



بررسی تاثیر مقدار ماده پایه و نسبت آب به مواد سیمانی در نفوذ یون‌های کلراید در بتن ژئوپلیمری حاوی سرباره کوره آهنگدازی

علی اکبر رضانیانپور^{۱*}، فرناز بهمن‌زاده^۱، آرش ذوالفقارنسب^۱، امیرمحمد رضانیانپور^۲

^۱ دانشکده مهندسی عمران و محیط‌زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

^۲ دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران، تهران، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۲ اسفند ۱۳۹۴
بازنگری: ۹ خرداد ۱۳۹۵
پذیرش: ۱۰ خرداد ۱۳۹۵
ارائه آنلاین: ۱۵ آبان ۱۳۹۵

کلمات کلیدی:

بتن‌های ژئوپلیمری
سرباره کوره آهنگدازی
مقاومت فشاری
دوام
نفوذ یون‌های کلراید

چکیده: از آن جایی که در جریان فرآیند تولید سیمان مقدار نسبتاً زیادی گاز دی‌اکسید کربن آزاد می‌شود و با توجه به این که این گاز یکی از آلاینده‌های اصلی محیط زیست و از جمله گازهای گلخانه‌ای به حساب می‌آید، پیدا کردن جایگزین مناسب برای سیمان در ساخت بتن موضوعی پراهمیت است. استفاده از بتن‌های ژئوپلیمری از جمله راهکارهای نوین مطرح شده به عنوان جایگزینی برای بتن‌های معمولی با سیمان پرتلند می‌باشد. در واقع در ساختار این دسته از بتن‌ها سیمان به عنوان ترکیب اصلی محسوب نمی‌شود و آن چه ترکیب آن‌ها را تشکیل می‌دهد، دو بخش اصلی ماده پایه و ماده فعالساز است. در این تحقیق سرباره کوره آهنگدازی به عنوان ماده پایه و دو محلول پتاسیم هیدروکسید با غلظت ۶ مولار و سدیم سیلیکات (آب شیشه) با مدول سیلیکاتی ۲/۳۳ به عنوان مواد فعالساز مورد استفاده قرار گرفته‌اند. برای ارزیابی این نوع بتن ۵ طرح اختلاط بتن ژئوپلیمری با هدف شناخت تاثیر مقدار ماده پایه (سرباره) و هم‌چنین اثر آب به مواد سیمانی انتخاب شده‌اند. یک طرح اختلاط بتن معمولی با سیمان پرتلند نیز برای مقایسه این دو نوع بتن در نظر گرفته شده‌است.

در این تحقیق، خواص بتن تازه با استفاده از آزمایش افت اسلامپ و خواص مکانیکی بتن سخت شده از طریق اندازه‌گیری مقاومت فشاری در سنین ۷، ۲۸، ۹۰ و ۱۸۰ روز ارزیابی گردیده‌است. هم‌چنین نفوذپذیری بتن‌ها به وسیله آزمایش جذب موئینه آب در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه اندازه‌گیری شده‌است. آزمایش‌های مقاومت الکتریکی، مهاجرت تسریع شده یون‌های کلراید و تعیین ضریب انتشار با استفاده از پروفیل نفوذ یون‌های کلراید برای بررسی دوام این نوع بتن‌ها در برابر نفوذ یون‌های کلراید به کار گرفته شده‌اند.

براساس نتایج عملکرد بتن‌های ژئوپلیمری در برابر تغییرات ماده پایه و نسبت آب به مواد سیمانی نسبتاً مشابه بتن‌های معمولی می‌باشد. از سوی دیگر از مقایسه این دو نوع بتن مشاهده می‌شود که بتن‌های ژئوپلیمری مقاومت و دوام نسبتاً بهتری نسبت به بتن‌های معمولی با سیمان پرتلند را دارا می‌باشند.

با سایر مواد انجام داده‌اند.

۱- مقدمه

بر اساس تحقیقات، استفاده از مواد با خاصیت سیمانی به عنوان درصدی از سیمان در ترکیب بتن می‌تواند نتایج مطلوبی از جمله افزایش مقاومت نهایی، بهبود کارائی و دوام بهتر را به همراه داشته باشد [۱-۳]. در حقیقت مواد با خاصیت سیمانی محصول اصلی صنایع نیستند. این مواد محصولات جانبی صنایع بوده و یا این که از طبیعت به دست می‌آیند (پوزولان‌های طبیعی). بنابراین با مصرف این گونه مواد در ساختار بتن بخشی از آلودگی‌ها که ناشی از تولید سیمان بوده‌است، کاهش می‌یابد. پیشرفت مسائل مربوط به توسعه پایدار و اهمیت دوام سازه‌ها از سوی دیگر موجب می‌شود که استفاده از این گونه مواد در داخل بتن رواج پیدا کند.

یکی دیگر از راهکارهای نوینی که به تازگی مطرح شده، استفاده از بتن‌های ژئوپلیمری با مزایای محیط‌زیستی و ویژگی‌های مطلوب می‌باشد. این دسته از مصالح ساختمانی موادی در ساختارشان سیمان به عنوان ترکیب اصلی نیست. در واقع دو بخش ماده پایه و ماده فعالساز ساختار این نوع بتن‌ها را تشکیل می‌دهد. ماده پایه در حقیقت ترکیبات آلومینوسیلیکاتی است و به

امروزه افزایش آلاینده‌های زیست‌محیطی از جمله نگرانی‌هایی به حساب می‌آید که توجه همگان را به خود جلب کرده‌است. محققین در زمینه‌های مختلف در پی یافتن راهکارهای مناسب برای کاهش این آلاینده‌ها هستند. آلودگی هوا از پر اهمیت‌ترین مخاطرات محیط زیست بوده که عوامل مختلفی بر روی آن تاثیر می‌گذارند. اما یکی از آلوده‌کننده‌ترین صنایع به لحاظ تولید حجم بالای گاز کربن دی‌اکسید، صنعت تولید سیمان به عنوان اصلی‌ترین ترکیب در ساختار بتن می‌باشد. گاز کربن دی‌اکسید یکی از گازهای گلخانه‌ای است که موجب گرم‌تر شدن کره زمین شده و در کاهش تابش نور خورشید به زمین نقش به‌سزایی دارد و از مهم‌ترین آلاینده‌های هوا محسوب می‌شود. از سوی دیگر، در جریان تولید سیمان مقدار نسبتاً زیادی انرژی مورد استفاده قرار می‌گیرد. بنابراین محققین در زمینه بتن و مصالح ساختمانی نیز تحقیقاتی در زمینه جایگزین کردن سیمان

*نویسنده عهده‌دار مکاتبات: aaramce@aut.ac.com

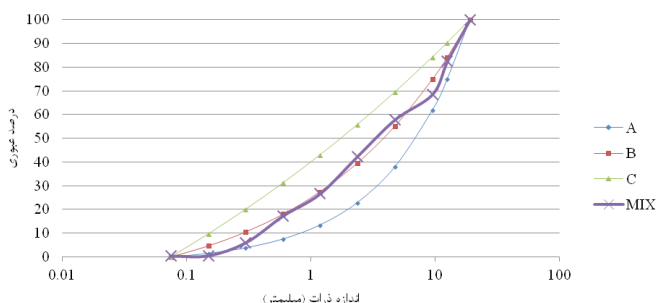
یک لایه اکسید نازک روی سطح میلگرد تشکیل شود و مانع از حل شدن آهن گردد و بدین صورت از خوردگی حتی در حضور رطوبت و اکسیژن جلوگیری می‌نماید. این لایه حفاظتی، لایه منفعل نام دارد. در صورتی که تحت عواملی میزان قلیائیت بتن از حدی کاهش یابد، این لایه تشکیل نمی‌گردد و آسیب‌پذیری بتن مسلح در برابر خوردگی افزایش پیدا می‌کند. نفوذ یون‌های کلراید یکی از عواملی است که موجب کاهش قلیائیت بتن می‌شود [۸]. برای فعال شدن آرماتور برای خوردگی، غلظت یون‌های کلراید باید از حد مشخصی تجاوز کند. این مقدار حدی را حد بحرانی یا حد آستانه می‌نامند [۹]. لازم به ذکر است که تنها کلرایدهای آزاد هستند که فعال شدن آرماتور را به همراه دارند [۱۰].

