

تأثیر زئولیت بر مقاومت تراکمی، نفوذپذیری و مقاومت در برابر حملات یون کلر در بتن

بهزاد سعیدی رضوی^{*}، سید محمد روحانی^۲، مجتبی شیری^۳، بهزاد مهدی خانی^۴

دریافت مقاله: ۹۸/۰۹/۲۶ پذیرش مقاله: ۹۹/۰۵/۱۱

چکیده

خوردگی از عوامل مخربی است که آسیب زیادی را به آرماتور داخل بتن می‌رساند و خسارات جبران‌ناپذیری را برای اقتصاد کشور ایجاد می‌کند. نفوذ یون کلر در بتن یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر خوردگی بتن می‌باشد. از این رو لازم است که با شناسایی درست خصوصیات بتن با استفاده از روش‌های مناسب به مقابله با خوردگی پرداخته شود. در این تحقیق به ارزیابی تأثیر اضافه کردن زئولیت (۰، ۱۰ و ۱۵ درصد) به بتن بر روی مقاومت تراکمی و میزان نفوذ یون کلر در بتن پرداخته شده است. با توجه به آزمایش‌ها انجام شده، با اضافه کردن زئولیت، در آغاز مقاومت تراکمی بتن کاهش می‌یابد ولی پس از گذشت ۹۰ روز، مقاومت تراکمی افزایش می‌یابد و با مقاومت نمونه‌های شاهد تقریباً برابر می‌شود. همچنین زئولیت میزان نفوذ یون کلر در بتن را به‌طور متوسط ۳۰٪ (در مقایسه با نمونه شاهد) کاهش می‌دهد. در نهایت با توجه به نتایج به دست آمده می‌توان بیان کرد که با استفاده از ۱۰٪ زئولیت، خواص بتن بهبود می‌یابد.

کلید واژه‌ها: بتن، زئولیت، مقاومت تراکمی، یون کلر، خوردگی.

^۱ استادیار پژوهشی گروه پژوهشی ساختمانی و معدنی، پژوهشکده فناوری و مهندسی، پژوهشگاه استاندارد، کرج، ایران.

^۲ مدیر بخش دوام بتن، شرکت نانو بتن امین، قم.

^۳ دانشجوی دکتری زمین شناسی مهندسی دانشگاه فردوسی، مشهد، ایران.

^۴ هیات علمی گروه پژوهشی ساختمانی و معدنی، پژوهشکده فناوری و مهندسی، پژوهشگاه استاندارد، کرج، ایران.

* مسئول مکاتبات: bsaidi@standard.ac.ir

۱. مقدمه

بتن به دلیل پایداری مکانیکی و دوام بالا، یکی از پرکاربردترین مصالح در پروژه ای عمرانی می باشد، مارکیو و همکاران (Markiv et al. 2016). عوامل مختلفی (مثل ترک انقباضی، یخ زدگی، حمله یون کلر و سولفات) می تواند به دوام بتن آسیب برساند. از سوی دیگر از هزینه های حفاظت، نگهداری و بازسازی بتن هم نمی توان صرف نظر کرد، تران و همکاران (Tran et al. 2019). از این رو افزایش مقاومت بتن همواره مورد توجه محققین علم بتن بوده است. در این راستا تلاش های زیادی انجام شده است که مقاومت و دوام بتن را افزایش دهند. یکی از پارامترهای مهمی که در جهت افزایش دوام بتن و سازه مورد توجه است افزایش مقاومت بتن در برابر خوردگی آرماتور داخل بتن می باشد. خوردگی آرماتور موجود در داخل بتن یکی از عوامل مهم و مؤثر بر مقاومت سازه های بتنی هست. یکی از مهم ترین پارامترهای که بر خوردگی بتن تأثیر دارد وجود یون کلر هست. در محیط های دریایی و خاک های لب شور آب می تواند این یون را به داخل بتن انتشار دهد. زمانی که میزان این یون بیش از حد مجاز باشد، لایه محافظ فولاد را از بین می برد و باعث شروع خوردگی آرماتور داخل بتن می گردد. از سوی دیگر عیار سیمان از پارامترهای مهمی است که بر خصوصیات بتن تأثیر دارد. مطالعات بیشتر محققین نشان داد که با افزایش عیار سیمان مقاومت و مقاومت الکتریکی بتن کاهش، تخلخل و نفوذپذیری آن افزایش می یابد، شای، کولیا و جورجیو، یگیتر و یزچی، پون و لام (Shi, C. 2004; Koliass and Georgiou, 2005, Yegiter and Yezici, 2007, Poon and Lam, 2008). از این رو در سالهای اخیر پژوهشگران زیاد سعی کردند با اضافه کردن پوزلان ها (مانند ژئولیت) یا دیگر افزودنی ها کیفیت و مقاومت بتن را در برابر خوردگی بهبود ببخشند.

چن و جی (Chan and ji, 1999) به بررسی تأثیر ژئولیت، میکرو سیلیس و خاکستر بادی بر مقاومت بتن پرداختند. مطالعات آن ها نشان داد که با اضافه کردن ۱۵٪ ژئولیت

مقاومت ۲۸ روز بتن افزایش می یابد. لیکن زمانی که درصد ژئولیت به ۳۰٪ افزایش می یابد مقاومت بتن کاهش می یابد. احمدی و شکرچی (Ahmadi and Shekarchi 2010) مطالعاتی را بر روی تأثیر ژئولیت سمنان و میکرو سیلیس بر روی بتن انجام دادند. مطالعات ترموگراویمتریک آن ها نشان داد که طی ۲۸ روز تمام کلسیم هیدروکسید اولیه با ژئولیت وارد واکنش می شود. همچنین استفاده از ژئولیت روانی بتن (اسلامپ)، نفوذپذیری و ضریب انتشار یون کلر را کاهش می دهد. نجیمی و همکاران (Najimi et al., 2012) نشان دادند که کلینوپیتولیت ژئولیت در مقایسه با دیگر پوزلان های طبیعی ایران فعالیت پوزلانی بیشتری دارد و با پوزلان نوع N در استاندارد ASTM C618 تطابق دارد. در سنین پایین مقاومت فشاری بتن حاوی ژئولیت کمتر از بتن شاهد (فاقد ژئولیت) است. لیکن با افزایش سن بتن این کاهش مقاومت بتن کم می شود. همچنین استفاده از ژئولیت دوام بتن افزایش می دهد. آن ها نشان دادند که با اضافه کردن ۱۵ تا ۳۰ درصد ژئولیت میزان نفوذ یون کار به بتن (در مقایسه با نمونه شاهد) بعد از ۲۸ روز بین ۷۲/۵ تا ۹۱/۸٪ کاهش می یابد. توان و همکاران، زانگ و همکاران (Zhang et al., 2016, Tuan et al., 2016) نیز نشان داد که از ژئولیت برای افزایش دوام بتن های با نسبت پایین آب/سیمان ($>0/25$) می توان استفاده کرد.

مطالعات شکرچی زاده و همکاران (۱۳۸۹) در جزیره قشم نشان داد که استفاده از ژئولیت، میکرو سیلیس و متاکائولن طول عمر مفید سازه های بتنی را در شرایط نامطلوب و تهاجمی افزایش می دهند. احمدی و همکاران (۱۳۹۴) تأثیر مقادیر مختلف ژئولیت (۰، ۱۰ و ۱۵٪) بر مقاومت و نفوذپذیری بتن با تغییر در عیار سیمان (۳۰۰، ۳۵۰ و ۴۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب) مورد مطالعه قرار دادند. مطالعات آن ها نشان داد که با اضافه کردن ۱۵٪ ژئولیت مقاومت بتن افزایش و میزان نفوذ آب و یون کلر کاهش می یابد. همچنین با اضافه کردن ژئولیت می توان در عیار سیمان بالاتر به مقاومت بیشتر و نفوذپذیری کمتر بتن دست پیدا کرد.

