مهندسی عمران شریف، (بهار ۱۳۹۴)
دوره‌ی ۲ - ۳۱، شماره‌ی ۱/۱، ص. ۱۱۳-۱۱۸، (یادداشت فنی)

Research Note

بررسی اثر سیستم‌های عمل‌آوری در خواص مهندسی و دوام بتن‌های حاوی زئولیت

علی‌اکبر رمضانیانپور (استاد)
سیده رحیمه موسوی * (کارشناس ارشد)
موسی کلهری (کارشناس ارشد)
دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

از آنجا که شرایط محیطی برای بررسی یک ماده‌ی جدید حائز اهمیت است. مطالعه‌ی اثر پوزولان زئولیت در شرایط مختلف عمل‌آوری برای آشنایی با خواص ناشناخته‌یی که ممکن است در یک سیستم عمل‌آوری خاص نمود پیدا کند، در این پژوهش مورد توجه قرار گرفته است.

در این نوشتار، اثر دو نوع سیستم عمل‌آوری شامل: ۱. دائما اشباع در آب، ۲. هفت روز نخست در آب و سپس در محیط آزمایشگاه با رطوبت و دمای متوسط در ۱۲ طرح اختلاط با ۴ نسبت آب به سیمان و ۳٪ جایگزینی زئولیت مورد بررسی قرار گرفته است. اگرچه نتایج مورد انتظار آزمایش‌های بتن با کاهش نسبت آب به سیمان و یا افزایش سن در دو سیستم عمل‌آوری به طور محسوسی با یکدیگر متفاوت است، لیکن افزودن زئولیت روند مشابهی در هر دو سیستم عمل‌آوری به دنبال داشته است.

aaramce@aut.ac.ir
rahimeh2533@yahoo.com
moosa.kalhori@yahoo.com

واژگان کلیدی: دوام بتن، پوزولان طبیعی، زئولیت، خواص مکانیکی، عمل‌آوری.

۱. مقدمه

یکی از قسمت‌های مهم در عملیات بتن، عمل‌آوری آن است. عمل‌آوری یعنی نگه‌داشتن مقدار رطوبت و دمای بتن در حد رضایت‌بخش در طی دوره‌یی مشخص که بلافاصله پس از بتن‌ریزی و اتمام عملیات پرداخت آغاز می‌شود. عمل‌آوری مناسب برای کیفیت بتن و ادامه‌ی واکنش‌های سیمان بسیار حیاتی است.[۱]

عمل‌آوری تأثیر بسیار زیادی در خواص بتن سخت‌شده مانند: ماندگاری، مقاومت، افزایش قابلیت آب‌بندی، مقاومت در برابر سایش، ثبات حجم و مقاومت در برابر انجماد و آب‌شدن و نمک‌های یخ‌زدا دارد.

پژوهش‌های زیادی بر روی خواص مکانیکی و دوام بتن‌های حاوی زئولیت انجام شده است و هر یک به نحوی زئولیت را در بهبود خواص بتن مؤثر دانسته‌اند. پژوهشگران در نتایج تحقیقات خود عنوان کرده‌اند که خواص مؤثر زئولیت در بتن بیشتر از خاکستر بادی و کمتر از دوده‌ی سیلیس است. همچنین آنها به این نتیجه رسیده‌اند که تأثیر زئولیت در مقاومت خمیرهای با نسبت آب به سیمان کمتر، بیشتر است و افت مقاومت اولیه‌ی آنها نسبت به خمیر حاوی خاکستر بادی کمتر است؛ در حالی که در زمان‌های عمل‌آوری طولانی، افزایش مقاومت کمتری دارند.[۲] در پژوهشی در سال ۱۹۹۹، با تأکید بر بهبود مقاومت بتن با افزودن زئولیت اشاره شده است که مقاومت در نسبت‌های بالای آب به سیمان با افزودن زئولیت کاهش می‌یابد.[۳] برخی پژوهشگران نیز افزودن زئولیت را در افزایش مقاومت بتن مؤثر دانستند.[۴-۶] همچنین در پژوهش‌های دیگری (۲۰۱۱) جایگزینی ۱۰٪،[۷] و جایگزینی ۳۰٪،[۸] را بهینه‌ی درصد جایگزینی زئولیت عنوان کرده‌اند.

علی‌رغم اینکه پژوهش‌های زیادی در زمینه‌ی اثر استفاده از زئولیت در مقاومت بتن صورت گرفته است، لیکن تاکنون هیچ پژوهشی که اثر عمل‌آوری را در این ماده مورد بررسی قرار دهد، صورت نگرفته است.

از دیدگاه کاربردی، بتن‌هایی که در ساخت و سازها استفاده می‌شوند، به‌طور دائم در آب عمل‌آوری نمی‌شوند. در بیشتر موارد ۲ الی ۳ روز آب‌پاشی می‌شوند و سپس در معرض هوا قرار می‌گیرند. بنابراین، برای شناخت خواص بتن‌ها باید شرایط محیطی حاکم بر آنها را مورد مطالعه قرار داد. از این‌رو در این پژوهش اثر دو سیستم عمل‌آوری بر روی بتن‌های حاوی زئولیت بررسی شده است.

