مهندسی عمران شریف (زمستان ۱۳۹۲)
دوره‌ی ۲ - ۲۹، شماره‌ی ۴، ص. ۱۲۷-۱۳۶، (یادداشت فنی)

Research Note

بررسی خواص مقاومتی و دوام در برابر نفوذ یون کلرید بتن‌های توانمند سه جزئی حاوی سرباره‌ی کوره‌ی آهن‌گدازی و دوده‌ی سیلیسی

علیرضا باقری* **(استادیار)**
حامد زنگانه (کارشناس ارشد)
محمد مهدی معلمی (کارشناس ارشد)
دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

این نوشتار با هدف بررسی امکان ارتقاء خواص بتن‌های حاوی سرباره‌ی تولید داخل کشور از طریق کاربرد توأم آن با دوده‌ی سیلیسی (مخلوط سه‌جزئی) انجام شده است.
مخلوط‌های سه‌جزئی مورد مطالعه حاوی ۱۵، ۳۰ و ۵۰ درصد سرباره به همراه ۲/۵، ۵ و ۷/۵ درصد دوده‌ی سیلیسی بوده‌اند. علاوه‌بر خواص مقاومتی، خواص دوام مخلوط‌ها از طریق آزمایش تعیین مقاومت الکتریکی و آزمایش‌های تسریع‌شده‌ی تعیین مقاومت بتن در برابر نفوذ یون کلر شامل روش‌های RCPT و RCMT بررسی شده است. نتایج نشانگر این است که اثر استفاده‌ی توأم از سرباره و دوده‌ی سیلیسی در بهبود روند کسب مقاومت مخلوط‌های دوجزئی حاوی سرباره‌ی محدود بوده است و بستگی به مقدار سرباره در مخلوط دارد. لیکن استفاده از مخلوط‌های سه‌جزئی باعث ارتقاء قابل‌توجه دوام در تمام سنین می‌شود. با استفاده از ترکیب مناسب سرباره و دوده‌ی سیلیسی دستیابی به خواص مناسب مقاومت و دوام در سن ۲۸ روز و ارتقاء بسیار قابل توجه دوام درازمدت امکان‌پذیر است.

bagheri@kntu.ac.ir
hamedzanganeh@gmail.com
mohsen.moalemi@yahoo.com

واژگان کلیدی: بتن سه‌جزئی، سرباره، دوده‌ی سیلیسی، دوام، RCPT، RCMT.

۱. مقدمه

سرباره کوره‌ی آهن‌گدازی از ضایعات صنایع فولاد است. با توسعه‌ی روزافزون تولید فولاد در جهان، میزان تولید سرباره‌ی کوره‌ی آهن‌گدازی نیز در حال افزایش است.[۱] یکی از مهم‌ترین کاربردهای سرباره، استفاده از آن در تولید بتن به‌منزله‌ی ماده‌ی مکمل سیمانی در جایگزینی بخشی از سیمان است؛[۲و۳] که دارای مزایای اقتصادی و زیست‌محیطی ناشی از جایگزینی بخشی از سیمان با یک فرآورده‌ی زائد صنعتی، و جلوگیری از دپوی این ماده در طبیعت است. همچنین کاربرد سرباره در بتن باعث مزایای فنی شامل کاهش نیاز آبی بتن، افزایش زمان گیرش، کاهش حرارت ایجادشده در اثر واکنش‌های هیدراته‌شدن سیمان، کاهش تخلخل مویینه، بهبود ریزساختار بتن، افزایش مقاومت در برابر حملات شیمیایی، و نفوذ عوامل مخرب به بتن می‌شود.[۲و۳]

شایان توجه است که برخلاف پوزولان‌های متعارف که به تنهایی قابلیت چسبانندگی ندارند و از طریق واکنش با هیدروکسید کلسیم در خمیر سیمان، مواد چسباننده ایجاد می‌کنند؛ سرباره خود به‌تنهایی دارای قابلیت چسبانندگی است. لذا برخلاف پوزولان‌های متعارف نظیر خاکستر بادی، که معمولاً تا حدود ۳۰٪ وزنی مواد سیمانی مورد استفاده قرار می‌گیرند، سرباره تا بیش از ۷۰٪ وزنی مواد سیمانی قابل مصرف است.