از آنجایی که تعداد پژوهش‌های انجام شده در زمینه دوام بتن‌های ژئوپلیمری در برابر نفوذ یون‌های کلراید اندک است، در این مقاله یکی از اهداف اصلی شناخت و بررسی این پدیده در بتن‌های ژئوپلیمری حاوی سرباره می‌باشد. در واقع با به کارگیری مقادیر مختلف سرباره و همچنین نسبت‌های متفاوت آب به مواد سیمانی، تاثیر هر یک از این مشخصه‌ها بر روی ویژگی‌های بتن سخت شده از لحاظ دوام در برابر نفوذ یون‌های کلراید و همچنین مشخصات مکانیکی بررسی شده است.

۲- مواد و مصالح

همان‌طور که ذکر شد، سرباره کوره آهنگدازی اصفهان به عنوان ماده پایه در ساخت بتن‌های ژئوپلیمری و سیمان پرتلند نوع ۱ کردستان برای ساخت بتن معمولی به کار گرفته شده است. مشخصات فیزیکی و شیمیایی این دو نوع مصالح در جدول ۱ و جدول ۲ مشاهده می‌شود.

سنگدانه مورد استفاده در این تحقیق در دو رده ریزدانه و درشت دانه با مشخصات مندرج در جدول ۳ و نمودار دانه‌بندی موجود در شکل ۱ تقسیم بندی می‌شوند. در این نمودار ناحیه بین منحنی‌های A و B مربوط به حدود ریز و ناحیه بین منحنی‌های B و C مربوط به حدود درشت در دانه‌بندی پیشنهادی طرح ملی مخلوط بتن می‌باشد.



شکل ۱: نمودار دانه‌بندی مصالح سنگی

Fig. 1. Gradation Curve of Aggregate

همین جهت از آنجایی که پوزولان‌های طبیعی و مصنوعی منابعی غنی از این‌گونه ترکیبات هستند، می‌توانند به عنوان ماده پایه به کار روند. انواع پوزولان‌ها در تحقیقات توسط محققین متفاوت به عنوان ماده پایه به کار رفته‌اند. بر اساس تعاریف ماده فعالساز نیز به محلولی با خاصیت قلیایی اطلاق می‌شود که موجب انحلال یون‌های آلومینیوم و سیلیسیم موجود در ماده پایه شده و با انجام واکنش، ترکیب خمیر ژئوپلیمری را تشکیل می‌دهد. محلول‌های سدیم هیدروکسید، پتاسیم هیدروکسید، سدیم سیلیکات و سدیم کربنات از مهم‌ترین محلول‌های فعالساز در تحقیقات به‌شمار می‌روند [۴].

در تحقیق پیش‌رو، سرباره کوره آهنگدازی اصفهان با استفاده از دو محلول قلیایی پتاسیم هیدروکسید و سدیم سیلیکات فعال شده و ترکیب خمیر ژئوپلیمری را تشکیل داده است. بر اساس نتایج پژوهش‌هایی که در گذشته در خصوص بتن‌های ژئوپلیمری بر پایه سرباره انجام شده، این دسته از بتن‌ها مقاومت فشاری بالا، میزات حرارت آزاد شده کم‌تر، دوام مطلوب در برابر حملات شیمیایی، مقاومت مناسب در برابر ذوب و یخ و نفوذپذیری کم‌تری نسبت به بتن معمولی دارند [۵-۷]. در کنار آسیب‌های کم‌تر محیط‌زیستی، وجود مزایای یاد شده می‌تواند توجه مناسبی برای بهره‌گیری از این نوع بتن‌ها باشد. اما این دسته از بتن‌ها عاری از معایب اجرایی نیستند. به صورت کلی این نوع بتن‌ها عموماً به سرعت کارایی خود را از دست می‌دهند. همچنین به علت اندرکنش پارامترهای مختلف و تاثیر آن‌ها بر خواص بتن ژئوپلیمری امکان پیش‌بینی مقاومت‌نهایی به سهولت بتن معمولی با سیمان پرتلند نمی‌باشد. جمع‌شدگی زیاد، ایجاد شوره در سطح و واکنش قلیایی سنگدانه از دیگر معایب این نوع بتن‌ها است [۷].

یکی از مهم‌ترین مسائلی که دوام سازه‌های بتنی به ویژه سازه‌های مجاور دریا را تهدید می‌کند، خوردگی آرماتورهای مدفون در بتن ناشی از نفوذ یون‌های کلراید است. آرماتورها در داخل بتن به وسیله دو عامل فیزیکی و شیمیایی محافظت می‌گردند. عامل فیزیکی که همان پوشش بتنی روی آرماتور و ویژگی‌های آن است و محافظت شیمیایی به این صورت بوده که محیط قلیایی بتن با pH بالا (در حدود ۱۲ تا ۱۳) باعث می‌شود که

جدول ۱: مشخصات فیزیکی مواد سیمانی

Table 1. Physical Properties of Cementitious Materials

نام ماده سیمانی		نام مشخصه
سرباره	سیمان	وزن مخصوص (g/cm ³)
۲/۷۹	۳/۰۲	
۳۳۸۳	۳۰۳۵	بلین (cm ² /g)
۱۶/۶۱	۱۳/۷۲	عبوری از الک ۴۵ میکرون (%)

جدول ۲: مشخصات شیمیایی مواد سیمانی

Table 2. Chemical Properties of Cementitious Materials

درصد جرمی											نام مصالح
L.O.I	MnO	TiO ₂	K ₂ O	Na ₂ O	MgO	SO ₃	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	
۰/۰۲	۰/۹۹	۱/۲۳	۰/۷	۰/۶۱	۸/۵۲	۰/۹۷	۱/۰۱	۱۱/۵۶	۳۷/۲۱	۳۶/۷۵	سرباره
۰/۹۴	-	-	۰/۳	۰/۵۳	۱/۳۵	۱/۸۹	۳/۷۲	۵/۸۹	۲۱/۵۵	۶۳/۷۸	سیمان

جدول ۴: مشخصات فوق روان کننده

Table 4. Super Plasticizer Properties

نام مشخصه	توضیحات
ترکیب شیمیایی	پلی کربوکسیلات اثر اصلاح شده
طبیعت یونی	آنیونی
رنگ	سبز تیره
حالت فیزیکی	مایع
وزن مخصوص	kg/L ۱/۱
کلراید	Max 500 PPM
میزان مصرف	۰/۲ - ۱/۶٪ نسبت به وزن مواد سیمانی

جدول ۳: مشخصات مصالح سنگی

Table 3. Aggregates Properties

نوع سنگدانه			مشخصات
شن	شن ریز	ماسه	
۲/۲	۲/۴	۲/۹	درصد جذب آب
۲۵۹۰	۲۵۵۰	۲۵۶۰	چگالی در حالت SSD kg/m ³
۱۹	۱۲/۵	۶	حداکثر اندازه سنگدانه (mm)
شکسته	شکسته	رودخانه‌ای	شکستگی
۰/۱۶	۰/۲۴	۰/۶	نسبت وزنی