بدین منظور دو سیستم عمل‌آوری در نظر گرفته شده است: در سیستم اول، نمونه‌ها تا زمان آزمایش دائماً در آب آهک اشباع قرار داده شده‌اند و در سیستم دوم، نمونه‌ها ۷ روز نخست پس از بتن‌ریزی در آب آهک اشباع قرار داده شده و سپس تا سن آزمایش در محیط آزمایشگاه با دمای $25 \pm 2^{\circ}C$ و رطوبت نسبی ۵۵٪ عمل‌آوری شده‌اند.

مطالعه‌ی اثر پوزولان زئولیت در شرایط معمول عمل‌آوری برای آشنایی با خواص ناشناخته‌یی که ممکن است در یک سیستم عمل‌آوری خاص نمود پیدا

* نویسنده مسئول
تاریخ: دریافت ۱۳۹۱/۷/۲۴، اصلاحیه ۱۳۹۲/۵/۲۷، پذیرش ۱۳۹۲/۶/۱۶.

کند، می‌تواند استفاده از این ماده را در صنعت کاربردی کشور قابل اطمینان‌تر کند.

۲. برنامه‌ی آزمایشگاهی

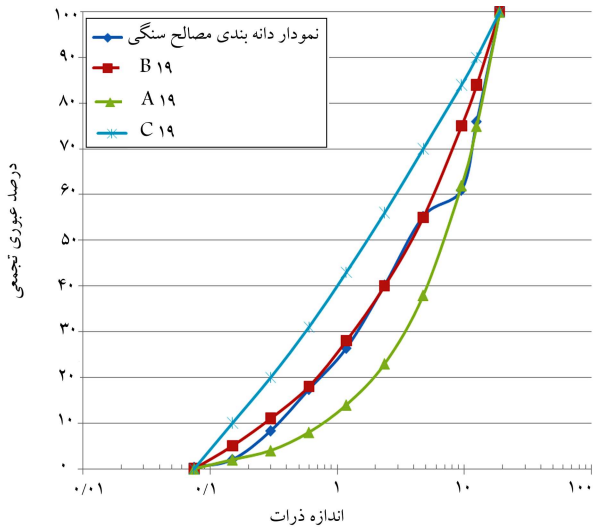
۱.۲. مصالح مصرفی

۱.۱.۲. سنگ‌دانه

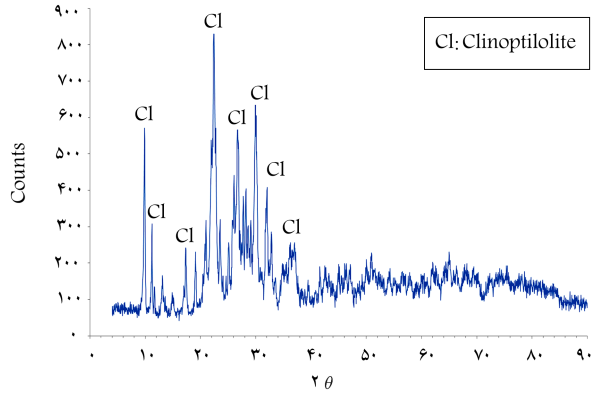
سنگ‌دانه‌ی مورد استفاده در این پروژه‌ی آزمایشگاهی از شرکت متوساک تهیه شده است. ماسه‌ی مصرفی، ماسه‌ی طبیعی شسته و شن مصرفی، شن شکسته با بیشینه‌ی قطر سنگ‌دانه‌ی ۱۹ میلی‌متر است. منحنی دانه‌بندی سنگ‌دانه‌های مورد استفاده (شکل ۱)، در ناحیه‌ی مورد قبول استاندارد ایران برای بیشینه‌ی قطر سنگ‌دانه‌ی ۱۹ میلی‌متر قرار دارد. مشخصات فیزیکی سنگ‌دانه‌ی مصرفی در جدول ۱ ارائه شده است.

۲.۱.۲. سیمان و پوزولان

سیمان استفاده‌شده، سیمان I-۴۲۵ کارخانه‌ی سیمان تهران است. زئولیت (نوع کلینوپتیلولیت) از معدن واقع در ۳۰ کیلومتری شمال سمنان استخراج شده است. خواص مکانیکی سیمان و زئولیت در جدول ۲ و نتایج آزمایش XRF سیمان و زئولیت در جدول ۳ ارائه شده است. نتایج XRD زئولیت در شکل ۲ نشان‌دانه‌بندی



شکل ۱. نمودار منحنی دانه‌بندی سنگدانه.



شکل ۲. نمودار نتایج XRD زئولیت.

جدول ۱. مشخصات فیزیکی سنگ‌دانه.