۲. مواد و روش ها

۱-۲. مصالح مصرفی

به منظور ارزیابی تأثیر زئولیت بر خصوصیات مقاومتی بتن بیست و یک طرح اختلاط بتن با استفاده از سیمان تیپ ۴۲۵-۱ دلیجان ساخته شد. این سیمان دارای وزن مخصوص 3 g/cm^3 و $3/15$ و سطح مخصوص $2954 \text{ cm}^2/\text{g}$ هست. شن مورد استفاده در بتن شامل شن نخودی ($10-4 \text{ mm}$) و شن بادامی ($25-10 \text{ mm}$) است. نسبت وزنی شن نخودی به بادامی ۲۰ به ۸۰٪ انتخاب شده است تا دانه بندی شن در محدوده استاندارد ASTM C33 (ASTM C33) قرار بگیرد. نسبت ماسه به شن در این پژوهش بین $0/96$ تا $0/88$ انتخاب گردید. بر روی شن و ماسه آزمایش‌ها تعیین وزن مخصوص، جذب آب و مدول نرمی با توجه به روش‌های استاندارد انجام شد. شن و ماسه مورد استفاده در این تحقیق از سایت ماسه شویی شرکت نانو بتن امین قم تهیه شد. لازم به ذکر است که کلیه آزمایشات انجام شده بر روی نمونه‌های بتن در آزمایشگاه شرکت نانو بتن امین قم انجام شده است. در شکل ۱ تصویر نمونه‌های بتن تهیه شده جهت انجام آزمایشات لازم ارائه شده است.

زئولیت مورد استفاده در این تحقیق از معدن افرند اوسکا سمنان تامین شد. بر روی زئولیت مورد استفاده در این تحقیق آزمایش‌های آنالیز شیمیایی، XRD، وزن مخصوص، میزان افت ناشی از احتراق (ASTM C311)، درصد رطوبت و دانه بندی انجام شد. برای تعیین سطح مخصوص زئولیت از روش بلین استفاده شد (ASTM C204).

در گام بعدی پس از تعیین خصوصیات مصالح، با توجه به طرح اختلاط‌های بتنی که برای مناطق با شرایط نامناسب (مثل خلیج فارس) وجود دارد، ۲۱ طرح اختلاط بتن برای این پژوهش انتخاب شد. در این طرح اختلاطها مقدار سیمان 300 ، 325 ، 350 ، 375 ، 400 ، 425 و 450 kg/m^3 درصد زئولیت ۰، ۱۰ و ۱۵٪ در نظر گرفته شد. نمونه‌های فاقد زئولیت به‌عنوان نمونه‌های شاهد در نظر گرفته شد تا بتوان تأثیر اضافه کردن زئولیت را با آن‌ها مقایسه کرد. در طی

مطالعات دیگر محققین هم نشان داد که زئولیت در درازمدت باعث افزایش مقاومت (کلهر و سایبانی، ۱۳۹۱؛ رستمی، ۱۳۹۵؛ خانزادی و همکاران، ۱۳۹۶؛ Poon et al., 2006, Alsadat sabet et al., 2013, Valipour et al., 2013; (Ghasemi et al., 2019, Nagrockiene and Girskas, 2016, دوام (رستمی، ۱۳۹۵)؛ مقاومت الکتریکی (رستمی، ۱۳۹۵؛ السادات ثابت و همکاران، ولیپور و همکاران (Alsatad sabet et al., 2013, Valipour et al., 2013) و مقاومت کششی ایکوتون و همکاران (Ikotun et al., 2010) بتن می‌شود. همچنین روانی بتن السادات ثابت و همکاران (Alsatad sabet et al., 2013)، قابلیت جذب آب ولیپور و همکاران (Valipour et al., 2013)، آب انداختگی و قابلیت جداشدگی (خانزادی و همکاران، ۱۳۹۶)، میزان نفوذ یون کلر، پون و همکاران، فنگ و همکاران، رضانیانپور و همکاران، صمیمی و همکاران (Feng et al., 2002, Poon et al., 2005, Ramezani pour et al., 2015, Mohseni et al., 2017, Samimi et al., 2017)، واکنش‌های قلیایی و حملات سولفاتی، جانوتکا و کراجچی، کاراکورت و توپکو، و جملکوا و همکاران (Janotka and Krajči, 2008, Karakurt and Topcu, 2011, Vejmelková et al., 2015) و آسیب‌پذیری بتن در برابر چرخه‌های ذوب-انجماد، ناگروکین و گریسکاس (Nagrockiene and Girskas, 2016) را کاهش می‌دهد.

در ایران منطقه خلیج فارس از یک سو دارای خاک‌های با خورندگی بالاست و همچنین دارای آب با شوری بالا می‌باشد. با توجه به اهمیت سازه‌هایی که در این منطقه احداث می‌شود، استفاده از بتن با خورندگی کم برای حفظ پایداری این سازه‌ها و کاهش آسیب‌ها از اهمیت بالایی برخوردار است. از این رو در این تحقیق به بررسی تأثیر استفاده از زئولیت بر بهبود خصوصیات مهندسی بتن در جهت افزایش مقاومت بتن در برابر خوردگی پرداخته شده است.

ساعت در شرایط مرطوب آزمایشگاهی نگهداری شد. سپس با باز کردن قالبها نمونهها تا زمان انجام آزمایشها در آب آهک اشباع در دمای 23 ± 2 °C نگهداری شد. در نهایت آزمایشها تعیین مقاومت فشاری، جذب آب حجمی، ارزیابی مقاومت الکتریکی سطحی و آزمایش مهاجرت تسریع شده یون کلر (RCMT) بر روی نمونههای بتن انجام گرفت.

ساخت بتن‌ها نسبت آب به سیمان متغیر بود. در این تحقیق تنها از ژئولیت به عنوان افزودنی بتن استفاده شده است و از هیچ ماده افزودنی شیمیایی دیگری برای افزایش روانی بتن استفاده نشده است. تنها با اضافه کردن آب، روانی مورد نظر تأمین شد. اسلامب نمونهها بین ۸ تا ۱۴ سانتی متر می باشد. پس از ساخت بتن و قالب گیری، ابتدا نمونهها به مدت ۲۴



شکل ۱. تصویر نمونه‌های بتن تهیه شده در آزمایشگاه نانو بتن امین قم

۲-۲. مقاومت فشاری

ابعاد نمونه‌های آزمایش مقاومت فشاری $10 \times 10 \times 10$ cm هستند. آزمایش توسط جک فشاری و با توجه به استاندارد (BS 1881, 1993) انجام شد. برای برآورد مقاومت فشاری در سن ۷ روز ۲ آزمایش و در سنین ۲۸ و ۹۰ روز سه آزمایش بر روی نمونه‌های مربوط به هر طرح اختلاط انجام شد. در مجموع ۱۰۵ آزمایش مقاومت فشاری انجام شد.

۳-۲. جذب آب حجمی

برای برآورد جذب آب نمونه‌ها از روش استاندارد (ASTM C 642, 1997) استفاده شد. از بتن ۹۰ روزه هر طرح اختلاط، یک نمونه با ابعاد 20×10 سانتی متر تهیه شد. هر نمونه با برش دادن به سه نمونه با ابعاد 10×5 سانتی متر تقسیم شد. نمونه‌های تهیه شده برای مدت ۷۲ ساعت در دمای 110 °C در داخل آون نگهداری شد و وزن خشک آنها برآورد شد. در گام بعد نمونه‌ها برای ۷۲ ساعت در آب معمولی نگهداری شد و وزن آنها محاسبه شد. سپس نمونه‌ها ۵ ساعت در

محلول نمک در تماس باشد. پس از تکمیل کردن تمام اتصالات الکتریکی؛ دستگاه جریان اولیه ثابت ۳۰۷ قرائت کرد. بر اساس استانداردها در زمان‌های مشخص ولتاژ لازم اعمال شد (جدول ۱). لازم به ذکر است که دمای محلول سدیم هیدروسل در ابتدا و انتهای آزمایش ثبت شد. در نهایت پس از اتمام هر آزمایش نمونه‌ها با جک به دونیمه شکسته شد. با استفاده از محلول ۰/۱ مولار نیترات نقره میزان نفوذ یون کلر در ۷ نقطه قرائت و با استفاده از روابط موجود میزان مهاجرت یون کلر برآورد گردید.

