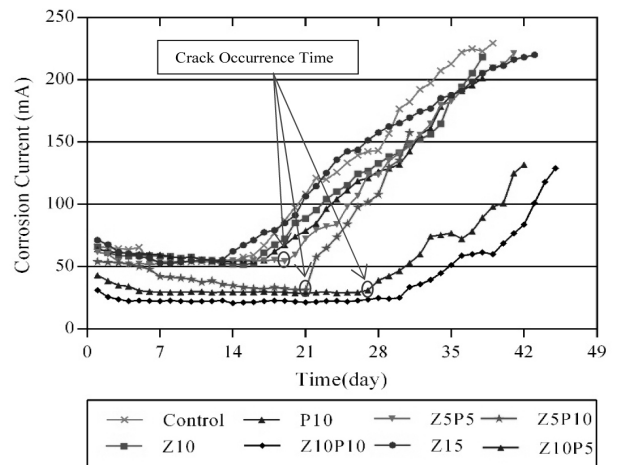


شکل ۱۲- ارتباط بین ضریب مهاجرت یون کلر و طول مدت مشاهده ترک



شکل ۱۳- ارتباط بین ضریب مهاجرت یون کلر و مقاومت الکتریکی

طی واکنش‌های پوزولانی باشد.



شکل ۱۰- تغییرات جریان طرح‌های پلی آزمایش خوردگی تسریع شده

از آنجا که رسیدن جریان به آرماتور از طریق زنجیره‌ی حفرات داخل بتن صورت می‌گیرد، در نمونه شاهد به علت بزرگ بودن حفرات، جریان بیشتری عبور نموده است. ولی در طرح‌های با مقدار پوزولان بیشتر، جریان کاهش یافته است. با بررسی نقش پوزولان‌ها در مکانیسم خوردگی براساس نتایج طول مدت مشاهده ترک همه طرح‌ها در شکل ۱۱، می‌توان چنین بیان نمود که با افزایش درصد پوزولان جایگزین، طول مدت مشاهده ترک افزایش یافته است که نشان دهنده‌ی افزایش مقاومت در برابر خوردگی در اثر افزودن پوزولان‌ها و تاخیر در زمان ترک می‌باشد. این افزایش، نسبت مستقیم با درصد پوزولان جایگزین شده دارد. با جایگزینی ۲۰ درصد پوزولان (۱۰ درصد زئولیت و ۱۰ درصد پومیس) طول مدت مشاهده ترک نسبت به نمونه شاهد ۸۲ درصد افزایش یافته است. در واقع مقاومت در برابر خوردگی و دوام این طرح، بیش از ۱/۵ برابر نمونه‌ی شاهد است. همچنین طول مدت شروع ترک در نمونه‌های دارای زئولیت و پومیس همزمان (Z5P10, Z10P5, Z10P10) دیرتر از نمونه‌های تک پوزولانی است. به نظر می‌رسد اثر مکمل این دو باعث شده است با اصلاح ساختار منفذی، گسسته سازی حفرات و توزیع آنها در نواحی بیشتری از بتن، یون‌های کلر بیشتری مقید می‌گردند.

همانطور که ذکر شد آزمایش خوردگی تسریع شده با تسریع فرآیند انتقال یون کلر انجام شده است، در شکل ۱۲ ارتباط زیاد بین نتایج ضریب مهاجرت یون کلر و طول مدت مشاهده ترک در آزمایش خوردگی نشان داده شده است. هرچه ضریب مهاجرت یون کلر در یک نمونه بتنی کمتر باشد بدین معنی است که در مقابل خوردگی بیشتر مقاومت نموده و ترک دیرتر اتفاق می‌افتد که با نتایج تحقیقات

نتیجه گیری

را دارا می باشد. لذا به منظور دستیابی به بتن های با دوام بیشتر استفاده از ترکیب پومیس و زئولیت توصیه می شود.