روند توسعه‌ی خواص در بتن‌های حاوی سرباره بستگی به ساختار شیمیایی و فیزیکی سرباره دارد. ساختار شیمیایی سرباره عمدتاً به مواد اولیه‌ی به‌کار رفته در تولید آهن خام و ساختار فیزیکی آن به روش سردکردن سرباره بستگی دارد. سرباره‌های با قلیائیت بالاتر و مقدار فاز شیشه‌یی بیشتر دارای روند سریع‌تر کسب خواص هستند.[۳]

برای طبقه‌بندی سرعت واکنش سرباره در بتن معمولاً از شاخص فعالیت پوزولانی تعیین‌شده براساس استاندارد ASTM C989،[۴] استفاده می‌شود. بر این اساس سرباره‌ی کوره‌ی آهن‌گدازی به ۳ رده‌ی شامل: رده‌ی ۸۰ با فعالیت نسبتاً کم، رده‌ی ۱۰۰ با فعالیت متوسط، و رده‌ی ۱۲۰ با فعالیت زیاد تقسیم‌بندی می‌شود. روند کسب خواص بتن حاوی سرباره‌ی کوره‌ی آهن‌گدازی رده‌ی ۸۰ در مقایسه با ۲ رده‌ی دیگر سرباره‌ی کوره آهن‌گدازی کندتر است. همچنین استفاده از مقادیر زیاد سرباره برای جایگزینی سیمان نیز موجب کندشدن روند کسب خواص بتن نسبت به بتن کنترل می‌شود.

طی دهه‌ی گذشته، توسعه‌ی بتن‌های مبتنی بر سیمان سه‌جزئی (سیمان پرتلند

---

* نویسنده مسئول
تاریخ: دریافت ۱۳۹۰/۲/۱۸، اصلاحیه ۱۳۹۱/۲/۲۷، پذیرش ۱۳۹۱/۷/۱.

به همراه ۲ ماده‌ی مکمل سیمانی)، جهت بهره‌مندی هم‌زمان از مزایای مواد مکمل سیمانی مختلف و به کمینه‌رساندن آثار سوء آنها مورد توجه پژوهشگران قرارگرفته است. استفاده از ترکیب توأم ۲ نوع ماده‌ی مکمل سیمانی مختلف در مقادیر و نسبت‌های مناسب، امکان بهبود کارآیی و کاهش مشکلات اجرایی در بتن تازه و بهبود روند کسب مقاومت و دستیابی به خواص ارتقاءیافته‌ی دوام در بتن سه‌جزئی سخت‌شده را فراهم می‌سازد.[۵-۱۰] یکی از انواع سیمان‌های سه‌جزئی، سیمان سه‌جزئی مبتنی بر سرباره و دوده‌ی سیلیسی است. در ادامه، نتایج برخی تحقیقات انجام‌شده در خصوص خواص بتن‌های سه‌جزئی حاوی سرباره و دوده‌ی سیلیسی بررسی شده است.

دوده‌ی سیلیسی به‌علت خلوص بالا و سطح ویژه‌ی بسیار زیاد باعث ارتقاء خواص مقاومتی و دوام و تسریع روند کسب خواص بتن می‌شود. از سوی دیگر، کاربرد دوده‌ی سیلیسی خصوصاً در مقادیر زیاد باعث افت شدید کارآیی و مشکلات اجرایی نظیر افزایش امکان ایجاد ترک‌های خمیری در بتن می‌شود.[۳و۱۱]

کاربرد دوده‌ی سیلیسی در نسبت‌های مناسب به همراه سرباره می‌تواند مشکلات اجرایی و افت‌کارایی بتن دوجزئی حاوی دوده‌ی سیلیسی را رفع و باعث بهبود روند کسب مقاومت و ارتقاء قابل توجه دوام در مقایسه با بتن دوجزئی حاوی سرباره شود.[۵،۶و۹]

با کاربرد دوده‌ی سیلیسی به همراه سرباره می‌توان از مزایای دوده‌ی سیلیسی در کنترل آب‌انداختگی بتن و مزایای سرباره در افزایش کارایی و کاهش مقدار مواد افزودنی شیمیایی روان‌ساز لازم برای رسیدن به کارایی موردنظر استفاده کرد.

پژوهشگران مختلف افزایش انسجام، سیالیت، و مدت زمان حفظ کارایی بتن را در صورت استفاده از بتن سه‌جزئی حاوی نسبت‌های مناسب سرباره و دوده‌ی سیلیسی گزارش کرده‌اند.[۱۲-۱۶]