۳. نتایج و بحث

با توجه به آزمایش‌ها انجام شده بر روی مصالح مورد استفاده در این پژوهش، وزن مخصوص شن $7/2 \text{ g/cm}^3$ و جذب آب آن ۱٪ به دست آمد. شن مورد استفاده در این تحقیق شامل شن نخودی (قطر ۴ تا ۱۰ میلیمتر) و شن بادامی (قطر ۱۰ تا ۲۵ میلیمتر) با نسبت وزنی به ترتیب ۸۰ به ۲۰ درصد است. ماسه دارای وزن مخصوص $65/2 \text{ g/cm}^3$ ، جذب آب ۲/۵٪ و مدول نرمی ۳/۱ می باشد. منحنی دانه‌بندی مصالح مورد استفاده در

این پژوهش در شکل ۲ ارائه شد. در نمودار ارائه شد خطوط آبی معرف دانه‌بندی مصالح مورد استفاده در این تحقیق و خطوط مشکی معرف دامنه مجاز تغییرات دانه‌بندی با توجه به استاندارد (ASTM C33, 2003) است. ترکیب شیمیایی سیمان و زئولیت مورد استفاده در جدول ۲ ارائه شده است. وزن مخصوص سیمان $15/3 \text{ g/cm}^3$ و برای زئولیت $2/2 \text{ g/cm}^3$ به دست آمد. میزان افت ناشی از احتراق زئولیت در دمای ۱۵۰ تا ۷۵۰ درجه سانتی گراد ۷/۶۴٪ به دست آمد که از مقدار مجاز استاندارد (۱۰٪؛ ASTM C618, 2005) تجاوز نمی‌کند. درصد رطوبت زئولیت حدوداً ۵٪ به دست آمد. در جدول ۳ طرح اختلاط‌های مورد استفاده برای ساخت نمونه بتن‌ها ارائه شده است.

حمام بن ماری قرار گرفت و بعد از ۱۶ ساعت وزن آن‌ها تعیین شد. در گام آخر وزن غوطه‌وری نمونه‌ها به روش ارشمیدس ثبت گردید. در نهایت با توجه به روابط موجود درصد جذب آب و درصد حفرات نمونه‌ها برآورد شد.

۲-۴. ارزیابی مقاومت الکتریکی سطحی

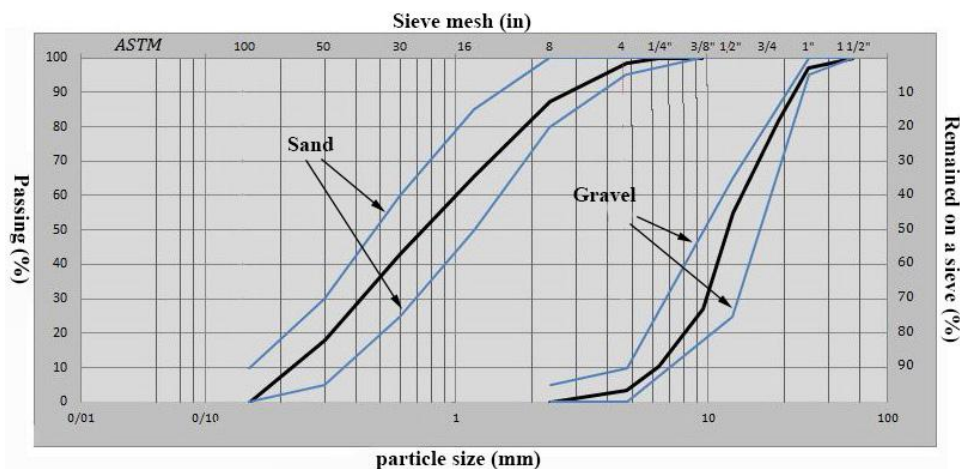
از این آزمایش برای ارزیابی نرخ خوردگی بتن مسلح تحت تأثیر حمله یون‌های کلرید استفاده می‌شود. این آزمایش بر اساس استاندارد (AASHTO TP 95, 2011) انجام شد. برای این منظور از بتن هر طرح اختلاط تعداد ۶ نمونه با ابعاد $20 \times 10 \times 10 \text{ cm}$ تهیه شد و در سنین ۷، ۱۴، ۲۸، ۴۲ و ۹۰ روز مورد آزمایش قرار گرفت. در این آزمایش از دستگاه ونر با ۴ الکتروود با آرایش خطی و با فواصل یکسان $3/8 \text{ cm}$ استفاده شد. در نهایت مقاومت الکتریکی نمونه‌ها در زاویه‌های ۰، ۹۰، ۱۸۰ و ۲۷۰ درجه برآورد شد. مقاومت الکتریکی در هر زاویه ۲ بار قرائت شد تا دقت کار را افزایش یابد. در نهایت با میانگین‌گیری از ۸ قرائت مقاومت الکتریکی میانگین برآورد شد.

۲-۵. آزمایش مهاجرت تسریع شده یون کلر (Rapid chloride migration test)

این آزمایش بر اساس استاندارد (NT Build 492, 1999) انجام شد. برای هر طرح اختلاط بتن دو نمونه با ابعاد $20 \times 10 \times 10 \text{ cm}$ تهیه شد و در سنین ۲۸ و ۹۰ روز مورد آزمایش قرار گرفت. نمونه‌ها در سن مورد نظر از استخر عمل‌آوری بیرون آورده شد و به ابعاد $10 \times 5 \text{ cm}$ برش داده شدند. سپس به مدت ۳ ساعت بدون حضور آب و ۱ ساعت در حضور آب‌آهک اشباع در دیسکاتور قرار گرفتند. سپس به مدت 18 ± 2 ساعت تنها در آب‌آهک اشباع و بدون خلأ نگهداری شدند. در گام بعد نمونه‌ها داخل غلاف پلاستیکی ایزوله قرار داده شد و داخل غلاف محلول سدیم هیدروسل با غلظت ۰/۳ نرمال ریخته شد. مجموع آماده‌شده داخل محلول نمک با غلظت ۱۰٪ قرار داده شد به نحوی که وجه پایین آن با

جدول ۱. تنظیم ولتاژ بر اساس جریان اولیه عبوری ۳۰v (NT Build 492, 1999)

Primary electric current at 30V (mA)	Modified Voltage (V)	Primary electric current- I ₀ (mA)	Time (hr)
I ₀ <5	60	I ₀ <10	96
5≤I ₀ <10	60	10≤I ₀ <20	48
10≤I ₀ <15	60	20≤I ₀ <30	24
15≤I ₀ <20	50	25≤I ₀ <35	24
20≤I ₀ <25	40	25≤I ₀ <40	24
30≤I ₀ <40	35	35≤I ₀ <50	24
40≤I ₀ <60	30	40≤I ₀ <60	24
60≤I ₀ <80	25	50≤I ₀ <75	24
90≤I ₀ <120	20	60≤I ₀ <80	24
120≤I ₀ <180	15	60≤I ₀ <90	24
180≤I ₀ <360	10	60≤I ₀ <120	24
360≤I ₀	10	120≤I ₀	6



شکل ۲. منحنی دانه‌بندی شن و ماسه؛ خط مشکی: دانه بندی استاندارد ASTM C33،

خط آبی: حدود دانه‌بندی مصالح مورد استفاده

جدول ۲. درصد ترکیبات شیمیایی سیمان ۴۲۵-۱ و زئولیت

SO ₃	L.O.I	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	Sio ₂	Element
-	2.16	1.22	0.70	0.33	4.21	4.91	64.04	20.66	Concrete
0.50	13.03	0.74	1.40	6.57	1.6	14.2	1.3	60.6	Zeolite

افزایش یافته است. با توجه به آنالیز انجام شده به طور متوسط در مقابل هر ۲۵ کیلوگرم افزایش مقدار سیمان، مقاومت فشاری بتن ۲ mpa افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش سن بتن بر مقاومت فشاری آن ۱۵٪ تا ۳۷٪ افزایش می‌یابد.