۳- در نمونه های مورد بررسی استفاده همزمان از پومیس و زئولیت باعث کاهش چشمگیر ضریب مهاجرت یون کلر و افزایش طول مدت ترک شده است. که این هر دو نشان می دهد در مناطقی که احتمال خوردگی آرماتور وجود دارد می توان با استفاده از ترکیب زئولیت و پومیس به عنوان جایگزین بخشی از سیمان مصرفی تا حد زیادی به مقاومت بتن در برابر خوردگی میلگرد افزود. بر اساس نمونه های مورد مطالعه استفاده ۲۰ درصدی پوزولان جایگزین (شامل ۱۰ درصد پومیس و ۱۰ درصد زئولیت) قابل توصیه است.

تقدیر و تشکر

از آزمایشگاه بتن دانشگاه سیستان و بلوچستان و همچنین شرکت آب و فاضلاب روستایی استان بخاطر حمایت طرح پژوهشی ۸۰۳۶-۲۱۴R و نیز از مسئولین محترم شرکت سیمان سیستان تشکر و قدردانی می گردد.

در این تحقیق با ساخت نمونه های آزمایشگاهی، اثر استفاده از پوزولان های مختلف بر روی دوام بتن و خوردگی میلگرد مورد بررسی قرار گرفت. در این راستا آزمایشات مختلفی از جمله مقاومت فشاری، آزمایش عمق نفوذ آب، درصد جذب آب، مقاومت ویژه الکتریکی، ضریب مهاجرت یون کلر و بالاخره خوردگی تسریع شده بر روی نمونه های ساخته شده، مد نظر قرار گرفت. نتایج حاصله نشان می دهد که:

- ۱- علی رغم کاهش درصد سیمان (در طرح های حاوی حاوی پوزولان)، کاهش قابل ملاحظه ای در مقاومت فشاری این نمونه ها مشاهده نمی شود و با گذشت زمان اختلاف مقاومت بین نمونه های حاوی پوزولان و بدون آن کمتر می شود. با توجه به تأثیر کاهش سیمان در هزینه طرح استفاده از نمونه های حاوی پوزولان قابل توصیه است.
- ۲- بر اساس نتایج بدست آمده، استفاده از پوزولان به عنوان جایگزین سیمان باعث کاهش عمق نفوذ و همچنین جذب آب بتن می شود. با توجه به محدودیت های تعیین شده برای عمق نفوذ آب در آیین نامه ملی پایایی بتن در محیط خلیج فارس و دریای عمان، تمامی نمونه های ساخته شده با پومیس و یا زئولیت به تنهایی و یا ترکیبی از آنها در شرایط شدید قابل استفاده است. در حالیکه بر اساس همین آیین نامه و بر اساس معیار حداکثر جذب آب طرح های حاوی ترکیب پومیس با زئولیت، قابلیت استفاده در شرایط بسیار شدید (شرایط D و E و F)

مراجع

- [1] X. Shi, N. Xie, K. Fortune, J. Gong, Durability of steel reinforced concrete in chloride environments: An overview, *Construction and Building Materials*, Vol. 30, 2012, Pp. 125-138.
- [2] L. K. Spainhour, I. A. Wootton, Corrosion process and abatement in reinforced concrete wrapped by fiber reinforced polymer, *Cement and Concrete Composites*, Vol. 30, Issue 6, 2008, Pp. 535-543.
- [3] A.R.Boğa, I.B. Topçu, Influence of fly ash on corrosion resistance and chloride ion permeability of concrete, *Construction and Building Materials*, Vol. 31, 2012, Pp. 258-264.
- [4] H. Binici, O. Aksogan, M. Y. Durgun, Corrosion of basaltic pumice, colemanite, barite and blast furnace slag coated rebars in concretes, *Construction and Building Materials*, Vol. 37, 2012, Pp. 629-637.
- [5] R. F. Feldman, Pore Structure Damage in Blended Cements Caused by Mercury Intrusion, *Journal of American Ceramic Society Journal*, Vol. 67, 1984, Pp. 30-33.
- [6] H.F.W. Taylor, *Cement Chemistry*. Taylor and Thomas Telford Services LTD, London, 1999, Pp. 8 – 128.
- [7] S.K. Agarwal, Pozzolanic Activity of Various Siliceous Materials, *Cement and Concrete Research*, Vol. 36, 2006, Pp 1735 -1739.
- [8] C G.C.ordeiro, F. Toledo, L.M. Tavares, E.M.R. Fairbairn, Pozzolanic Activity and Filler Effect of Sugar Cane Bagasse Ash in Portland Cement and Lime Mortars, *Cement Concrete Composites*, Vol. 30, 2008, Pp. 410-418.
- [9] F.M. Lea, *The Chemistry of Cement and Concrete*, Edward Arnold, London, 1970, Pp. 23-55
- [10] K. Takada, G.I. pelova, J.C. Walraven, Influences of Mixing Efficiency on the Mixture Proportions of General Purpose Self-Compacting Concrete, University of Sherbrook, 2001.