نتایج پژوهشی در سال ۲۰۰۲ نشان داد که استفاده از مخلوط سه‌جزئی حاوی ۳۵٪ سرباره و ۴ تا ۶ درصد دوده‌ی سیلیسی توانسته است افت مقاومت ۲۸ روزه‌ی مخلوط دوجزئی حاوی ۳۵٪ سرباره را به لحاظ عملکرد در مقایسه با مخلوط کنترل (مخلوط بدون مواد مکمل سیمانی) جبران کند.[۸] طبق نتایج پژوهشی در سال ۲۰۰۷، مقاومت فشاری بتن سه‌جزئی حاوی ۲۰ تا ۲۵ درصد سرباره و ۳ تا ۵ درصد دوده‌ی سیلیسی در ۷ روز تقریباً برابر و در ۲۸ روز قدری بیشتر از مخلوط بتن کنترل بوده است.[۵] همچنین نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که انبساط ناشی از حمله‌ی سولفاتی در مخلوط سه‌جزئی حاوی دوده‌ی سیلیسی و سرباره بعد از ۱۲ ماه، بسیار کمتر از مخلوط حاوی سیمان نوع ۵ است.

در پژوهشی دیگر در سال ۱۹۹۹ نیز مقاومت در برابر انبساط ناشی از واکنش قلیایی سیلیسی بتن سه‌جزئی با بتن دوجزئی و بتن معمولی مقایسه شده است.[۹] نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که انبساط طولی بتن‌های سه‌جزئی کمتر از بتن‌های دوجزئی و بتن معمولی است. بتن سه‌جزئی حاوی ۲۵٪ سرباره و ۲٫۵٪ دوده‌ی سیلیسی دارای مقاومت بیشتری در برابر انبساط ناشی از واکنش قلیایی سیلیسی نسبت به بتن دوجزئی حاوی ۵۰٪ سرباره است.

نتایج تحقیق گزارش‌شده‌یی در سال ۱۹۹۸ روی حجم تخلخل ملات‌های دوجزئی و سه‌جزئی نیز نشانگر این است که ساختار منافذ در مخلوط سه‌جزئی حاوی ۱۰٪ دوده‌ی سیلیسی و ۴۰٪ سرباره و ۵۰٪ سیمان در مقایسه با ملات مخلوط کنترل و مخلوط دوجزئی حاوی ۵۰٪ سرباره‌ی ریزتر است، هر چند حجم کلی منافذ کاهش نیافته است.[۱۷]

همچنین نتایج پژوهش دیگری (۱۹۹۹) در مورد جذب آب و نفوذپذیری در برابر هوای بتن سه‌جزئی حاوی سرباره و دوده‌ی سیلیسی در ۳ نسبت آب به مواد سیمانی مختلف نشان می‌دهد که نفوذپذیری هوا در بتن سه‌جزئی نسبت به بتن دوجزئی حاوی دوده‌ی سیلیسی و بتن دوجزئی حاوی سرباره کم می‌شود. اما جذب آب بتن سه‌جزئی نسبت به جذب آب بتن معمولی و بتن دوجزئی سرباره‌یی، به مقدار کمتر ولی از بتن دو جزئی حاوی دوده‌ی سیلیسی کمی بیشتر است.[۱۸]

به لحاظ مقاومت در برابر نفوذ یون کلر، نتایج گزارش‌شده در پژوهشی دیگر نشانگر عملکرد بهتر بتن‌های سه‌جزئی حاوی ۱۰٪ دوده‌ی سیلیسی و مقادیر مختلف سرباره در مقایسه با بتن کنترل و بتن‌های دوجزئی حاوی سرباره است.[۷] همچنین نتایج پژوهشی در سال ۲۰۰۲ نشان می‌دهد که نفوذ یون کلرید در بتن سه‌جزئی حاوی ۲۵٪ سرباره و ۳٫۸٪ دوده‌ی سیلیسی بعد از ۸ سال در معرض محیط کلریدی‌بودن، ۷۰٪ کمتر از بتن کنترل است؛ و نیز ضریب انتشار یون کلر در بتن سه‌جزئی حاوی سرباره و دوده‌ی سیلیسی در مقایسه با بتن‌های دوجزئی و کنترل کمترین مقدار بوده است.[۸] نتایج پژوهشی در سال ۲۰۰۷ نیز نشان می‌دهد که مقاومت در برابر نفوذ یون کلر بتن سه‌جزئی حاوی سرباره و دوده‌ی سیلیسی با بتن دوجزئی حاوی درصد برابر دوده‌ی سیلیسی در سن‌های ۲۸ و ۵۶ روزه در نسبت‌های آب به مواد سیمانی برابر تقریباً یکسان است، اما بعد از ۲ سال ضریب انتشار یون کلر و شارژ عبوری از بتن در آزمایش RCPT در بتن سه‌جزئی به مراتب کمتر از بتن دوجزئی حاوی درصد برابر دوده‌ی سیلیسی است.[۵] یافته‌های گزارش‌شده پژوهشی دیگر نیز مؤید عملکرد بهتر بتن سه‌جزئی حاوی دوده‌ی سیلیسی و سرباره در محیط‌های دریایی است.[۱۰]