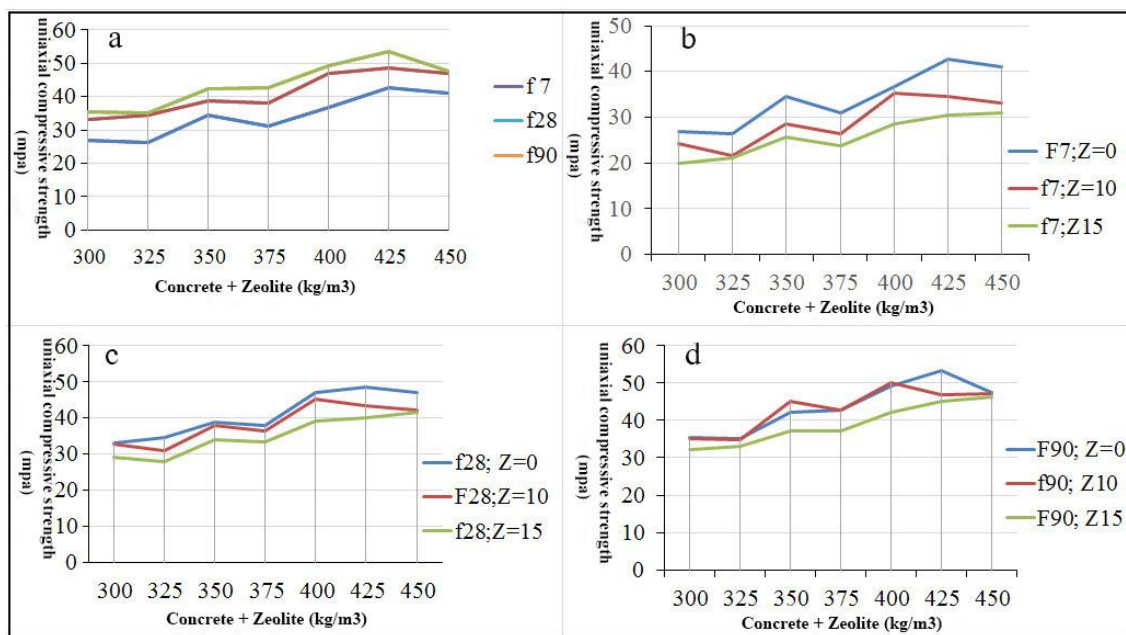
پس از تهیه نمونه‌های بتن آزمایش‌های لازم بر روی نمونه‌ها انجام شد. در گام نخست به ارزیابی تأثیر افزایش درصد سیمان بر مقاومت فشاری نمونه‌های شاهد (در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روز) پرداخته شد. با توجه به نمودار شکل ۳-ا مشاهده می‌شود که با افزایش مقدار سیمان مقاومت فشاری بتن نیز

جدول ۳. طرح اختلاط نمونه‌های بتن

Design code	W/C	C (kg/m ³)	Zeolite (%)	Fine grain (S) (kg/m ³)	Coarse grain (G) (Kg/m ³)	S/G	water (kg/m ³)	Slump (cm)
300-0	0.64	300	0	914.55	944.81	0.96	192	8
300-10	0.66	270	10	883.2	949.7	0.93	198	8.5
300-15	0.68	255	15	872.92	938.65	0.93	204	8.5
325-0	0.62	325	0	865.64	938.52	0.92	201.5	12
325-10	0.64	292.5	10	851.88	923.6	0.92	208	11
325-15	0.66	276.25	15	847.74	911.19	0.93	214.5	13
350-0	0.57	350	0	847.04	947.68	0.89	199.5	9
350-10	0.6	315	10	828	926.38	0.89	210	10
350-15	0.62	297.5	15	807.72	915.63	0.88	217	8
375-0	0.56	375	0	815.03	924.64	0.88	210	12.5
375-10	0.58	337.5	10	805.53	904.17	0.89	217.5	13
375-15	0.61	318.75	15	788.3	884.83	0.89	228.75	13.5
400-0	0.51	400	0	815.63	919.26	0.88	204	11.5
400-10	0.53	360	10	797.48	901.08	0.88	212	8
400-15	0.56	340	15	776.44	880.42	0.88	224	10.5
425-0	0.49	425	0	759.3	902.98	0.88	208.25	9
425-10	0.52	382.5	10	772.47	876.98	0.88	221	8.5
425-15	0.55	361.25	15	751.4	852.8	0.88	233.75	11
450-0	0.48	450	0	776.63	878.28	0.88	216	12.5
425-10	0.51	405	10	751.02	851.6	0.88	229.5	12
425-15	0.53	382.5	15	736.15	834.71	0.88	238.5	14

می‌شود. به طوری که با افزایش سن بتن به ۲۸ روز میزان افت مقاومت فشاری بتن در نمونه‌های دارای ۱۰ درصد زئولیت به ۲ تا ۱۱ درصد و در نمونه‌های دارای ۱۵ درصد زئولیت به ۱۲/۵ تا ۱۷/۵ کاهش می‌یابد (نمودار ۳-ج). در سن ۹۰ روز مقاومت فشاری نمونه‌های بتن با ۱۰٪ زئولیت تقریباً با مقاومت فشاری نمونه‌های شاهد برابر می‌شود. تنها در نمونه‌های با عیار سیمان ۴۲۵ و ۴۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب مقداری افت مقاومت فشاری دیده می‌شود. لیکن برای نمونه‌های دارای ۱۵٪ زئولیت در سن ۹۰ روز میزان افت مقاومت فشاری به مقدار ۳ تا ۱۰ درصد کاهش می‌یابد (نمودار ۳-د).

در گام بعدی تأثیر زئولیت بر مقاومت فشاری بتن (در طرح اختلاط‌های مختلف) مورد تحلیل قرار گرفته شد. در نمودارهای شکل ۳-ب الی ۳-د نتایج تأثیر زئولیت بر مقاومت فشاری بتن در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روز ارائه شده است. با توجه به آنالیز انجام شده، مشاهده می‌شود که در سن هفت روز برای نمونه‌های دارای ۱۰٪ زئولیت میزان مقاومت فشاری بتن بین ۹/۳ تا ۱۸/۹ و برای نمونه‌های دارای ۱۵٪ زئولیت مقاومت فشاری بتن بین ۱۹/۵ تا ۲۸/۳ درصد (شکل ۳-ب) در مقایسه با نمونه‌های شاهد کاهش می‌یابد. لیکن با افزایش سن بتن از تأثیر منفی زئولیت بر کاهش مقاومت فشاری بتن کاسته