۳- نسبت‌های اختلاط

در این مقاله ۵ طرح اختلاط بتن ژئوپلیمری با هدف ارزیابی تاثیر مقدار ماده پایه (سرباره) و نسبت آب ۳۰۰، S350 و S400 با مقادیر مختلف سرباره برای بررسی اثر مقدار ماده پایه ساخته شده‌اند. طرح S400 با توجه به کارایی بهتر و همچنین داشتن مقاومت ۷ روزه بالاتر، به عنوان طرح شاهد انتخاب گردید. بنابراین سه طرح S400، w/b ۰/۳۵ و w/b ۰/۴۵ سه طرحی هستند که در آن‌ها مقادیر متفاوت آب به مواد سیمانی به منظور بررسی تاثیر این پارامتر به کار رفته‌اند. لازم به ذکر است منظور از نسبت آب به مواد سیمانی در طرح‌های بتن ژئوپلیمری نسبت مجموع آب آزاد و آب موجود در محلول‌های پتاسیم هیدروکسید و سدیم سیلیکات به مجموع مقدار ماده پایه و مقدار ماده جامد دو محلول پتاسیم هیدروکسید و سدیم سیلیکات می‌باشد. طرح OPC نیز مربوط به بتن معمولی با سیمان پرتلند است و با طرح شاهد مقایسه می‌شود. در جدول ۵ جزئیات طرح‌های اختلاط قابل مشاهده است.

برای ساخت بتن‌های ژئوپلیمری از دو محلول پتاسیم هیدروکسید (KOH) با غلظت ۶ مولار که ۲۴ ساعت پیش از استفاده از ترکیب آب مقطر و پتاسیم هیدروکسید جامد تهیه می‌گشت، و محلول سدیم سیلیکات با مدول سیلیکاتی (نسبت SiO₂ به Na₂O) ۲/۳۳ استفاده شده‌است.

هم‌چنین بر اساس ساخت‌های اولیه بتن‌های ژئوپلیمری سرباره‌ای و با توجه به این که این بتن‌ها به سرعت کارایی خود را از دست می‌دادند، بهره‌گیری از فوق روان کننده به عنوان یک راه‌حل برای تسهیل قالب‌گیری بتن‌های ژئوپلیمری مطرح شد. از آنجایی که در نمونه‌های اولیه که با استفاده از فوق روان کننده کاهش مقاومت فشاری رخ نداد، در طرح‌های اصلی این تحقیق از این ماده برای بهبود کارایی استفاده شد. مشخصات فوق روان کننده مصرفی در جدول ۴ درج شده‌است.

جدول ۵: مشخصات طرح اختلاط بتنی

Table 5. Mixture Proportions

نام طرح	w/b	سرباره (kg/m ³)	سیمان (kg/m ³)	نسبت مواد جامد محلول های فعال ساز به سرباره	نسبت مواد جامد محلول آب شیشه به مواد جامد محلول KOH	فوق روان کننده (% وزن سرباره)
S300	۰/۴	۳۰۰	۰	۰/۱۵	۰/۶	۱
S350	۰/۴	۳۵۰	۰	۰/۱۵	۰/۶	۱
S400	۰/۴	۴۰۰	۰	۰/۱۵	۰/۶	۱
w/b0.35	۰/۳۵	۴۰۰	۰	۰/۱۵	۰/۶	۱
w/b0.45	۰/۴۵	۴۰۰	۰	۰/۱۵	۰/۶	۱
OPC	۰/۴	۰	۴۶۲	۰	۰	۰

۴- روش ساخت و عمل آوری

ساخت مخلوط های بتنی در داخل پن میکسر با ظرفیت ۶۰ لیتر موجود در آزمایشگاه بتن دانشگاه صنعتی امیرکبیر صورت پذیرفته است. ابتدا مواد خشک شامل سرباره، ریزدانه و درشت دانه با هم در میکسر مخلوط می شوند. سپس KOH را افزوده و به مدت ۳۰ ثانیه اختلاط انجام می گردد. پس از کندن کف میکسر آب شیشه و آب اضافه شده و اختلاط به مدت ۲ دقیقه و ۳۰ ثانیه ادامه می یابد. پس از اختلاط و انجام آزمایش بتن تازه، قالب گیری در داخل قالب های از پیش روغن زده شده، صورت می پذیرد و عمل آوری آغاز می شود. به این منظور پس از قالب گیری نمونه ها، قالب ها در زیر گونی خیس عمل آوری شده و پس از ۲۴ ساعت نمونه ها از قالب خارج می گردد. برای نگهداری نمونه های بتن ژئوپلیمری پس از خروج از قالب از عمل آوری نمونه ها داخل آب تا سن مربوط به آزمایش استفاده شده است. در واقع براساس تحقیقات انجام شده در خصوص بتن های ژئوپلیمری سرباره ای، نمونه هایی که در داخل آب قرار می گیرند نسبت به نمونه هایی که در هوا عمل آوری می شوند، تخلخل کمتر و مقاومت فشاری بیشتری از خود نشان می دهند [۱۱ و ۱۲]. از این رو در تحقیق پیش رو برای عمل آوری نمونه های بتن ژئوپلیمری از آب بهره برده شده است.

۵- روش های انجام آزمایش

در ادامه به شرح روش انجام هر یک از آزمایش های انجام شده و سنین انجام آزمایش پرداخته شده است.

۵-۱- آزمایش افت اسلامپ

در این تحقیق برای بررسی ویژگی های بتن های ژئوپلیمری در حالت تازه، افت اسلامپ بر حسب زمان اندازه گیری شده است [۱۳]. لازم به ذکر است انجام این آزمایش برای کنترل کارائی تا زمان رسیدن به اسلامپ برابر صفر ادامه می یابد.

۵-۲- آزمایش مقاومت فشاری

معمول ترین آزمایش برای ارزیابی خواص مکانیکی بتن سخت شده و ملات های بتنی، آزمایش مقاومت فشاری می باشد. از آن جایی که از هر بتنی یک مقاومت حداقل انتظار می رود، لذا این آزمایش مهم و اساسی به شمار می رود. در واقع، مقاومت فشاری نمونه ی بتنی می تواند شمای کلی از کیفیت بتن را نشان دهد.

به منظور انجام این آزمایش نمونه های مکعبی ۱۰ سانتی متری تهیه گردیده است. این آزمایش در بتن های ژئوپلیمری حاوی سرباره در سنین ۱، ۷، ۲۸، ۹۰ و ۱۸۰ روز و در نمونه ها بتن معمولی در سنین ۷، ۲۸، ۹۰ و ۱۸۰ روز انجام پذیرفت.

۵-۳- آزمایش جذب موئینگی آب

یکی از روش هایی که آب به داخل بتن نفوذ پیدا می کند، جذب توسط لوله های موئینه می باشد. آزمایش جذب موئینه آب می تواند تصویری از میزان فضاهای موئینه نمونه های بتنی، شکل و پیوستگی آن ها را ارائه دهد. در واقع با استفاده از مقدار آب جذب شده و مقدار بالآمدگی آب می توان به این برداشتها دست پیدا کرد.