سنگ‌دانه	جذب آب SSD (٪)	چگالی (kg/m³)	مدول نرمی	بیشینه‌ی قطر سنگ‌دانه
شن	۱٫۹	۲٫۵۴	۴٫۹	۱۹ میلی‌متر
ماسه	۲٫۳	۲٫۵۳		

جدول ۲. خواص مکانیکی سیمان و زئولیت.

نوع مواد	وزن مخصوص (g/cm³)	سطح مخصوص ویژه (cm²/g)	مقدار باقیمانده روی الک (٪)	
			μm۴۵	μm۹۰
سیمان	۳٫۱۵	۳۰۶۰	۲۰	۴٫۲
زئولیت	۱٫۱۹	۱۰۰۰۰	۰	۰

جدول ۳. نتایج آزمایش XRF سیمان و زئولیت.

اجزاء	زئولیت	سیمان تیپ ۱-۴۲۵ تهران
SiO_2	۶۷٫۴۴	۲۳٫۷۳
Al_2O_3	۱۰٫۹	۴٫۸۳
Fe_2O_3	۰٫۸۴	۳٫۱۱
Cao	۱٫۲۴	۵۴٫۹۸
Na_2o	۳٫۷۱	۰٫۲۴
K_2o	۴٫۳۹	۰٫۶۸
Mgo	۰٫۳۳	۳٫۹۲
Tio_2	۰٫۱۹	۰٫۲۶۵
So_3	۰٫۴۷	۶٫۱۸۸
L.O.I	۱۱٫۰۵	۱٫۴۴

با داده شده است، که بیانگر این مطلب است که زئولیت مورد استفاده از نوع کانی کلینوپتیلولیت است.

۳.۱.۲. آب و مواد افزودنی

در ساخت مخلوط‌های بتنی از آب آشامیدنی تهران استفاده شده است. همچنین جهت ثابت نگاه‌داشتن اسلامپ مخلوط‌ها از فوق روان‌کننده‌ی ژلنیم P۱۱۰ استفاده شده است.

۲.۲. طرح اختلاط

در این برنامه‌ی آزمایشگاهی به‌منظور بررسی اثر سیستم‌های عمل‌آوری در خواص بتن‌های حاوی پوزولان زئولیت، ۱۲ طرح اختلاط با مقادیر مختلف پوزولان در نظر گرفته شده است. بدین منظور زئولیت با ۳٪ جایگزینی ۰ و ۱۰ و ۱۵ درصد مورد استفاده قرارگرفته است. انتخاب درصدهای زئولیت براساس مقاومت فشاری

جدول ۴. طرح اختلاط مخلوط‌ها.

کد طرح	نسبت آب به سیمان	زئولیت (٪)	فوق روان‌کننده (٪)	ریزدانه (Kg/m^3)	درشت‌دانه (Kg/m^3)	آب (Kg/m^3)	اسلامپ (cm)
A ۰	۰٫۳۵	۰	۰٫۹۰	۱۱۲۶	۷۵۲	۱۲۲٫۵	۶-۹
A ۱۰	۰٫۳۵	۱۰	۱٫۲۰	۱۱۲۶	۷۵۲	۱۲۲٫۵	۶-۹
A ۱۵	۰٫۳۵	۱۵	۱٫۳۰	۱۱۲۶	۷۵۲	۱۲۲٫۵	۶-۹
B ۰	۰٫۴	۰	۰٫۴۵	۱۰۸۰	۷۲۰	۱۴۰	۶-۹
B ۱۰	۰٫۴	۱۰	۰٫۸۰	۱۰۸۰	۷۲۰	۱۴۰	۶-۹
B ۱۵	۰٫۴	۱۵	۰٫۹۵	۱۰۸۰	۷۲۰	۱۴۰	۶-۹
C ۰	۰٫۴۵	۰	۰٫۳۰	۱۰۵۴	۷۰۲	۱۵۷٫۵	۶-۹
C ۱۰	۰٫۴۵	۱۰	۰٫۵۵	۱۰۵۴	۷۰۲	۱۵۷٫۵	۶-۹
C ۱۵	۰٫۴۵	۱۵	۰٫۶۵	۱۰۵۴	۷۰۲	۱۵۷٫۵	۶-۹
D ۰	۰٫۵	۰	۰٫۰۰	۱۰۲۸	۶۸۷	۱۷۵	۶-۹
D ۱۰	۰٫۵	۱۰	۰٫۲۰	۱۰۲۸	۶۸۷	۱۷۵	۶-۹
D ۱۵	۰٫۵	۱۵	۰٫۳۵	۱۰۲۸	۶۸۷	۱۷۵	۶-۹