نکته: Z= درصد ژئولیت

شکل ۳. نمودار تغییرات مقاومت نسبت به مقدار سیمان و ژئولیت در سنین مختلف

2003). با توجه به آنالیز انجام شده اضافه کردن ۱۰ درصد وزنی ژئولیت (در مقایسه با ۱۵ درصد ژئولیت) به همراه ۳۰۰ تا ۴۰۰ کیلوگرم سیمان باعث افزایش بیشتر مقاومت فشاری بتن در سن ۹۰ روز می‌شود. با توجه به نتایج آزمایش‌ها انجام شده بر روی نمونه‌ها با سن ۹۰ روز مشاهده می‌شود که با اضافه کردن ۱۰٪ ژئولیت میزان جذب آب نمونه‌ها بین ۱/۰۷ تا ۱/۳۲ درصد (متوسط ۱/۱۵٪) و میزان حفرات بین ۱/۰۸ تا ۱/۱۹ درصد (متوسط ۱/۱۲٪) افزایش می‌یابد. برای نمونه‌های با ۱۵٪ ژئولیت میزان حفرات بتن بین ۱/۱۵ تا ۱/۲۹ درصد (متوسط ۱/۲۲٪) و میزان جذب آب بین ۱/۱۳ تا ۱/۳۷ درصد (متوسط ۱/۲۵٪) افزایش می‌یابد (جدول ۴). بنابراین اضافه کردن ژئولیت به نمونه‌ها میزان جذب آب و حفرات نمونه‌ها را کمتر از ۱/۵ درصد در مقایسه با نمونه‌های شاهد افزایش می‌دهد.

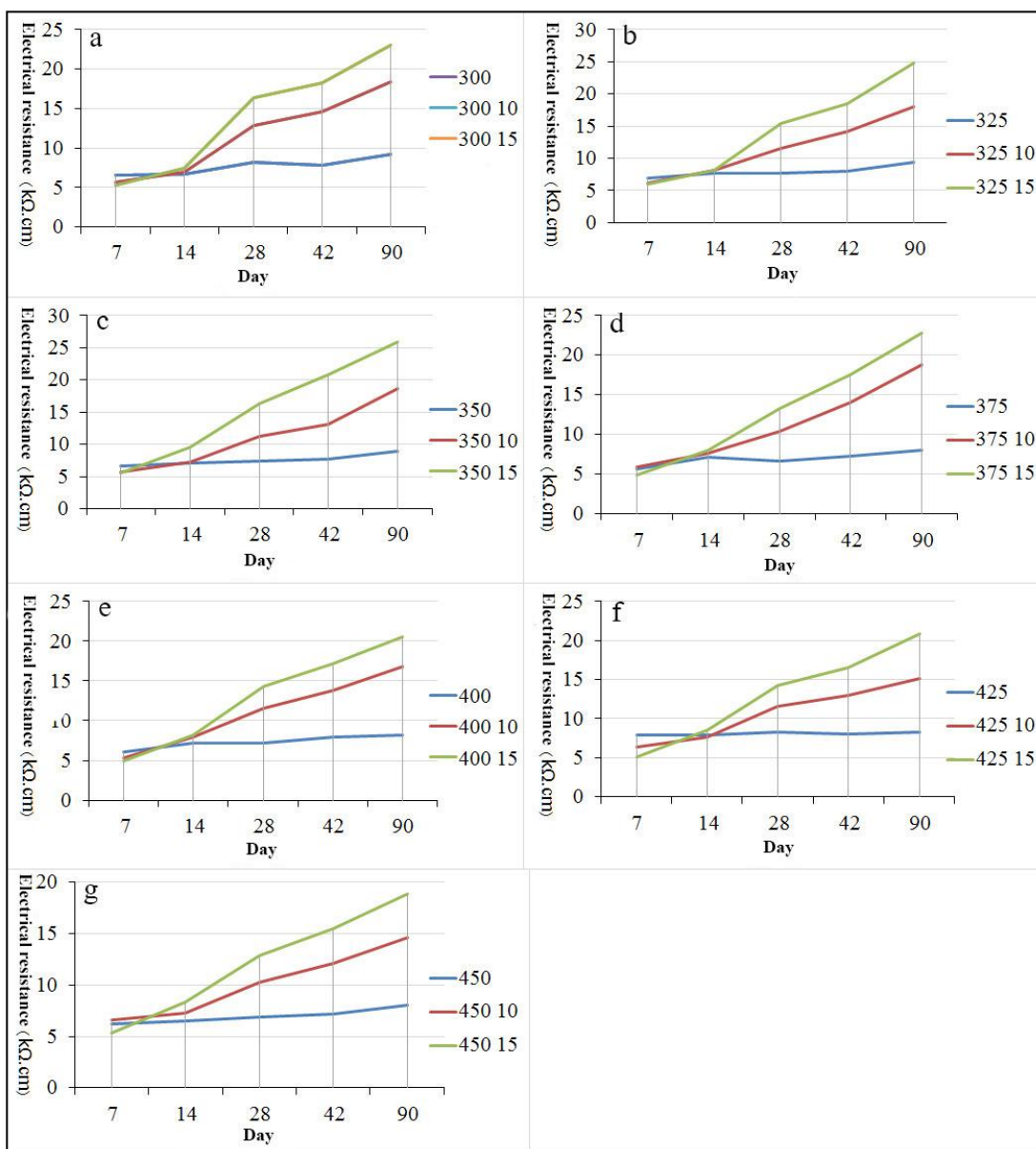
با توجه به آنالیزها با افزایش سن نمونه از ۷ روز به ۹۰ روز در نمونه‌های داری ۱۰٪ ژئولیت مقاومت بتن بین ۳۵/۴ تا ۶۱/۷٪ (متوسط ۴۹٪) افزایش می‌یابد و برای نمونه‌های دارای ۱۵٪ ژئولیت مقاومت بتن نمونه‌ها بین ۴۴/۸ تا ۶۰/۹٪ (متوسط ۵۲٪) افزایش می‌یابد. در نمونه‌های شاهد میزان افزایش مقاومت نمونه با افزایش سن نمونه بین ۱۵/۹ تا ۳۷/۶٪ (متوسط ۲۸/۷٪) است. از این رو می‌توان بیان کرد که در نمونه‌های دارای ژئولیت میزان افزایش مقاومت در درازمدت بیشتر از نمونه‌های شاهد است. دلیل آن این می‌تواند واکنش‌های شیمیایی باشد که در درازمدت بین SiO_2 و Al_2O_3 موجود در ژئولیت با هیدروکسید کلسیم (HC) در بتن رخ می‌دهد و میکرو ساختارهای متراکمی از سیمان سخت شده را در بتن به وجود می‌آورد، پون و همکاران، پراکی و همکاران و مهتا (Mehta, 1987, Poon et al., 1999, Perraki et al.,

جدول ۴. مقادیر جذب آب و حفرات بتن

Porosity (%)	Saturation (%)	Design code
16.81	7	300-0
18.14	7.47	300-10
19.25	7.93	300-15
16.43	5.76	325-0
18.47	7.61	325-10
19.42	7.88	325-15
15.42	6.51	350-0
17.61	7.21	350-10
18.96	7.75	350-15
16.47	6.83	375-0
18.4	7.59	375-10
20.46	8.57	375-15
16.03	6.58	400-0
17.6	7.22	400-10
20.02	8.24	400-15
15.33	6.19	425-0
18.25	7.48	425-10
19.7	8.17	425-15
16.01	6.55	450-0
17.7	7.24	425-10
19.44	8.02	425-15

الکتریکی طرح اختلاط‌های مختلف در سنین ۷، ۱۴، ۲۸، ۴۲ و ۹۰ روز ارائه شده است. نتایج نشان داد که در نمونه‌های شاهد با افزایش سن نمونه افزایش مقاومت الکتریکی کم بوده و میزان افزایش آن به‌طور متوسط ۳۱٪ (پس از ۹۰ روز) است. برای نمونه‌های دارای زئولیت نیز در ۱۴ روز اول تغییر زیادی در مقاومت الکتریکی رخ نمی‌دهد؛ لیکن با افزایش سن نمونه تأثیر زئولیت بر مقاومت الکتریکی افزایش می‌یابد، به‌طوری‌که در سن ۹۰ روز در مقایسه با مقاومت الکتریکی نمونه در سن ۷ روز، برای نمونه‌های دارای ۱۰ درصد زئولیت به‌طور متوسط ۱۹۱٪ و برای نمونه‌های دارای ۱۵٪ زئولیت ۳۲۲٪ مقاومت الکتریکی افزایش می‌یابد.