برای اندازه گیری میزان جذب موئین از نمونه های مکعبی ۱۰ سانتی متری استفاده گردیده و به منظور انجام آزمایش مطابق استاندارد EN480-5 عمل شده است [۱۴]. در واقع در نمونه های بتنی در سنین مربوط به آزمایش از داخل آب خارج شده و در داخل آون با دمای ۵۰ درجه سانتی گراد به مدت ۱۴ روز نگهداری می شوند. سپس نمونه ها پس از توزین درون ظرف آبی قرار داده شده، به گونه ای که سطح آب به اندازه 5 ± 1 mm از تراز کف نمونه ها بالاتر باشد، ضمن آنکه آب با کف نمونه در تماس کامل قرار گیرد. وزن نمونه ها پس از ۳، ۶، ۲۴ و ۷۲ ساعت قرارگیری در آب، خوانده می شود. میزان جذب موئینه آب برای نمونه های بتن ژئوپلیمری در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه و برای نمونه های بتن معمولی با سیمان پرتلند در سنین ۲۸ و ۹۰ روزه

اندازه‌گیری شده‌است.

۶- نتایج

نتایج هر یک از آزمایش‌ها در ادامه آمده است.

۵-۴- آزمایش مقاومت الکتریکی

مقاومت الکتریکی نمونه‌های استوانه‌ای 10×20 cm با استفاده از روش ونر و مطابق دستورالعمل FM 5-578 اندازه گرفته شده‌است [۱۵]. این آزمایش در سنین ۲۸، ۵۶ و ۹۰ روزه انجام پذیرفت.

۵-۵- آزمایش مهاجرت تسریع شده یون‌های کلراید (RCMT)

یکی از آزمایش‌هایی که به صورت گسترده برای اندازه‌گیری ضریب انتشار یون‌های کلراید به کار می‌رود، آزمایش مهاجرت تسریع شده یون‌های کلراید است. این آزمایش بر اساس استاندارد NT BUILD 492 انجام می‌گردد [۱۶]. برای انجام این آزمایش در هر سن یک نمونه استوانه‌ای 10×20 cm که به صورت ۳ مقطع استوانه‌ای 10×5 cm بریده می‌شود، مورد استفاده قرار می‌گیرد. این آزمایش در سنین ۷، ۲۸، ۹۰ و ۱۸۰ روزه انجام شده‌است.

۵-۶- آزمایش تعیین ضریب انتشار براساس پروفیل نفوذ یون‌های کلراید

با توجه به این که آزمایش RCMT یک راه غیر مستقیم برای اندازه‌گیری نفوذ یون‌های کلراید است، در این تحقیق روش حوضچه نمک (Salt ponding) به عنوان یک روش مستقیم برای تعیین پروفیل نفوذ یون‌های کلراید و ضریب انتشار مطابق استاندارد NT build 443 به کار گرفته شده‌است [۱۷].

برای انجام این آزمایش نمونه‌های مکعبی 15 cm مورد استفاده قرار گرفته‌اند. مشابه آزمایش تعیین عمق نفوذ یون کلراید در اینجا نیز نمونه‌ها ۱۰ روز پس از هر سن آزمایش از آب خارج شده و پس از خشک شدن تمام وجوه آن به جز یک وجه با رنگ اپوکسی پوشانده می‌شوند. بعد از خشک شدن اپوکسی، نمونه‌ها مجدداً به داخل آب باز گردانده شده و پس از ۱۰ روز که وزن آن به حالت تقریباً ثابت رسید، نمونه‌ها به داخل حوضچه نمک با غلظت 165 گرم بر لیتر منتقل می‌گردند. بعد از گذشت ۴۲ روز (۶ هفته) از زمان ورود به داخل محلول آب نمک، نمونه‌ها را خارج کرده و پس از خشک شدن نمونه‌ها تقریباً از هر 2 میلی‌متر از آن‌ها پودر تهیه می‌شود. مقدار این پودر بایستی حداقل برابر 10 گرم باشد.

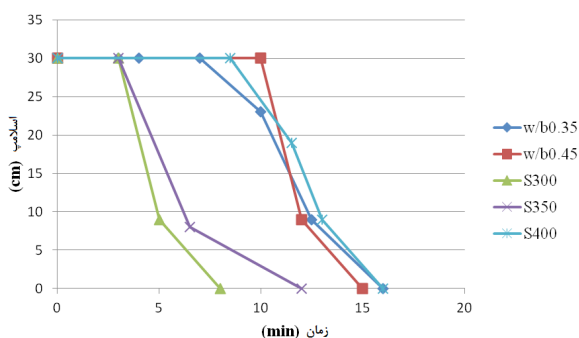
پس از تهیه پودرها مطابق استاندارد، برای آماده‌سازی محلول برای تعیین غلظت یون‌های کلراید در هر عمق مشابه استاندارد ASTM C114 عمل می‌شود. نتایج بدست آمده در هر عمق را بر حسب عمق متوسط به صورت ورودی به نرم‌افزار MATLAB داده شده و معادله دیفرانسیل حل شده فیک بر نتایج برازش داده می‌شود و مقدار ضریب انتشار ظاهری به دست می‌آید. این آزمایش در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه برای بتن‌های ژئوپلیمری انجام شده‌است.

۶-۱- آزمایش افت اسلامپ

به صورت کلی، براساس نتایج این آزمایش بتن ژئوپلیمری حاوی سرباره ترکیبی چسبنده با ویسکوزیته بالا و کارایی کم است. در شکل ۲ نمودار افت اسلامپ بر حسب زمان مشاهده می‌شود. همانطور که مشخص است در بتن ژئوپلیمری ابتدا مخلوط بصورت مایع روان بدون جداشدگی قابل توجه بوده و پس از اختلاط مناسب و آغاز واکنش بین ماده پایه و مواد فعالساز روند گیرش شروع می‌شود. لذا اسلامپ این نوع بتن‌ها در ابتدای اختلاط برابر 30 cm (ریزشی) می‌باشد.

مطابق نتایج به دست آمده با افزایش میزان ماده پایه، افت اسلامپ کاهش می‌یابد به طوری که طرح S400 در مقایسه با طرح‌های S300 و S350 به ترتیب حدود ۳ و $2/85$ برابر بیشتر در بازه سیال بوده و زمان رسیدن به اسلامپ صفر حدود ۲ و $1/3$ برابر می‌باشد. دلیل این امر می‌تواند مشابه بتن معمولی بوده باشد. یعنی با افزایش مقدار ماده پایه، مقدار سنگدانه نسبت به خمیر کاهش می‌یابد. از سوی دیگر با کاهش مقدار خمیر واکنش ژئوپلیمری سریع‌تر انجام شده و کارایی سریع‌تر افت پیدا می‌کند.

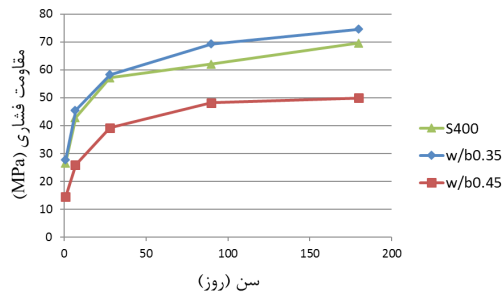
با افزایش نسبت آب به مواد سیمانی، مدت زمان ماندن مخلوط در محدوده اسلامپ ریزشی بیشتر می‌شود. علت این امر می‌تواند به خاطر بیش تر شدن آب و کاهش غلظت محلول قلیایی باشد که این امر موجب می‌شود که واکنش ژئوپلیمری به تعویق بیفتد. البته با توجه به این که این مقادیر به نسبت کمی تغییر کرده‌اند، این تغییر چندان فاحش نمی‌باشد. علاوه بر این، زمان رسیدن به اسلامپ صفر در این سه طرح چندان متفاوت نیست که نشان می‌دهد تغییر نسبت آب به مواد سیمانی تأثیر چندان در کارایی ندارد.