در ایران علی‌رغم تولید مقادیر قابل توجه سرباره‌ی کوره‌ی آهن‌گدازی در کارخانه‌ی ذوب‌آهن اصفهان، فقط بخش کوچکی از آن به‌منزله‌ی ماده‌ی مکمل سیمانی در تولید سیمان آمیخته به‌کار می‌رود. بخش عمده‌یی از سرباره پس از ریخته‌شدن در محیط سرد و سپس دپو می‌شود. نتایج تحقیقات نسبتاً محدود منتشرشده نشان می‌دهد که واکنش‌زایی سرباره‌ی کوره‌ی آهن‌گدازی داخلی نسبتاً کم است.[۱۹و۲۰]

در نتیجه، بررسی روش‌های بهبود عملکرد سرباره‌ی تولید داخل کشور در بتن از نیازهای مهم تحقیقاتی کشور است. بر این اساس در این تحقیق امکان استفاده‌ی ترکیبی از سرباره‌ی کوره‌ی آهن‌گدازی داخلی با دوده‌ی سیلیسی تولید داخل، جهت دستیابی به بتن‌های توانمند با روند کسب خواص مطلوب مورد بررسی قرار گرفته است. برای بررسی دوام بتن از آزمایش تعیین مقاومت الکتریکی و آزمایش‌های تسریع‌شده‌ی تعیین مقاومت بتن در برابر نفوذ یون کلرید شامل آزمایش‌های RCPT و RCMT استفاده شده است.

۲. برنامه‌ی آزمایشگاهی

۱.۲. مواد و مصالح مورد استفاده

سیمان مورد استفاده، سیمان نوع ۲ و مواد مکمل سیمانی شامل: دوده‌ی سیلیسی نامتراکم با رنگ خاکستری روشن تولیدشده در کارخانه‌ی فروآلیاژ ازنا و سرباره‌ی کوره‌ی آهن‌گدازی بوده است. سرباره‌ی کوره‌ی آهن‌گدازی سریع سردشده توسط فشار آب به‌صورت گرانوله از کارخانه‌ی ذوب‌آهن اصفهان تهیه و با آسیاب گلوله‌یی پودر شده است (شکل ۱). در جدول‌های ۱ و ۲ به ترتیب آنالیز شیمیایی و مشخصات فیزیکی سیمان، سرباره و دوده‌ی سیلیسی ارائه شده است. در شکل ۲، تصویر میکروسکوپ نوری از مقطع نازک سرباره ارائه شده است. نمونه عمدتاً از قطعات گوشه‌دار شیشه‌ی سالم و تجزیه‌نشده تشکیل شده است. علاوه‌بر قطعات شیشه‌یی، بلورهای ملیلیت نیز در نمونه‌ها مشاهده شده است. نتایج آزمایش تعیین شاخص فعالیت پوزولانی انجام‌شده روی سرباره، نشانگر فعالیت نسبتاً کم سرباره‌ی مورد استفاده و انطباق آن با سرباره‌ی رده‌ی ۸۰ طبق[۴] ASTM C۹۸۹ است.

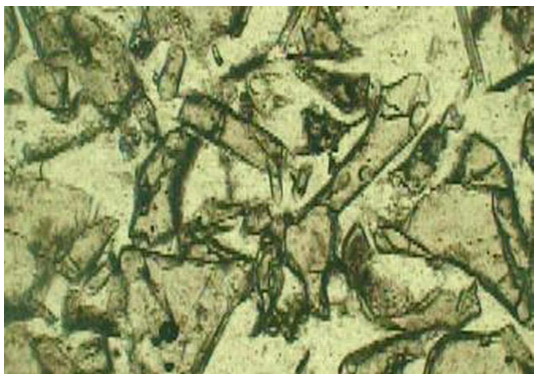
جدول ۱. آنالیز شیمیایی سیمان، سرباره و دوده‌ی سیلیسی.

ترکیب (٪)	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	Na_2O	K_2O
سیمان	۲۲٫۵	۴٫۱۲	۳٫۵۱	۶۳٫۲۲	۲٫۷۰	۱٫۵۱	۰٫۱۸	۰٫۵۴
سرباره	۳۶٫۰	۱۳٫۰۰	۰٫۶۰	۳۸٫۱۰	۶٫۶	۰٫۶۰	۰٫۵۰	۱٫۱۰
دوده‌ی سیلیسی	۹۴٫۳	۱٫۱۰	۰٫۷۰	۰٫۴۹	۰٫۸۷	–	۰٫۴۲	۱٫۳۲

جدول ۲. مشخصات فیزیکی سیمان، سرباره و دوده‌ی سیلیسی.