میزان خوردگی بتن وابسته به مقاومت الکتریکی است و با آن رابطه عکس دارد. از سوی دیگر مقاومت الکتریکی نیز وابسته به نفوذپذیری سیالات و انتشار یون‌ها است. با افزایش مقاومت الکتریکی از میزان انتشار نمک‌های کلریدی در بتن کاسته شده و در نتیجه میزان خوردگی کاهش می‌یابد. با اصلاح خصوصیاتمانند تخلخل، اتصال حفرات، کاهش غلظت یون‌ها می‌توان مقاومت الکتریکی بتن را بهبود بخشید. از این رو ارزیابی مقاومت الکتریکی بتن یک روش غیرمستقیم برای برآورد میزان مقاومت بتن در مقابل خوردگی آرماتور است، احمدی و شکرچی (Ahmadi and Shekarchi, 2010). در جدول ۵ و نمودارهای شکل ۴ نتایج آنالیز مقاومت



نکته: خط آبی: نمونه فاقد زئولیت، خط قرمز: نمونه با ۱۰٪ زئولیت و خط سبز: نمونه با ۱۵٪ زئولیت

شکل ۴. نمودار نتایج آزمایش مقاومت الکتریکی نمونه‌های بتن

جدول ۵. نتایج آزمایش مقاومت الکتریکی نمونه‌های بتن

Electrical resistance					Design code
E90	E42	E28	E14	E7	
9.24	7.86	8.19	6.72	6.62	300-0
18.35	14.56	12.85	6.98	5.73	300-10
22.92	18.28	16.36	7.42	5.31	300-15
9.34	8.03	7.65	7.61	6.85	325-0
18	14.24	11.54	8.21	6.1	325-10
24.82	18.52	15.34	8.19	5.98	325-15
8.97	7.63	7.39	7.03	6.66	350-0
18.66	13.17	11.2	7.29	5.63	350-10
25.97	20.78	16.31	9.48	5.48	350-15
8.02	7.25	6.55	7.08	5.65	375-0
18.73	14.07	10.37	7.56	5.86	375-10
22.83	17.51	13.27	7.94	4.91	375-15
8.16	7.88	7.14	7.14	6.05	400-0
16.55	13.8	11.61	7.96	5.33	400-10
20.56	17.19	14.37	8.23	5	400-15
8.28	8.06	8.23	7.83	7.88	425-0
15.19	13.02	11.56	7.58	6.36	425-10
20.82	16.54	14.21	8.5	5.08	425-15
8.08	7.22	6.89	6.5	6.2	450-0
14.58	12.09	10.3	7.3	6.59	425-10
18.84	15.52	12.91	8.3	5.37	425-15

افزایش مقاومت الکتریکی در نمونه‌های داری ۳۷۵ کیلوگرم سیمان و زئولیت (با نسبت ۸۵٪ سیمان و ۱۵٪ زئولیت) مشاهده می‌شود. همان‌طور که در تفسیر نتایج مقاومت فشاری نمونه‌ها بیان شد، دلیلی افزایش مقاومت الکتریکی نمونه‌های دارای زئولیت بعد از ۹۰ روز، در ارتباط با واکنش شیمیایی است که بین زئولیت و مصالح نمونه‌های بتن رخ می‌دهد. در جدول ۶ رابطه بین مقاومت الکتریکی سطحی و نفوذپذیری ارائه شده است (AASHTO TP95, 2011). با توجه به جدول ۵ و ۶ نفوذپذیری نمونه‌های شاهد در رده زیاد قرار دارد. در مورد نمونه‌های دارای زئولیت در آغاز نفوذپذیری در رده زیاد

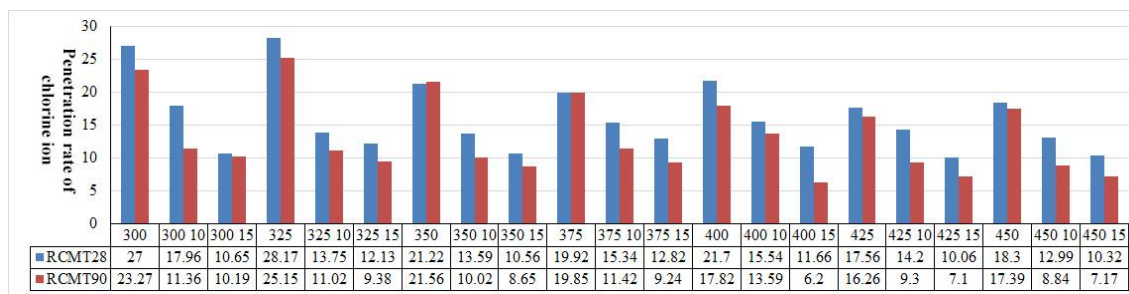
مقایسه مقاومت الکتریکی نمونه‌های دارای زئولیت با نمونه‌های شاهد در سن ۹۰ روز نشان می‌دهد که در نمونه‌های دارای ۱۰٪ زئولیت به‌طور متوسط ۱۰۰٪ و نمونه‌های داری ۱۵٪ زئولیت به‌طور متوسط ۱۶۰٪ افزایش مقاومت الکتریکی رخ می‌دهد. همچنین ارزیابی تاثیر افزایش درصد وزنی سیمان و زئولیت بر مقاومت الکتریکی در سن ۹۰ روز نشان می‌دهد که با افزایش مقدار سیمان و زئولیت تا ۳۷۵ کیلوگرم مقاومت الکتریکی نمونه‌ها افزایش می‌یابد؛ لیکن با افزایش مقدار سیمان و زئولیت به بیش از ۳۷۵ کیلوگرم نسبت افزایش مقاومت الکتریکی در نمونه‌ها کاهش می‌یابد. بنابراین بیشترین

بنابراین می توان بیان کرد که با اضافه کردن ژئولیت میزان نفوذ یون کلر (در مقایسه با نمونه های شاهد) به طور متوسط ۳۰ درصد کاهش می یابد. نتایج آنالیز مقاومت الکتریکی (افزایش مقاومت الکتریکی) نمونه های دارای ژئولیت نیز موید این مسئله است که با افزایش سن نمونه میزان نفوذ یون کلر کاهش می یابد. کاهش نفوذ یون کلر در بتن باعث افزایش مقاومت آرماتور بتن در برابر خوردگی و در نتیجه افزایش عمر مفید بتن می شود.