شکل ۲: نتایج آزمایش افت اسلامپ

Fig. 2. Slump Loss Test Results

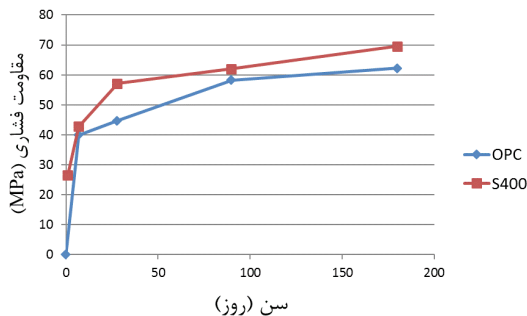
بیانگر مشابهت روند تغییر مقاومت در بتن ژئوپلیمری و بتن معمولی ساخته شده با سیمان پرتلند است.



شکل ۵: تاثیر مقدار آب به مواد سیمانی بر مقاومت فشاری

Fig. 5. Effect of Water to Binder Ratio on Compressive Strength

همچنین در شکل ۶ طرح شاهد بتن ژئوپلیمری (S400) و بتن معمولی با هم مقایسه شده‌اند. براساس این نتایج بتن ژئوپلیمری حاوی سرباره در تمامی سنین مقاومت فشاری بیشتری نسبت به بتن معمولی را داراست. برای نمونه پس از ۲۸ و ۱۸۰ روز عمل‌آوری، مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری به ترتیب ۳۴ و ۱۵ درصد بیشتر از بتن معمولی می‌باشد.



شکل ۶: مقایسه مقاومت فشاری بتن معمولی و بتن ژئوپلیمری

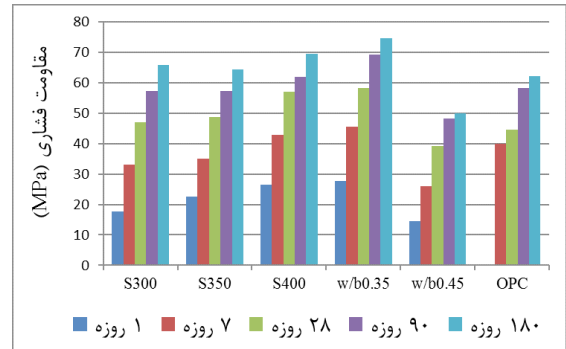
Fig. 6. Comparison Between Compressive Strengths of Ordinary Concrete and Alkali Activated Concrete

۶-۳- آزمایش جذب موئینگی آب

با توجه به نتایج آزمایش جذب موئینگی آب (شکل ۷)، این آزمایش نتایج دقیقی برای تاثیر تغییر مقدار ماده پایه نشان نمی‌دهد. در واقع روند ثابت و مورد انتظار در سنین مختلف مشاهده نمی‌شود. علت این امر می‌تواند مربوط به خطای این آزمایش برای این نوع بتن‌ها به علت ایجاد ریزترک‌ها بر اثر قرارگیری نمونه‌ها در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد در سطح بتن باشد. نتایج این آزمایش در بررسی تاثیر نسبت آب به سیمان مطابق انتظار و مشابه آن چه در بتن معمولی رخ می‌دهد. در حقیقت با کاهش نسبت آب مواد سیمانی به میزان ۰/۱ و ۰/۰۵، مقدار آب جذب شده در نمونه‌های عمل‌آوری

۶-۲- آزمایش مقاومت فشاری

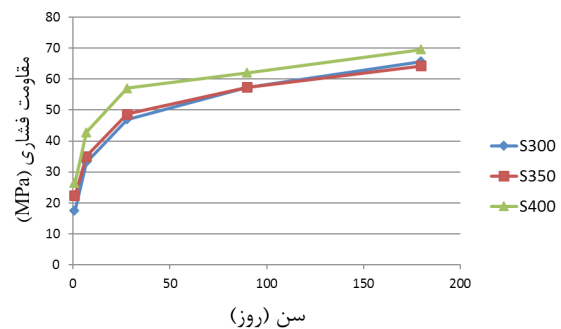
نتایج مقاومت فشاری نمونه‌ها در شکل ۳ آورده شده است. براساس این شکل، طرح w/b0.35 دارای بیشترین مقدار مقاومت فشاری در همه سنین در میان طرح‌های بتن ژئوپلیمری مورد بررسی می‌باشد. هم‌چنین کم‌ترین نتایج مقاومت فشاری مربوط به طرح w/b0.45 است.



شکل ۳: نتایج آزمایش مقاومت فشاری

Fig. 3. Compressive Strength Test Results

روند تاثیر مقدار ماده پایه بر مقاومت فشاری در شکل ۴ مشاهده می‌شود. مطابق آن چه نشان داده شده است، دو طرح S350 و S300 تفاوت چندانی در مقدار مقاومت فشاری در سنین مختلف ندارند. اما طرح S400 با بیشترین مقدار ماده پایه در تمامی سنین مقاومت فشاری بالاتری (حدوداً ۱۲ درصد بیشتر پس از ۱۸۰ روز عمل‌آوری) نسبت به دو طرح فوق دارد. براساس نتایج، روند تغییرات در سنین مختلف برای هر سه طرح به یک صورت می‌باشد و نمودارها با تغییرات بر اساس سن در بتن معمولی هم‌خوانی دارد.



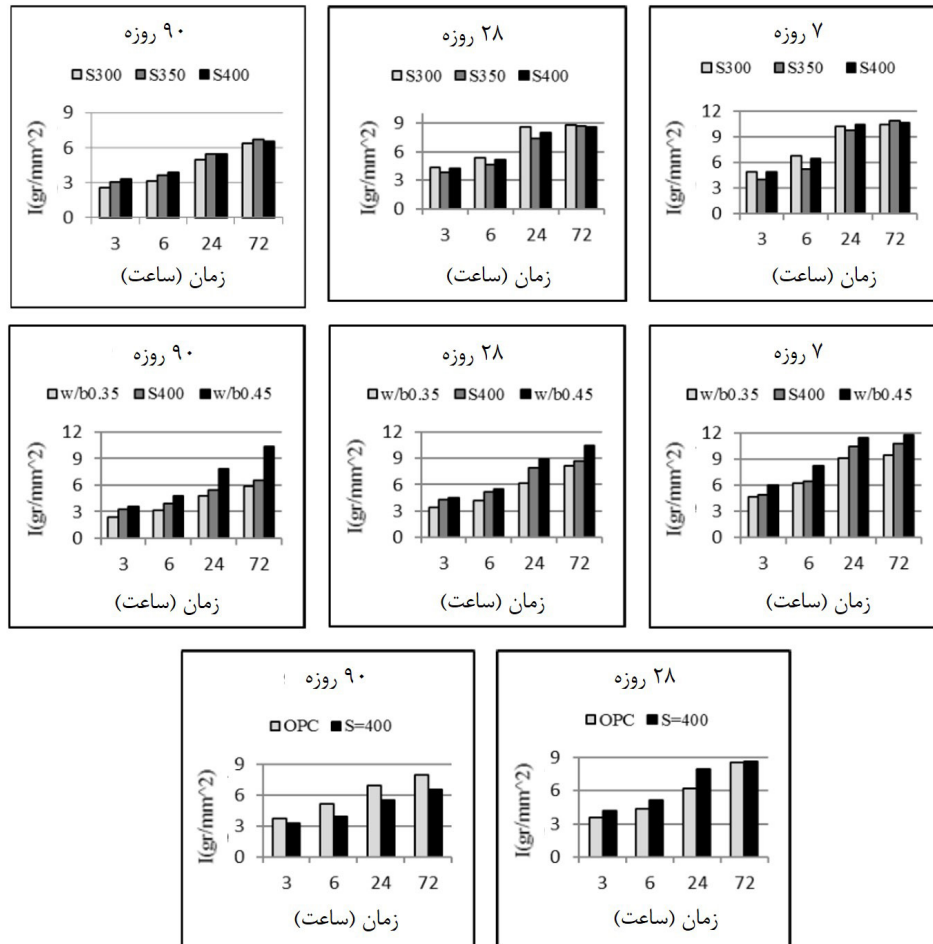
شکل ۴: تاثیر مقدار ماده پایه بر مقاومت فشاری