ملات‌های ساخته‌شده از زئولیت صورت گرفته است. همچنین مخلوط‌ها با ۴ نسبت آب به سیمان ۰٫۳۵ و ۰٫۴ و ۰٫۴۵ و ۰٫۵ ساخته شده‌اند. تمامی طرح‌ها دارای عیار سیمان (مجموع سیمان و پوزولان) Kg/m^3 ۳۵۰ هستند. در ساخت مخلوط‌های بتنی، اسلامپ مخلوط‌ها توسط فوق روان‌کننده در محدوده‌ی ۹-۶ سانتی‌متر نگاه داشته شده است. مشخصات مخلوط‌ها در جدول ۴ ارائه شده است. دو سیستم عمل‌آوری برای مخلوط‌ها در نظر گرفته شده است: در سیستم اول، نمونه‌ها از روز اول تا سن آزمایش در آب آهک اشباع قرار داده شده‌اند و در سیستم دوم، نمونه‌ها ۷ روز نخست در محلول آب آهک اشباع قرار داده شده و سپس تا سن آزمایش در محیط آزمایشگاه با دمای ۲ ± ۲۵ و رطوبت نسبی ۵۵٪ عمل‌آوری شده‌اند.

۳.۲. روش آزمایش و عمل‌آوری

۱.۳.۲. آزمایش مقاومت فشاری (ISIRI ۳۲۰۶)

مقاومت فشاری نمونه‌ی بتنی می‌تواند نمایانگر روند فعالیت‌های سیمانی و پوزولانی و کیفیت ماتریس سیمانی بتن و پیوستگی آن با سنگ‌دانه‌ها باشد. جهت انجام این آزمایش مطابق استاندارد ایران نمونه‌های مکعبی با ابعاد ۱۰ سانتی‌متر ساخته و بخشی از آنها تا سن عمل‌آوری در محلول آب آهک اشباع نگهداری و بخش دیگری پس از ۷ روز در محیط آزمایشگاه در معرض هوا قرار داده شدند. آزمایش در سنین ۲۸، ۹۰ و ۲۷۰ روز بر روی نمونه‌ها انجام شده است. برای نمونه‌هایی که در محیط آزمایشگاه عمل‌آوری شده بودند، به جهت آنکه شرایط استاندارد آزمایش اشباع با سطح خشک است، نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت پیش از آزمایش در آب قرار داده شدند.

۲.۳.۲. آزمایش جذب موئینگی آب (EN ۴۸۰-۵)

از پارامترهای مهم و تأثیرگذار در نفوذپذیری بتن، مقدار جذب موئینگی است. نمونه‌های بتنی ۱۰ × ۱۰ × ۱۰ سانتی‌متری در محلول آب آهک اشباع و محیط عمل‌آوری‌شده، و در سنین ۲۸، ۹۰ و ۲۷۰ روزگی مورد آزمایش قرار گرفتند. برای انجام آزمایش جذب آب موئینه طبق استاندارد EN ۴۸۰-۵ نمونه‌ها ۱۴ روز پیش از آزمایش در آون با دمای ۵۰ درجه‌ی سانتی‌گراد قرار داده شدند، تا تمامی حفره‌های آنها از آب خالی شود. سپس نمونه‌ها پس از توزین درون ظرف آبی قرار داده شدند، به گونه‌یی که آب به اندازه‌ی ۵ میلی‌متر از کناره‌های نمونه‌ها را در برگیرد؛ ضمن آنکه با کف نمونه تماس کامل داشته باشد. وزن نمونه‌ها پس از ۳، ۶، ۲۴ و ۷۲ ساعت قرارگیری در آب ثبت شد. ضریب جذب موئینگی شاخصی از سرعت جذب سطحی مایع توسط جسم جامد متخلخل است. ضریب جذب موئینگی (S) را می‌توان از رابطه‌ی ۱ محاسبه کرد:

$$\frac{Q}{A} = S.\sqrt{t} \qquad (۱)$$

که در آن، Q میزان آب جذب‌شده‌ی نمونه، از سطح مقطع یکنواخت A در مدت زمان t است. در اینجا، t به دلیل زیادبودن مدت زمان آزمایش، بر حسب ساعت است.

۳.۳.۲. آزمایش مقاومت الکتریکی (FM۵-۵۷۸)

یون‌هایی که به داخل محیط بتن نفوذ کرده‌اند، از میان منافذ موجود در ساختار بتن حرکت می‌کنند. بتن به علت حرکت یون‌ها داخل محیط آن، دارای هدایت الکتریکی است. مقدار مقاومت الکتریکی بتن نسبت مستقیم به نفوذپذیری بتن و شرایط محیطی بتن دارد و مسلماً هر چه نفوذپذیری بتن بیشتر باشد، یون‌ها به راحتی و با سرعت بیشتری می‌توانند به داخل محیط بتن راه یابند. لذا بتن‌هایی که دارای مقاومت الکتریکی زیاد هستند، در برابر نفوذ یون کلراید و شروع خوردگی عملکرد بهتری خواهند داشت.