قرار دارد، لیکن با رخداد واکنش های پزولانی در نمونه های دارای ژئولیت در سن ۲۸ تا ۹۰ روز، مقدار نفوذ پذیری به رده معمولی کاهش می یابد و کیفیت بتن افزایش می یابد. تحلیل های انجام شده بر روی نمونه های بتن نشان داد که میزان افت نفوذ یون کلر (مهاجرت یون کلر) از سن ۲۸ روز به ۹۰ روز، برای نمونه های شاهد بین ۹۸/۴ تا ۱۱۶ درصد (متوسط ۱۰۸٪)، برای نمونه با ۱۰٪ ژئولیت ۱۱۴/۳ تا ۱۵۸/۱ (متوسط ۱۳۸/۱٪) و برای نمونه های با ۱۵٪ ژئولیت ۱۰۴/۵ تا ۱۸۸ درصد (متوسط ۱۳۸/۳٪) به دست آمد (شکل ۵)؛

جدول ۶. رابطه بین مقاومت الکتریکی سطحی و نفوذ پذیری برای نمونه های با ابعاد ۲۰×۱۰ cm

Electrical resistance (KΩ.cm)	The amount of permeability
<12	High
12-21	Normal
21-37	Low
37-254	Very Low
>254	Negligible



شکل ۵. نتایج آزمایش ها مهاجرت تسریع شده یون کلر در سنین ۲۸ (ستون آبی) و ۹۰ (ستون قرمز) روز

۱۵٪ ژئولیت تاثیر بیشتری بر افزایش مقاومت الکتریکی بتن و در نتیجه باعث افزایش بیشتر مقاومت بتن در برابر نفوذ یون کلر و تخریب آرماتور می شود. لازم به ذکر است استفاده از ۳۰۰ تا ۳۷۵ کیلوگرم سیمان و ژئولیت تاثیر بهتری بر افزایش خصوصیات مقاومتی بتن دارد و با افزایش مقدار وزنی سیمان و ژئولیت به بیش از ۳۷۵ کیلوگرم خصوصیات مقاومتی نمونه ها کاهش می یابد.

با توجه به نتایج آزمایشات انجام شده بر روی نمونه های بتن در سه حالت بدون استفاده از ژئولیت، با ده درصد وزنی ژئولیت و پانزده درصد وزنی ژئولیت در یک دوره نمود روزه مشاهده شد که، استفاده از ۱۰٪ ژئولیت در دراز مدت تاثیر بهتری بر افزایش مقاومت فشاری بتن دارد. همچنین استفاده از ۱۰٪ درصد ژئولیت در مقایسه با ۱۵٪ ژئولیت مقدار حفرات و جذب آب بتن را کمتر افزایش می دهد؛ لیکن استفاده از

۴. نتیجه گیری

آنالیزهای مقاومت الکتریکی نمونه‌ها نیز موید این مسئله

است که زئولیت نفوذ یون کلر در بتن را کاهش می‌دهد.

- استفاده از ۳۰۰ تا ۳۷۵ کیلوگرم سیمان و زئولیت تاثیر بهتری بر افزایش خصوصیات (مقاومت فشاری و مقاومت در برابر نفوذ یون کلر) بتن دارد و با افزایش مقدار وزنی سیمان و زئولیت به بیش از ۳۷۵ کیلوگرم خصوصیات نمونه‌ها کاهش می‌یابد.

در نهایت می‌توان بیان کرد که استفاده از ۱۰٪ زئولیت تأثیر بهتری بر مقاومت فشاری بتن دارد. چون از یک‌سو در درازمدت تأثیر منفی (در سن کم) زئولیت بر مقاومت فشاری بتن حذف می‌گردد و مقاومت فشاری بتن در درازمدت مانند نمونه‌های شاهد می‌شود. لیکن استفاده از ۱۵٪ زئولیت تأثیر بیشتری بر افزایش مقاومت بتن در برابر نفوذ یون کلر و در نتیجه کاهش خطر خوردگی آرماتور می‌گردد.

این تحقیق بر روی ارزیابی تأثیر زئولیت (بدون استفاده از هیچ افزودنی دیگری) بر مقاومت تراکم، قابلیت انتقال و مقاومت در برابر حملات یون کلر در بتن، متمرکز شده است. مهم‌ترین نتایج این تحقیق عبارت‌اند از:

- با افزایش سن بتن بر مقاومت آن افزوده می‌گردد.
- در سن هفت روز برای نمونه‌های دارای ۱۰٪ زئولیت مقاومت بتن بین ۹/۳ تا ۱۸/۹ درصد کاهش می‌یابد. برای نمونه‌های دارای ۱۵٪ زئولیت میزان کاهش مقاومت بین ۱۹/۵ تا ۲۸/۳ درصد می‌باشد. لیکن با افزایش سن بتن از تأثیر منفی زئولیت بر کاهش مقاومت بتن کاسته می‌شود. به طوری که مقاومت نمونه‌های بتن با ۱۰٪ زئولیت در سن ۹۰ روز تقریباً با مقاومت نمونه‌های شاهد برابر می‌شود.

- می‌توان بیان کرد که در نمونه‌های دارای زئولیت میزان افزایش مقاومت در درازمدت بیشتر از نمونه‌های شاهد است و نمونه‌های دارای ۳۰۰ تا ۴۰۰ کیلوگرم سیمان و زئولیت (با نسبت ۹۰٪ درصد سیمان و ۱۰٪ زئولیت) بیشترین نسبت افزایش مقاومت را پس از ۹۰ روز نشان می‌دهند.

- اضافه کردن زئولیت میزان حفرات و قابلیت جذب آب بتن را افزایش می‌دهد. لیکن میزان این افزایش کم است.
- نتایج آنالیز مقاومت الکتریکی نشان داد که در طرح شاهد با افزایش سن نمونه تغییر زیادی در مقاومت الکتریکی رخ نمی‌دهد. برای نمونه‌های دارای زئولیت در ۱۴ روز اول تغییر زیادی در مقاومت الکتریکی رخ نمی‌دهد. لیکن در بازه زمانی ۱۴ تا ۹۰ روز مقاومت الکتریکی ۱۹۱٪ تا ۳۲۲٪ افزایش می‌یابد.

- زئولیت میزان نفوذ یون کلر در بتن را به‌طور متوسط ۳۰٪ (در مقایسه با نمونه شاهد) کاهش می‌دهد.

منابع

- احمدی، ج.، عزیزی، ح.، کوهی، م.، ۱۳۹۴. بررسی تأثیر ژئولیت در عبارهای مختلف سیمان بر روی مقاومت و نفوذپذیری بتن. تحقیقات بتن، ۸ (۲): ۱۸-۵.
- خانزادی، م.، نبی زاده شهر بابک، م.ر.، باقری، س.ر.، قلعه نوی، و.، ۱۳۹۶. اثر جایگزینی ژئولیت بر کارایی بتن. مصالح و سازه‌های بتنی، ۲ (۲): ۹۸-۸۹.
- رستمی، ر.ا.، ۱۳۹۵. بررسی تأثیر متاهالوزیت، متاکائولن، ژئولیت و میکروسیلیس بر خواص مکانیکی و دوام بتن: پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت دبیری شهید رجایی.
- شکرچی زاده، م.، ولی پور، م.، پرگر، ف.، ۱۳۸۹. بررسی تأثیر استفاده از پوزولان‌های میکروسیلیس، متاکائولن و ژئولیت و الیاف پلی‌پروپیلن بر مقاومت در برابر نفوذ یون کلر در بتن در شرایط محیطی جزیره قشم. نشریه مهندسی عمران، ۲۲: ۸۳-۹۶.
- کلهری، م.، سایبانی، م.، ۱۳۹۱. دوام بتن‌های حاوی ژئولیت در برابر نفوذ یون‌های کلراید و خوردگی. دومین کنفرانس ملی مهندسی و مدیریت ساخت، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، پردیس بندرعباس، ایران.
- AASHTO TP95., 2011, Standard Method of Test for Surface Resistivity Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration. AASHTO Provisional Standards, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C.
- Ahmadi, B., Shekarchi, M., 2010. Use of natural zeolite as a supplementary cementitious material. *Cement & Concrete Composites*, 32: 134-141.
- Alsadat sabet, F., Libre, N.A., Shekarchi, M., 2013. Mechanical and durability properties of self-consolidating high performance concrete incorporating natural zeolite, silica fume and fly ash. *Construction and Building Materials*, 44: 175-184.
- ASTM C 33., 2003. Standard specification for concrete aggregates. *Book of ASTM Standards*, American Society for Testing and Materials.
- ASTM C 642., 1997. Standard test method for density, absorption, and voids in hardened concrete. *Book of ASTM Standards*, American Society for Testing and Materials.
- BS 1881., 1993. Methods for determination of compressive strength of concrete cubes. *British Standard Institution*.
- Chan, Y.N., Ji, X., 1999. Comparative study of the initial surface absorption and chloride diffusion of high performance zeolite, silica fume and PFA concretes. *Cement & Concrete Composites*, 21: 293-300.
- Dahir, R.K., McCarthy, M.J., Tittle, P.A.J., 2006. Role of cement content in specification for concrete durability: Aggregate type Influences. *Structures & Buildings*, 159: 229-242.
- Feng, N., Feng, X., Hao, T., Xing, F., 2002. Effect of ultrafine mineral powder on the charge passed of the concrete. *Cement and Concrete Research*, 32(4): 623-627.
- Ghasemi, M., Rasekh, H., Berenjian, J., AzariJafari, H., 2019. Dealing with workability loss challenge in SCC mixtures incorporating natural pozzolans: A study of natural zeolite and pumic. *Construction and Building Materials*, 222: 424-436.
- Ikotun, B.D., Ekolu, S., 2010. Strength and durability effect of modified zeolite additive on concrete properties. *Construction and Building Materials*, 24: 749-757.
- Karakurt, C., Topcu, I.B., 2011. Effect of blended cements produced with natural zeolite and industrial by-products on alkali-silica reaction and sulfate resistance of concrete. *Construction and Building Materials*, 25: 1789-1795.
- Kolias, S., & Georgiou, C. 2005. The effect of paste volume and of water content on the strength and water absorption of concrete. *Cement and Concrete Composites*, 27(2): 211-216.
- Markiv, T., Sobol, K., Franus, M., Franus, W., 2016. Mechanical and durability properties of concretes incorporating natural zeolite. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 16(4): 554-562.
- Mehta, P.K., 1987. Natural pozzolans: Supplementary cementing materials in concrete. *CANMET Special Publication*, 86: 1-33.
- Mohseni, E., Tang, W., Cui, H., 2017. Chloride Diffusion and Acid Resistance of Concrete Containing Zeolite and Tuff as Partial Replacements of Cement and Sand. *Materials*, 10: 372.