Fig. 4. Effect of Base Material Content on Compressive Strength

با بررسی تاثیر مقدار آب به مواد سیمانی (شکل ۵) مشاهده می‌شود که هرچه نسبت آب به مواد سیمانی افزایش پیدا می‌کند، مقاومت فشاری کم‌تر می‌گردد. کاهش ۲۹ و افزایش ۶ درصدی مقاومت فشاری پس از ۱۸۰ روز عمل‌آوری برای طرح‌های w/b0.45 و w/b0.35 در مقایسه با طرح شاهد

درصد) اما در سن بالاتر، بتن ژئوپلیمری به لحاظ کم‌تر بودن میزان جذب موئینگی (حدود ۲۲ درصد) عملکرد بهتری را از خود نشان داده‌است. لازم به ذکر است که بتن ژئوپلیمری نسبت به بتن معمولی در ساعات اولیه میزان جذب بالاتری را داشته اما در پایان زمان انجام آزمایش، نتایج تقریباً مشابه گردیده‌است.

شده به مدت ۹۰ روز حدود ۷۵ و ۱۰ درصد کاهش می‌یابد که این به معنی کم‌تر شدن نفوذپذیری است. از مقایسه نتایج آزمایش جذب موئینگی آب برای دو بتن معمولی و ژئوپلیمری سرباره‌ای مشاهده می‌شود که بتن معمولی در سن ۲۸ روز در پایان انجام آزمایش میزان نفوذپذیری مشابه بتن ژئوپلیمری دارد (حدود ۲۶



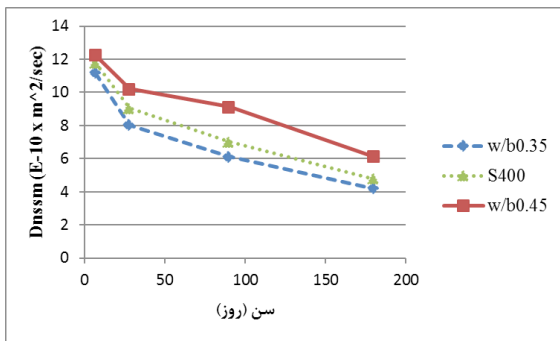
شکل ۷: نتایج آزمایش جذب موئینگی آب

Fig. 7. Capillary Water Absorption Test Results

براساس این روش میزان مقاومت الکتریکی در بتن‌های ژئوپلیمری حاوی سرباره که با دو محلول پتاسیم هیدروکسید و سدیم سیلیکات فعال شده‌است، با افزایش مقدار ماده پایه و نیز کاهش نسبت آب به سیمان، کاهش پیدا می‌کند که این موضوع بیانگر این است که نتایج مقاومت الکتریکی در واقع در این نوع بتن‌ها رسانایی الکتریکی را نشان می‌دهد و نفوذپذیری عامل تعیین کننده مقاومت برای این بتن‌ها نمی‌باشد (شکل ۸).

۶-۴- آزمایش مقاومت الکتریکی

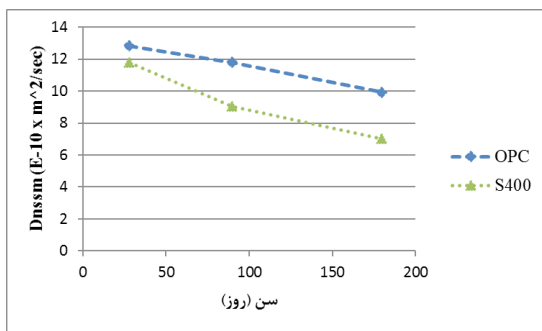
آزمایش مقاومت الکتریکی به نفوذپذیری بتن و رسانایی آن بستگی دارد. در بتن‌های ژئوپلیمری با توجه به استفاده از محلول‌های قلیایی در ساخت بتن، رسانایی الکتریکی می‌تواند نتایج آزمایش مقاومت الکتریکی به روش ونر را تحت تاثیر قرار دهد. لذا این آزمایش ژئوپلیمری چندان مناسب نیست [۱۸].



شکل ۱۰: تاثیر نسبت آب به مواد سیمانی بر ضریب انتشار آزمایش RCMT

Fig. 10. Effect of Water to Binder Ratio on RCMT Results

همان طور که در شکل ۱۱ مشخص است، ضریب انتشار در بتن معمولی نسبت به بتن ژئوپلیمری در سنین ۲۸، ۹۰ و ۱۸۰ روز حدود ۸، ۳۰ و ۴۱ درصد بیشتر می باشد. در نتیجه براساس آزمایش نفوذ یون های کلراید در بتن های ژئوپلیمری نسبت به بتن معمولی کم تر است.

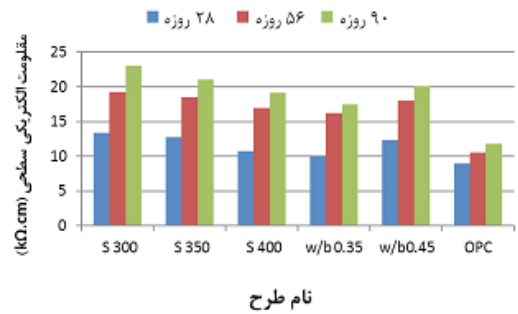


شکل ۱۱: مقایسه ضریب انتشار بتن معمولی و بتن ژئوپلیمری در آزمایش RCMT

Fig. 11. Comparison Between RCMT Results of Ordinary Concrete and Alkali Activated Concrete

۶-۶- آزمایش تعیین ضریب انتشار براساس پروفیل نفوذ یون های کلراید

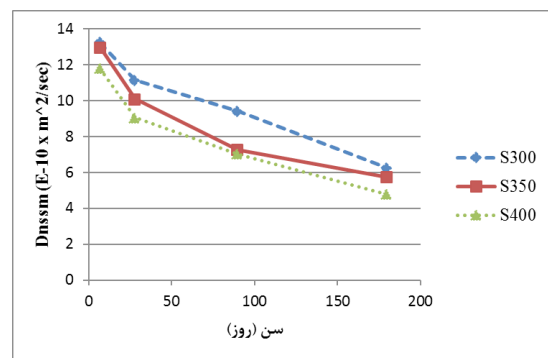
شکل ۱۲ تاثیر افزایش سرباره بر ضریب انتشار حاصل از رگرسیون را نشان می دهد. با بیش تر شدن ماده پایه ضریب انتشار یون های کلراید کاهش می یابد که این به معنی افزایش دوام در برابر نفوذ یون های کلراید است. برای مثال ضریب انتشار در طرح S400 پس از ۹۰ روز عمل آوری حدود ۱۴۴ و ۷۷ درصد نسبت به طرح های S350 و S300 کمتر می باشد.