این آزمایش پارامتری برای ارزیابی میزان نرخ خوردگی احتمالی نمونه‌های بتنی مسلح در حمله‌ی کلرایدی است، که در آن نمونه‌های استوانه‌یی با ابعاد ۱۰ cm × ۲۰ ساخته شدند و در سنین ۲۸، ۹۰ و ۲۷۰ روز مورد آزمایش قرار گرفتند. بخشی از

نمونه‌ها تا سن عمل‌آوری در محلول آب آهک اشباع نگهداری شدند و بخش دیگری پس از ۷ روز در محیط آزمایشگاه در معرض هوا قرار گرفتند. از آنجا که رطوبت پارامتر بسیار مؤثری در این آزمایش است، نمونه‌ها ۲۴ ساعت پیش از آزمایش در داخل آب قرار داده شدند.

۴.۳.۲. آزمایش تسریع شده نفوذ یون کلراید (ASTM C۱۲۰۲)

مهم‌ترین عامل زنگ‌زدگی و خوردگی آرماتور در بتن، وجود یون کلراید است. یون‌های کلراید ممکن است از مصالح آلوده یا مواد افزودنی و یا در اثر نفوذ از منابع خارجی مانند آب دریا وارد بتن شوند. میزان کلراید آزاد در محیط بتن تابع ساختار فیزیکی و به خصوص شیمیایی محیط بتن است.

در این آزمایش مطابق استاندارد ASTM C۱۲۰۲، یک نمونه‌ی بتنی اشباع با استفاده از دستگاه RCPT در معرض یک ولتاژ ۶۰ ولتی جریان مستقیم به مدت ۶ ساعت قرارگرفته است. در یک محفظه از محلول ۳٪ NaCl و در محفظه‌ی دیگر از محلول ۱/۲٪ NaOH استفاده و نهایتاً مجموع بار الکتریکی عبوری اندازه‌گیری شده است.

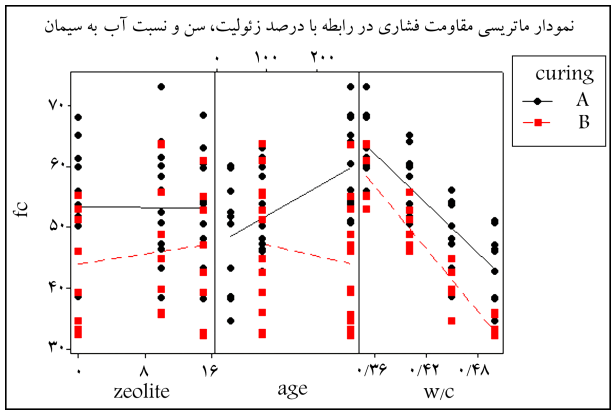
نکته‌ی قابل ذکر اینکه نمونه‌های قابل استفاده در دستگاه RCPT، به صورت استوانه‌های ۱۰ × ۵ سانتی‌متر است و به دلیل نبود قالب‌هایی با این ابعاد، نمونه‌ها در ابعاد ۲۰ × ۱۰ سانتی‌متر ساخته شده‌اند، که این نمونه‌ها نهایتاً جهت استفاده در آزمایش در سن موردنظر به قطعاتی با ارتفاع ۵ سانتی‌متر برش خورده‌اند. این تذکر لازم است که با توجه به حساسیت دستگاه RCPT، لازم است نهایت دقت در برش نمونه‌ها به‌کارگرفته شود. در برش برای آزمایش RCPT بین ۱ تا ۲ سانتی‌متر از ابتدا و انتهای قالب‌ها بریده و کنار گذاشته شده‌اند. پس از عمل‌آوری با هر دو سیستم، عمل‌آوری تا سن ۲۸، ۹۰ و ۲۷۰ روز آزمایش بر روی نمونه‌ها انجام شده است.

۳. نتایج آزمایش و تفسیر

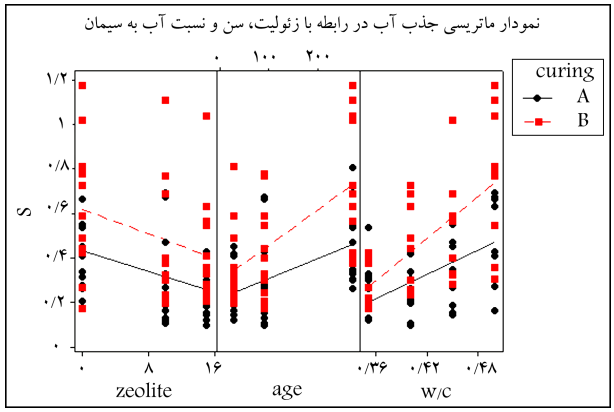
برای تفسیر نتایج و ترسیم نمودارها از نرم‌افزار مینی‌تب استفاده شده است. نمودارهایی که ترسیم شده‌اند، اثر سن، نسبت آب به سیمان و درصد زئولیت را بر روی نتایج آزمایش موردنظر به طور جداگانه، به وضوح نشان می‌دهند. در کلیه‌ی نمودارها دو خط ترسیم شده است، که خط مشکی با کد A بیانگر عمل‌آوری دائما اشباع و خط‌چین قرمز با کد B نشان‌دهنده‌ی عمل‌آوری در محیط آزمایشگاه است. در ادامه، به تفسیر نتایج آزمایش‌ها پرداخته شده است.