- Nagrockiene, D., Girskas, G., 2016. Research into the properties of concrete modified with natural zeolite addition. *Construction and Building Materials*, 113: 964–969.
- Najimi, M., Sobhani, J., Ahmadi, B., Shekarchi, M., 2012. An experimental study on durability properties of concrete containing zeolite as a highly reactive natural pozzolan. *Construction and Building Materials*, 35: 1023-1033.
- NT Build 492., 1999. Concrete, mortar and cement-based repair materials. Chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments. Nordtest, Espoo, Finland.
- Perraki, T.H., Kakali, G., Kontoleon. F., 2003. The effect of natural zeolites on the early hydration of Portland cement. *Microporous and Mesoporous Materials*, 61: 205-212.
- Poon, C.S., Kou, S.C., Lam, L., 2006. Compressive strength, chloride diffusivity and pore structure of high performance metakaolin and silica fume concrete. *Construction and Building Materials*, 20: 858–865.
- Poon, C.S., Lam, L., Kou, S.C., Lin, Z.S., 1999. A study on the hydration rate of natural zeolite blended cement pastes. *Construction and Building Materials*, 13: 427-432.
- Poon, C.S., Lam, S.C., 2008. The effect of aggregate-to-cement ratio and types of aggregate on the properties of pre-cast concrete blocks. *Cement & Concrete Composites*, 30: 283–289.
- Ramezani-pour, A.A., Mousavi, R., Kalhori, M., Sobhani, J., Najimi, M., 2015. Micro and macro level properties of natural zeolite contained concretes. *Construction and Building Materials*, 101: 347-358.
- Samimi, K., Kamali-Bernard, S., Maghsoudi, A.A., Maghsoudi, M., Siad., H., 2017. Influence of pumice and zeolite on compressive strength, transport properties and resistance to chloride penetration of high strength self-compacting concretes. *Construction and Building Materials*, 151: 292–311.
- Shi, C. 2004. Effect of mixing proportions of concrete on its electrical conductivity and the rapid chloride permeability test (ASTM C1202 or ASSHTO T277) results. *Cement and concrete research*, 34(3): 537-545.
- Shi, C., 2004. Effect of mixing proportions of concrete on its electrical conductivity and rapid chloride permeability test (ASTM C 1202 or ASSHTO T277) results. *Cement and Concrete Research*, 34: 537–545.
- Tran, Y.T., lee, J., Kumar, P., Hyun, Kim, H., Lee, S.S., 2019. Natural zeolite and its application in concrete composite production. *Composites Part B: Engineering*, 165: 354-364.
- Tuan, N.V., Thang, N.C., Hanh, P.H., Yen, T.T., 2016. Effect of zeolite on autogenous shrinkage of ultra-high performance concrete, *Proceeding of the 7th International Conference of Asian Concrete Federation: "Sustainable concrete for now and the future"*, Hanoi, Vietnam.
- Valipour, M., Pargar, F., Shekarchi, M., Khani, S., 2013., Comparing a natural pozzolan, zeolite, to metakaolin and silica fume in terms of their effect on the durability characteristics of concrete: A laboratory study. *Construction and Building Materials*, 41: 879–888.
- Vejmelková, E., Koňáková, D., Kulovaná, T., Keppert, M., Žumár, J. Rovnaníková, P., Keršner, Z., Sedlmajer, M., Černý, R., 2015. Engineering properties of concrete containing natural zeolite as supplementary cementitious material: Strength, toughness, durability, and hygrothermal performance. *Cement and Concrete Composites*, 55: 259-267.
- Zhang, J., Ding, X., Wang, Q., Zheng, X., 2018. Effective solution for low shrinkage and low permeability of normal strength concrete using calcined zeolite particles. *Construction and Building Materials*, 160: 57-65.
- Zhang, J., Wang, Q., Zhang, J., 2017. Shrinkage of internal cured high strength engineered cementitious composite with pre-wetted sand-like zeolite. *Construction and Building Materials*, 134: 664-672.

Influence of zeolite on compressive strength, permeability and resistance to chlorine ion attack in concrete

Behzad Saeedi Razavi ^{*1}, Seyed Mohamad Rohani ², Mojtaba Shiri ³, Behzad Mehdikhani ⁴

Abstract

Corrosion is one of the destructive factors that causes a lot of damage to the reinforcement inside the concrete and causes irreparable damage to the economy. Chlorine ion penetration in concrete is one of the most important factors affecting concrete corrosion. Therefore, it is necessary to refine corrosion by identifying the concrete properties using proper methods. In this study, the effect of adding zeolite (0, 10 and 15%) to concrete on the uniaxial compressive strength and penetration rate of chlorine ion in concrete was investigated. According to the tests result performed by adding zeolite at the beginning concrete compressive strength decreases but after 90 days the compressive strength increases and is approximately equal to the strength of control samples. Zeolite also reduces the penetration rate of chlorine ions into concrete by 30% on average (compared to the control sample). Finally, it can be concluded that using 10% zeolite improves the concrete properties.

Keywords: Concrete, Zeolite, Compressive strength, Chlorine ion, Corrosion.

¹. Research Assistant professor, Department of Construction and Mineral Engineering, Technology and Engineering Research Center, Standard Research Institute (SRI), Karaj, Iran

². Postgraduated of civil engineering, director of durability department of concrete, Amin Nano Concrete Knowledge Co.

³. PHD Student, Department of Geology, Ferdowsi University of Mashhad.

⁴. Department of Construction and Mineral Engineering, Technology and Engineering Research Center, Standard Research Institute (SRI), Karaj, Iran

* **Corresponding Author** : bsaidi@standard.ac.ir