شکل ۸: نتایج آزمایش مقاومت الکتریکی

Fig. 8. Electrical Resistivity Test Results

۶-۵- آزمایش مهاجرت تسریع شده یون های کلراید (RCMT) براساس شکل ۹ به صورت کلی می توان گفت که طرح S400 دارای مقادیر ضریب انتشار کمتری به ویژه در سنین پایین تر است. در سن ۹۰ روزه دو طرح S350 و S400 ضریب انتشار نسبتا مشابهی دارند اما در این سن طرح S300 با اختلاف ۳۴ درصدی دارای ضریب انتشار بالاتری است که این امر نشان دهنده دوام کمتر آن در برابر نفوذ یون های کلراید می باشد. مطابق نمودار می توان به این نکته اشاره کرد که تغییرات از سن ۷ تا ۲۸ روزه با شیب تندتری نسبت به تغییرات از سن ۲۸ تا ۱۸۰ روزه رخ داده است.



شکل ۹: تاثیر مقدار ماده پایه بر ضریب انتشار آزمایش RCMT

Fig. 9. Effect of Base Material Content on RCMT Results

همچنین در شکل ۱۰ تاثیر مقدار آب به مواد سیمانی بر روی ضریب انتشار یون های کلراید حاصل از آزمایش RCMT نشان داده شده است. براساس این نمودار، هر سه طرح با مقادیر مختلف نسبت w/b در سن هفت روزه دارای ضرایب انتشار یون های کلراید نزدیکی هستند اما با افزایش سن، تاثیر افزایش نسبت آب به مواد سیمانی خود را نشان می دهد و با بالا رفتن w/b ضریب انتشار بیشتر می گردد. برای نمونه ضریب انتشار یون های کلراید در طرح با نسبت آب به مواد سیمانی برابر با ۰/۳۵ حدود ۵۰ و ۱۵ درصد در هر دو سنین ۹۰ و ۱۸۰ روز نسبت به طرح های ساخته شده با نسبت های آب به مواد سیمانی برابر با ۰/۴ و ۰/۴۵ کمتر است.



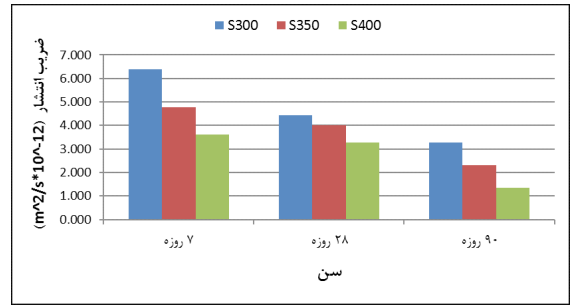
شکل ۱۴: مقایسه ضریب انتشار براساس پروفیل نفوذ یون های کلراید در دو بتن معمولی و بتن ژئوپلیمری حاوی سرباره

Fig. 14. Comparison Between Chloride Ions Diffusion Coefficient of Ordinary Concrete and Alkali Activated Concrete

۷- نتیجه گیری

براساس نتایج به دست آمده می توان در خصوص بتن های ژئوپلیمری حاوی سرباره که با دو محلول پتاسیم هیدروکسید و سدیم سیلیکات فعال شده اند، به نکات زیر اشاره کرد:

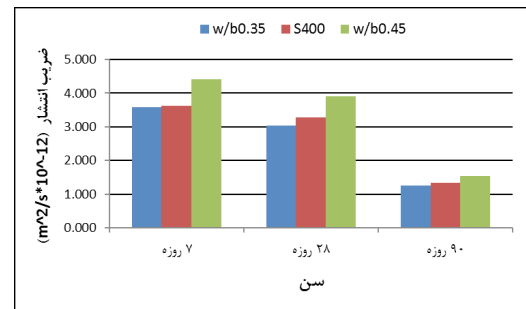
۱. بتن ژئوپلیمری سرباره ای در حالت تازه ترکیبی چسبنده با ویسکوزیته بالا و کارایی نسبتا کم است. در واقع این نوع بتن ها به سرعت کارایی خود را از دست می دهند. براساس نتایج آزمایش افت اسلامپ افزایش مقدار ماده پایه موجب بهبود کارایی می شود در حالی که افزایش نسبت آب به مواد سیمانی تقریبا در کارایی بتن های ژئوپلیمری سرباره ای بی تاثیر است.
۲. بتن های ژئوپلیمری دارای مقاومت فشاری بیشتری نسبت به بتن معمولی (۳۴٪ در سن ۲۸ روزه و ۱۵٪ در سن ۱۸۰ روزه) است. در این بتن ها افزایش مقدار ماده پایه تا حدود ۴۰۰ kg/m³ مقاومت فشاری را تا حدود ۱۲ درصد در سن نهایی افزایش می دهد. همچنین افزایش نسبت آب به مواد سیمانی مقدار مقاومت فشاری را کاهش می دهد. به نحوی که طرح w/b0.35 نسبت به طرح شاهد در حدود ۶٪ افزایش مقاومت در سن ۱۸۰ روزه و طرح w/b0.45 در سن نهایی دارای ۲۹٪ کاهش مقاومت فشاری نسبت به بتن معمولی است.
۳. آزمایش جذب موئینگی آب برای بررسی تاثیر مقدار ماده پایه بر روی نفوذپذیری چندان نتایج دقیقی را نشان نداده که علت این امر می توان به خاطر وجود ریزترک ها در بتن ژئوپلیمری حاوی سرباره باشد. البته نتایج برای تاثیر نسبت آب به مواد سیمانی با آن چه در بتن معمولی رخ می دهد مطابقت داشت و با نتایج سایر آزمایش ها همخوانی داشته است. در واقع با کاهش نسبت آب به مواد سیمانی میزان جذب موئینگی آب کاهش می یابد که بر اساس نتایج



شکل ۱۲: تاثیر مقدار ماده پایه بر ضریب انتشار براساس پروفیل نفوذ یون های کلراید

Fig. 12. Effect of Base Material Content on Chloride Ions Diffusion Coefficient

همان گونه که در شکل ۱۳ مشاهده شده است، افزایش نسبت w/b موجب افزایش ضریب انتشار می گردد. البته دو طرح S400 و w/b0.35 چندان تفاوتی در انتشار یون های کلراید ندارند و ضریب انتشارشان نزدیک به هم است ولی طرح w/b0.45 دارای ضریب انتشاری حدود ۱۶ درصد بیشتر از سایر طرح ها در سن ۲۸ و ۹۰ روز می باشد.



شکل ۱۳: تاثیر نسبت آب به مواد سیمانی بر ضریب انتشار براساس پروفیل نفوذ یون های کلراید

Fig. 13. Effect of Water to Binder Ratio on Chloride Ions Diffusion Coefficient

همان طور که در شکل ۱۴ مشاهده می شود، بتن معمولی در سن ۲۸ روز میزان ضریب انتشار کمتری نسبت به بتن ژئوپلیمری سرباره ای (طرح شاهد) دارد (حدود ۲۲ درصد کمتر). اما این روند با افزایش سن در ۹۰ روزه تغییر می کند و در این سن مقدار ضریب انتشار از بتن ژئوپلیمری سرباره ای تقریباً ۵۵ درصد بیشتر می شود. لازم به ذکر است روند مذکور با آن چه در آزمایش جذب موئینه مشاهده گردید، مطابقت دارد و علت این امر می تواند برای تفاوت نفوذپذیری در دو سن باشد.