۱.۳. مقاومت فشاری

شکل ۳، نتایج مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی ساخته‌شده را نشان می‌دهد. نمودار اول از سمت چپ تغییرات مقاومت فشاری را در برابر درصد زئولیت نشان می‌دهد. همان‌طورکه مشاهده می‌شود، در حالت عمل‌آوری اشباع با افزودن زئولیت مقاومت فشاری تغییر محسوسی نداشته و شیب خط تقریباً ثابت است. و لذا مشاهده می‌شود که مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی زئولیت با نمونه‌ی شاهد برابری می‌کند. در سیستم دوم عمل‌آوری، افزودن زئولیت منجر به افزایش مقاومت فشاری نمونه‌ها شده است. این رشد مقاومت که نسبت به نمونه‌های عمل‌آوری‌شده‌ی مدام در آب چشم‌گیرتر است، حاکی از آن است که واکنش‌های زئولیت حتی بدون تأمین آب از خارج هم در حال انجام است. در حالی که واکنش هیدراسیون سیمان برای انجام‌شدن نیازمند حضور آب است. چنین به نظر می‌رسد که با توجه به آنکه زئولیت جاذب رطوبت



شکل ۳. نمودار نتایج آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی.



شکل ۴. نمودار ضریب جذب موئینگی نمونه‌های بتنی در سنین مختلف، نسبت‌های آب به سیمان مختلف و درصدهای مختلف زئولیت.

است و ساختار سه بعدی دارد، در همان ۷ روز اول عمل‌آوری مرطوب، آب موردنیاز خود را در شبکه‌ی داخلی‌اش محصور کرده و در طول زمان برای انجام واکنش پوزولانی مصرف کرده است و به نوعی خود عمل‌آوری[۱] انجام داده است.

همان‌طورکه انتظار می‌رفت، با افزایش سن نمونه‌ها در حالت عمل‌آوری اشباع مقاومت فشاری افزایش یافته است، در حالی که در حالت عمل‌آوری در محیط، افت مقاومت با افزایش زمان دور از انتظار نیست. این روند درکتاب نویل نیز نشان داده شده است.[۹]

در نمودار سوم و با افزایش نسبت آب به سیمان مقاومت نمونه‌های بتنی کاهش داشته است. در تمام سنین، مقاومت فشاری نمونه‌هایی که دائما در آب عمل‌آوری شده‌اند، بیشتر از نمونه‌های خشک بوده است. چرا که نمونه‌هایی که دائماً در آب بوده‌اند، آب کافی برای انجام واکنش‌های هیدراسیون و پوزولانی در اختیار داشته‌اند و بنابراین میزان حفره‌ها و فضاهای خالی آنها کمتر بوده است و در نتیجه مقاومت بیشتری از خود نشان داده‌اند. همچنین مشاهده می‌شود با افزایش نسبت آب به سیمان، افت مقاومت فشاری در نمونه‌هایی که در محیط آزمایشگاه عمل‌آوری شده‌اند، بیشتر است و این بیانگر آن است که نمونه‌هایی که در محیط آزمایشگاه عمل‌آوری شده‌اند، نسبت به تغییر نسبت آب به سیمان حساس‌تر هستند.

۲.۳. جذب موئینگی آب

نتایج این آزمایش بر روی نمونه‌های بتنی در شکل ۴ نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد در هر دو سیستم عمل‌آوری، جایگزینی زئولیت میزان جذب آب

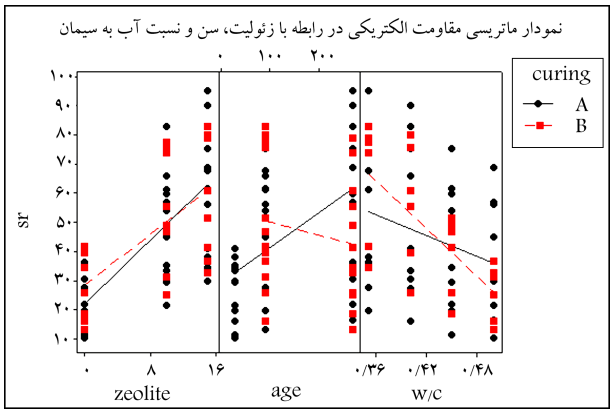
نمونه‌ها را کاهش داده است. دلیل این امر پُرشدن فضاهای خالی و حفره‌های بتن با تشکیل ژل‌های سیلیکاتی ثانویه ناشی از فعالیت پوزولانی است.[۶] کاهش نسبت آب به سیمان نیز با بهبود ریزساختار و کاهش فضاهای خالی منجر به کاهش ضریب جذب موئینه شده است.[۱۰] نتایج نشان می‌دهد نمونه‌هایی که دائماً در آب عمل‌آوری شده‌اند، جذب آب کمتری نسبت به نمونه‌های خشک داشته‌اند. این مسئله در سنین بالاتر و نسبت‌های آب به سیمان مشهودتر بوده است. دلیل این امر از یک طرف عدم تکمیل واکنش‌های هیدراسیون و پوزولانی در حالت عمل‌آوری در محیط آزمایشگاه و از یک سو، ترک‌های موئین در ناحیه‌ی انتقال در اثر جمع‌شدگی ناشی از خشک‌شدن است.