- [11] M. Uysal, K. Yilmaz, M. pek, The effect of mineral admixtures on mechanical properties, chloride ion permeability and impermeability of self-compacting concrete, *Construction and Building Materials*, Vol. 27, Issue 1, 2012, Pp. 263–270.
- [12] A. Kazemian, A. A. Ramezani pour, M. Sarvari, B. Ahmadi, M. A. Moghadam, Investigation of fresh properties and durability of natural zeolite incorporated Eco-SCC, 10th International Congress on Advances in Civil Engineering, Middle East Technical University, Ankara, Turkey, 2012.
- [13] A.H. Khandaker M, M. Lachemi, Corrosion resistance and chloride diffusivity of volcanic ash blended cement mortar, *Cement and Concrete Research*, Vol. 34, 2004, Pp. 695–702.
- [14] A.H. Khandaker M, Chloride induced corrosion of reinforcement in volcanic ash and pumice based blended concrete, *Cement & Concrete Composites*, Vol. 27, 2005, Pp. 381–390.
- [15] A.H. Khandaker M, Pumice based blended cement concretes exposed to marine environment: Effects of mix composition and curing conditions, *Cement & Concrete Composites*, Vol. 30, 2008, Pp. 97–105.
- [16] B. Demirel, O. Keles-temur, Effect of elevated temperature on the mechanical properties of concrete produced with finely ground pumice and silica fume, *Fire Safety Journal*, Vol. 45, 2010, Pp. 385–391.
- [17] D. Bondar, C.J. Lynsdale, N.B. Milestone, N. Hassani, A.A. Ramezani pour, Effect of heat treatment on reactivity-strength of alkali-activated natural pozzolans, *Construction and Building Materials*, Vol. 25, 2011, Pp. 4065–4071.
- [18] A.A. Ramezani pour, M. Samadian, M. Mahdikhani, 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, 2012, Pp. 521-530.
- [19] A. Asan, S. Zeybek, E. Ozyilmaz, H. Aykul, K. Karacif, Effect of pumice and fly ash on the corrosion of reinforcing steel in concrete, 2nd International Balkans Conference on Challenges of Civil Engineering, BCCCE, EPOKA University, Tirana, ALBANIA, 2013, Pp. 23-25.
- [۲۰] ولی پور م.، پرگر ف.، قاسم زاده ثمرین ف.، بررسی اثر استفاده از پوزولان طبیعی ژئولیت بر روی پارامترهای جذب آب و مقاومت الکتریکی بتن و مقایسه آن با بتن شاهد، دومین کنفرانس ملی بتن، تهران، ایران، ۱۳۸۹.
- [۲۱] مرادیان م.، اصلانیان ز.، نوری و.، بررسی عملکرد بتن حاوی ژئولیت و دوده سیلیس در معرض اسید سولفوریک، دومین کنفرانس ملی بتن، تهران، ایران، ۱۳۸۹.
- [۲۲] رضانیانپور ع. ا.، موسوی س. ر.، کلهری م.، صدری ع.، بررسی اثر سیستم‌های عمل آوری بر خواص مهندسی و دوام بتن‌های حاوی ژئولیت، سومین کنفرانس ملی بتن، تهران، ۱۳۹۰.
- [۲۳] احمدی ب.، شکرچی زاده م.، افتخارنژاد ج.، بهبود دوام بتن با استفاده از ترکیب ژئولیت با دوده سیلیسی و خاکستر بادی، سومین کنفرانس ملی بتن ایران، تهران، ۱۳۹۰.
- [۲۴] کلهری م.، سایبانی م.، بررسی دوام بتن‌های حاوی ژئولیت در برابر نفوذ یون‌های کلراید و خوردگی، دومین کنفرانس ملی مهندسی و مدیریت ساخت، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، پردیس بندرعباس - ایران، اردیبهشت، ۱۳۹۱.
- [۲۵] رضانیانپور ع. ا.، موسوی س. ر.، کلهری م.، صابرممنش م. ح.، دوام بتن‌های حاوی ژئولیت در برابر نفوذ یون‌های کلراید و خوردگی، نهمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، اردیبهشت، ۱۳۹۱.
- [26] E. Vejmelková, M. Ondráček, R. Černý, Mechanical and Hydric Properties of High Performance Concrete Containing Natural Zeolites, *World Academy of Science, Engineering and Technology*, Vol. 63, 2012.