در خصوص بررسی تاثیر مقدار ماده پایه و تاثیر نسبت آب به مواد سیمانی با هم تطابق دارد اما در خصوص مقایسه بتن معمولی و بتن ژئوپلیمری در سن ۲۸ روزه این دو آزمایش نتایج متفاوتی را نشان می‌دهند.

مراجع

- [1] P. K. Mehta, P. J. Monteiro, Concrete: microstructure, properties, and materials. New York, McGraw-Hill (2006).
- [2] A. A. Ramezaniapour, A. Kazemian, M. Sarvari, B. Ahmadi, Use of Natural Zeolite to Produce Self-Consolidating Concrete with Low Portland Cement Content and High Durability, Journal of Materials in Civil Engineering, 25(5) (2012) 589–596.
- [3] A. A. Ramezaniapour, A. Zolfagharnasab, F. Bahman Zadeh, M. R. Pourebrahimi, Fresh Properties, Compressive Strength and Chloride Ion Penetration Resistance of Self-Consolidating Concrete Containing Natural Pozzolan. The Fifth International Conference on Construction Materials (CONMAT 15), Whistler, Canada (2015).
- [4] J. Davidovits, Chemistry of Geo-Polymeric Systems, Terminology, Geopolymer International Conference, France (1999).
- [5] X. C. Pu, C. C. Gan, S.D. Wang, C.H. Yang, Summary Reports of Research on Alkali-Activated Slag Cement and Concrete, Chongqing Institute of Architecture and Engineering, Chongqing, (1988) pp. 1–6.
- [6] C. Shi, P.V. Krivenko, D. Roy, Alkali-Activated Cements and Concretes. Taylor & Francis, New York (2006).
- [7] S.D. Wang, X. C. Pu, K. L. Scrivener, P. L. Pratt, Alkali-Activated Slag Cement and Concrete: a Review of Properties and Problems, Advances in Cement Research, 7(27) (1995) pp. 93–102.
- [8] A. A. Ramezaniapour, T. Parhizkar, A. R. Pourkhorshidi, A. Raeis Ghasemi, Assessing Concrete Durability with Different Cements and Pozzolans in Persian Gulf Environment, BHRC Publication (2006).
- [9] R. D. Brown, Design Prediction of the Life of Reinforced Concrete in Marine and Other Chloride Environments, Durability of Building Materials, Elsevier Scientific Publishing Co., Amsterdam, 3 (1982).
- [10] C. Aria, N. R. Buenfeld, J. B. Newman, Factors Influencing Chloride Binding in Concrete, Cement and Concrete Research, 20(2) (1990) pp. 291–300.
- [11] A. O. Saud, Performance of Alkali-Activated Slag Concrete, The University of Sheffield (2002).
- [12] F. G. Collins, J. G. Sanjayan, Workability and Mechanical

می‌توان گفت که دو طرح $w/b0.35$ و $S400$ نسبت به طرح بتن ژئوپلیمری با نسبت آب به مواد سیمانی $0/45$ در سن نهایی به ترتیب 75% و 10% بهبود عملکرد به لحاظ کم‌تر شدن میزان آب جذب شده را به همراه دارند. همچنین از مقایسه بتن معمولی با بتن ژئوپلیمری حاوی سرباره می‌توان به این نکته اشاره کرد که در سن ۲۸ روزه میزان جذب موئینگی آب برای بتن معمولی حدود 26% کم‌تر است اما این روند در سن ۹۰ روزه تغییر می‌کند و میزان آب جذب شده براساس این آزمایش در این سن در نمونه‌های بتن معمولی بیش‌تر از بتن ژئوپلیمری سرباره‌ای است. در واقع در سن نهایی میزان آب جذب شده در بتن ژئوپلیمری (طرح شاهد) به میزان 23% کم‌تر می‌باشد. پیشنهاد می‌شود که از سایر روش‌های آزمایش نیز برای بررسی میزان نفوذپذیری بتن‌های ژئوپلیمری حاوی سرباره استفاده شود و نتایج مقایسه گردد.

۴. به علت رسانایی الکتریکی بتن‌های ژئوپلیمری، آزمایش مقاومت الکتریکی برای این نوع بتن‌ها مناسب نیست و نتایج نشان‌دهنده نفوذپذیری نمی‌باشد.

۵. به صورت کلی می‌توان گفت که افزایش مقدار ماده پایه سبب کاهش ضریب انتشار براساس آزمایش مهاجرت تسریع شده یون‌های کلراید می‌شود که نشان‌دهنده دوام بیشتر در برابر نفوذ یون‌های کلراید است. به طور مثال، در طرح $S300$ در سن ۹۰ روزه میزان ضریب انتشار به میزان 34% بالاتر از دو طرح دیگر می‌باشد. همچنین افزایش نسبت آب به مواد سیمانی ضریب انتشار بالاتری را در آزمایش RCMT به همراه دارد. این موضوع را می‌توان به صورت کاهش 50 و 15 درصدی مقدار ضریب انتشار طرح $w/b0.35$ در دو سن 90 و 180 روزه مشاهده نمود. در نهایت براساس این آزمایش بتن ژئوپلیمری در تمامی سنین عملکرد بهتری را نسبت به بتن معمولی از خود نشان داده‌است. بر اساس نتایج بتن معمولی به ترتیب در سنین 28 ، 90 و 180 روزه با افزایش 8 ، 30 و 41 درصدی ضریب انتشار همراه است.

۶. ضرایب انتشار به دست آمده براساس پروفیل نفوذ یون کلراید نشان می‌دهد که با افزایش مقدار ماده پایه ضریب انتشار کاهش یافته (ضریب انتشار در طرح $S400$ پس از 90 روز عمل‌آوری حدود 144 و 77 درصد نسبت به طرح‌های $S300$ و $S350$ کمتر می‌باشد.) و با افزایش نسبت آب به مواد سیمانی این ضریب افزایش می‌یابد طرح $w/b0.45$ دارای ضریب انتشاری حدود 16 درصد بیشتر از سایر طرح‌ها در سنین 28 و 90 روز می‌باشد. نتایج به دست آمده برای مقایسه بتن‌های ژئوپلیمری و بتن معمولی با سیمان پرتلند با نتایج به دست آمده از آزمایش جذب موئینگی آب مطابقت داشته و همان روند را نشان می‌دهد.

۷. نتایج دو آزمایش RCMT و آزمایش پروفیل نفوذ یون‌های کلراید

- [16] NT Build 492, Chloride Migration Coefficients from Non-Steady-State, Nord test method (1999).
- [17] NT Build 443, Concrete, hardened: Accelerated chloride penetration, Nord test method (1995).
- [18] M. R. Maddah, The effect of different solutions in geopolymer cement production with two types of pozzolan and evaluation of mechanical properties and chloride ion penetration in these concretes, M.Sc. Thesis, AmirKabir University of Technology (2013).
- Properties of Alkali Activated Slag Concrete, Cement and Concrete Research, 29(3) (1999) pp. 455–458.
- [13] ASTM C143/C143M – 13, Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA (2013).
- [14] EN 480-5, Admixtures for concrete, mortar and grout. Test methods. Determination of capillary absorption, European Standard (EN) (2005).
- [15] Designation: FM 5-578, Florida Method of Test for Concrete Resistivity as an Electrical Indicator of its Permeability (2004).

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Please cite this article using:

A. Ramezaniapour, F. Bahman Zadeh, A. Zolfagharnasab, A. M. Ramezaniapour, Studying the Effect of the Amount of Source Materials and Water to Binder Ratio on Chloride Ions Ingress in Alkali-Activated Slag Concretes, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 50(4) (2018) 673-684.

DOI: 10.22060/ceej.2016.695