۳.۳. مقاومت الکتریکی

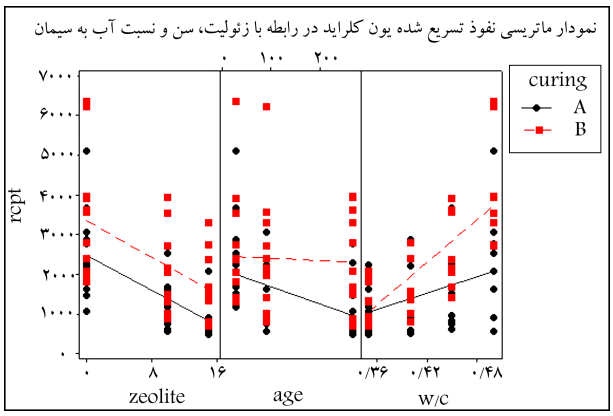
مطابق شکل ۵، افزودن زئولیت در هر دو سیستم عمل‌آوری، تأثیر زیادی در مقاومت الکتریکی داشته و با افزایش درصد آن روند رو به رشد زیادی مشاهده شده است. البته شیب افزایشی نمونه‌هایی که در حالت اشباع عمل‌آوری شده‌اند، بیشتر از نمونه‌های عمل‌آوری‌شده در محیط بوده و این بیان‌گر آن است که عمل‌آوری در محیط، سرعت واکنش‌ها را اندکی کاهش داده است. با افزایش سن نمونه‌ها، نتایج آزمایش مقاومت الکتریکی نیز روندی مشابه با آزمایش مقاومت فشاری را دنبال کرده است و علی‌رغم آنکه در حالت عمل‌آوری مرطوب، رشد مقاومت داشته‌ایم، در حالت عمل‌آوری در محیط با کاهش مقاومت مواجه بوده‌ایم. همان‌طورکه انتظار می‌رفت، مقاومت الکتریکی با افزایش نسبت آب به سیمان، سیری نزولی دنبال کرده است؛ و جالب آنکه شیب نمودار در حالت عمل‌آوری در محیط آزمایشگاه بیشتر است، یعنی اثر نسبت آب به سیمان در حالت عمل‌آوری در محیط چشم‌گیرتر بوده است.

۴.۳. نفوذ تسریع‌شده یون کلراید

نتایج آزمایش نفوذ تسریع‌شده یون کلراید در شکل ۶ مشاهده می‌شود. طبق طبقه‌بندی ارائه‌شده در استاندارد ASTM C۱۲۰۲ (جدول ۵)،[۱۱] می‌توان اظهار داشت که نفوذپذیری نمونه‌های حاوی زئولیت در مقابل یون کلراید در سیستم عمل‌آوری اشباع در سن ۲۸ روزه در محدوده‌ی کم و در سن ۹۰ روزه در محدوده‌ی خیلی کم بوده است. در حالی که نمونه‌های شاهد، نفوذپذیری متوسط و زیادی داشته‌اند. در سیستم عمل‌آوری در محیط آزمایشگاه، نفوذپذیری در نسبت‌های آب به سیمان پایین (۰٫۳۵ و ۰٫۴) در سن ۲۸ روزه در محدوده‌ی کم و در سن ۹۰ روزه در محدوده‌ی خیلی کم قرار داشته است. در نسبت‌های بالاتر آب به سیمان (۰٫۴۵ و ۰٫۵) در سن ۲۸ روزه در محدوده‌ی متوسط قرار داشته است، که با افزایش سن تا ۹۰ روزه میزان نفوذپذیری کاهش یافته است. همچنین در سن ۲۷۰ روزه، میزان نفوذپذیری در هر دو سیستم عمل‌آوری در محدوده‌ی کم و خیلی کم قرار داشته است.



شکل ۵. نتایج آزمایش مقاومت الکتریکی.



شکل ۶. نمودار شار عبوری نمونه‌های بتنی در آزمایش نفوذ تسریع‌شده‌ی یون کلراید.

جدول ۵. طبقه‌بندی نفوذپذیری در مقابل یون کلراید (ASTM C۱۲۰۲).