- [27] P. Ashoori, R. Madandoust, J. Sobhani, Concrete Made With Zeolite and Metakaolin: A Comparison on the Strength and Durability Properties, *ASIAN JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING (BHRC)*, Vol. 14, NO. 4, 2013, Pp. 533-543.
- [28] J. Ambrose, S. Rols, I. Pera, Self-Leveling Concrete Design and Properties, *Concrete Science and Engineering*, Vol. 1, 1999, Pp. 140-147.
- [29] EFNARC, Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete, European Federation, 2002.
- [30] H. Wen Chai, Design and testing of self-compacting concrete, a thesis submitted to the University of London for the degree of Doctor of Philosophy, 1998.
- [۳۱] نعمتی چاری م.، شکرچی زاده م.، تاثیر ابعاد و شکل آزمون‌ها روی مقدار جذب آب بتن در مدت زمان مشخص، چهارمین کنفرانس ملی سالیانه بتن، تهران، ۱۳۹۱.
- [32] S. V. Joshi, S. D. Bhole, Relation between strength and electrical properties of PPC concrete, *International Journal of Earth Sciences and Engineering*, Vol. 04, No. 06 SPL, 2011, Pp. 892-894.
- [33] W. J. McCarter, G. Starrs, S. Kandasami, R. Jones, M. Chrisp, Electrode configurations for resistivity measurements on concrete, *ACI Materials Journal*, Vol. 106, No. 3, 2009, Pp. 258-264.
- [34] NT BUILD 492, Chloride Migration Coefficient From Non-Steady-State Migration Experiments, Published by NORDTEST, 1999.
- [35] A. A. A., Hassan, M. Lachemi, A. H. Khandaker M., Corrosion resistance of self-consolidating concrete in full-scale reinforced beams, *Cement & Concrete Composites*, Vol. 31, 2009, Pp. 29-38.
- [۳۶] نشریه شماره ۴۲۸: آیین نامه ملی پایایی بتن در محیط خلیج فارس و دریای عمان (پیشنهادی)، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، چاپ اول، تهران، ایران، ۱۳۸۴.
- [37] 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.
- [38] C. Andrade, C. Alonso, S. Goñi, Possibilities for electrical resistivity to universally characterize mass transport processes in concrete, in: Dhir, R. K., Roderick Jones, M. (Eds), *Proceeding of Conference Concrete 2000*, Scotland, UK, 1993, Pp. 1639-1652.
- [39] P. Ghodousi, A. A. Ramazanianpour, A. Taheri, T. Parhizkar, E. Ganjian, The Use of Surface Treatment Compounds to Enhance Durability of Reinforced Concrete, *International Congress, Concrete in the service of Mankind*, 1996.