نفوذپذیری بتن در مقابل یون کلراید	شار الکتریکی عبوری (کولمب)
زیاد	> ۴۰۰۰
متوسط	۲۰۰۰ ~ ۴۰۰۰
کم	۱۰۰۰ ~ ۲۰۰۰
خیلی کم	۱۰۰ ~ ۱۰۰۰
قابل چشم‌پوشی	< ۱۰۰

همان‌طورکه مشاهده می‌شود و در موارد قبلی نیز ذکر شده است، با کاهش نسبت آب به سیمان و افزایش سن نمونه‌ها، میزان شار عبوری و در نتیجه نفوذپذیری بتن در حالت عمل‌آوری اشباع کاهش یافته است. در حالت عمل‌آوری در محیط آزمایشگاه با افزایش سن تغییر چندانی در میزان شار عبوری مشاهده نشده است، لیکن با کاهش نسبت آب به سیمان میزان شار عبوری به شدت کاهش یافته است. کاهش شار عبوری با افزودن زئولیت در هر دو سیستم عمل‌آوری با شیب یکسان اتفاق افتاده است.

۴. نتیجه‌گیری

۱. مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی پوزولان زئولیت در سیستم عمل‌آوری در محیط آزمایشگاه در تمام سنین نسبت به نمونه‌ی شاهد رشد داشته است. این مسئله نشان‌دهنده‌ی آن است که زئولیت به نوعی خودعمل‌آوری انجام داده است. این در حالی است که مقاومت فشاری نمونه‌هایی که به‌صورت اشباع عمل‌آوری شده‌اند، در سنین مختلف با نمونه‌ی شاهد برابری کرده‌اند.

۲. نمونه‌هایی که در محیط آزمایشگاه عمل‌آوری شده‌اند، برخلاف نمونه‌هایی که به‌صورت اشباع عمل‌آوری شده‌اند؛ با افزایش سن، افت مقاومت فشاری و مقاومت الکتریکی را تجربه کرده‌اند.

۳. جایگزینی ۱۵٪ زئولیت، جذب آب موئینه‌ی بتن را در تمام سنین و تمام نسبت‌های آب به سیمان و در هر دو سیستم عمل‌آوری کاهش داده است.

۴. جایگزینی ۱۵٪ زئولیت، میزان شار عبوری یون کلراید را در هر دو سیستم عمل‌آوری به‌طور چشم‌گیری کاهش داده است. از این رو در جلوگیری از خوردگی کلرایدی مؤثر واقع شده است.

۵. نتایج نشان می‌دهد استفاده از زئولیت، نتایج بهتری نسبت به نمونه‌ی شاهد با یک نسبت آب به سیمان پایین‌تر داشته‌اند. به عبارتی می‌توان به جای آنکه نسبت آب به سیمان را کاهش داد، مقداری زئولیت را جایگزین سیمان کرد. این مسئله در تمام آزمایش‌های دوام به وضوح مشاهده شده است.

۶. نسبت‌های بالای آب به سیمان و نمونه‌های حاوی زئولیت نسبت به عمل‌آوری حساس‌تر هستند.

۷. نمونه‌هایی که در محیط آزمایشگاه عمل‌آوری شده‌اند، نسبت به تغییر نسبت آب به سیمان حساس‌تر هستند.

پانوشت

1. self curing

منابع (References)

1. A.A.Ramezanianpour, M. Peydayesh, Concrete Knowledge. Amirkabir University of Iran (in Persain) (2010)
2. Poon, C.S., Lam, U.L., Kou, S.C. and Lin. Z.S. "A study on the hydration rate of natural zeolite blended cement pastes", *Construction and Building Materials,* **13**(8), pp. 427-432 (1999).
3. Chan, S.Y.N. and Ji, X. "Comparative study of the initial surface absorption and chloride diffusion of high performance zeolite, silica fume and PFA concretes", *Cement & Concrete Composites,* **21**(4), pp. 293-300 (1999).
4. Ding, J.-T., Yan, P.-Y.; Liu, S.-L. and Zhu, J.-Q. "Extreme vertices design of concrete with combined mineral admixtures", *Cement and Concrete Research,* **29**(6), pp. 957-960 (1999).
5. Feng, N.Q., Li, G.Z. and Zang, X.W. "High-strength and flowing concrete zeolitic mineral admixtures", *Cement, Concrete and Aggregates,* **12**(2), pp. 61-69 (1990).
6. Ahmadi, B. and Shekarchi, M. "Use of natural zeolite as a supplementary cementitious material", *Cement & Concrete Composites*, **32**(2), pp. 134-141 (2010).
7. Bilim, C. "Properties of cement mortars containing clinoptilolite as a supplementary cementitious material", *Construction and Building Materials*, **25**(8), pp. 3175-3180 (2011).
8. Cenk Karakurt, A. and Ilker Bekir, T. "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**(4), pp. 1789-1795 (2011).
9. Neville, A.M. and Brooks, J. Y "Concrete technology" Pearson Higher Education, (1987).
10. Ramezanianpour, A.A., Ghiasvand, E., Nickseresht, I., Mahdikhani, M. and Moodi, F. "Influence of various amounts of limestone powder on performance of Portland limestone cement concretes", *Cement & Concrete Composites*, **31**(10), pp. 715-720 (2009).
11. Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration. ASTM C 1202.