	سیمان	سرباره	دوده‌ی سیلیسی
سطح ویژه (cm^2/gr)	۲۹۶۲	۳۰۵۰	۱۹۲۰۰۰
چگالی (gr/cm^3)	۳٫۱۴	۲٫۸۹	۲٫۲۱
افت ناشی از سرخ‌شدن (٪)	-	۱٫۲	۰٫۱
مانده روی الک نمره‌ی ۳۲۵ (٪)	-	۱۰	۰٫۳
فعالیت پوزولانی تسریع‌شده ۷ روزه (٪)	-	-	۱۴۵
شاخص فعالیت پوزولانی ۷ روزه (٪)	-	۵۸	-
شاخص فعالیت پوزولانی ۲۸ روزه (٪)	-	۷۵	-
نیاز آبی (٪)	-	۹۶	-

شکل ۱. تصویر سرباره‌ی گرانوله و سرباره‌ی پودرشده.



شکل ۲. عکس میکروسکوپ نوری از مقطع نازک سرباره با بزرگ‌نمایی ۴۰ برابر.

از فوق روان‌ساز بر پایه‌ی پلی‌کربوکسیلیک اتر با نام تجاری Gelenium P51 و آب شرب تهران در ساخت طرح اختلاط‌ها استفاده شده است. سنگدانه‌های مصرفی از منابع جنوب غرب تهران تهیه شده است. مصالح ریزدانه (ماسه)، از نوع طبیعی با جرم حجمی اشباع با سطح خشک $2,52\ gr/cm^3$، درصد جذب آب ۳٫۰ و ۱٫۱٪ عبوری از الک شماره‌ی ۲۰۰ و مصالح سنگی درشت‌دانه‌ی نوع شکسته با جرم حجمی اشباع با سطح خشک $2,55\ gr/cm^3$، درصد جذب آب ۲٫۲۰ و ۰٫۲۳٪ عبوری از الک شماره‌ی ۲۰۰ و مصالح سنگی درشت‌دانه‌ی بادامی از نوع شکسته با جرم حجمی اشباع با سطح خشک $2,57\ gr/cm^3$، درصد جذب آب ۱٫۹۵ و ۰٫۱۰٪ عبوری از الک شماره‌ی ۲۰۰ هستند. دانه‌بندی نمونه‌های ماسه و شن مورد استفاده مطابق با الزامات استاندارد ۳۰۲ ایران[۲۱] بوده است.

۲.۲. مخلوط‌های بتن

مخلوط‌های بتنی با نسبت آب به مواد سیمانی ۰٫۳۸ و عیار مواد سیمانی $420\ kg/m^3$ ساخته شده‌اند. از دوده‌ی سیلیسی در نسبت‌های جایگزینی ۲٫۵، ۵، ۷٫۵ و ۱۰ درصد وزنی سیمان و از سرباره در مقادیر جایگزینی ۱۵، ۳۰ و ۵۰ درصد مواد سیمانی برای ساخت طرح‌های دوجزئی استفاده شده است. از سرباره در مقادیر ۱۵، ۳۰ و ۵۰ درصد مواد سیمانی به‌صورت توأم به همراه دوده‌ی سیلیسی در مقادیر ۲٫۵، ۵ و ۷٫۵ درصد وزنی مواد سیمانی برای ساخت طرح‌های سه‌جزئی استفاده شده است. مشخصات مخلوط‌های مورد مطالعه در جدول ۳ ارائه شده است.

به منظور ثابت نگاه‌داشتن نسبت آب به مواد سیمانی در مقدار ۰٫۳۸، از مقادیر مختلف فوق روان‌ساز جهت دستیابی به کارایی موردنظر mm ۱۰۰-۱۵۰ براساس آزمایش اسلامپ استفاده شده است. نمونه‌ها پس از ۲۴ ساعت از قالب‌ها خارج و تحت عمل‌آوری مرطوب در دمای $23 \pm 2^{\circ}C$ تا زمان آزمایش قرارگرفتند. کدگذاری مخلوط‌ها براساس ماده‌ی مکمل سیمانی به‌کاررفته و درصد استفاده از آن بوده است. مثلاً مخلوط‌های با کدهای SF5، SL30 و SL50-SF2.5 به‌ترتیب مربوط به مخلوط‌های دوجزئی حاوی ۵٪ دوده‌ی سیلیسی، دوجزئی حاوی ۳۰٪ سرباره و سه‌جزئی حاوی ۵۰٪ سرباره و ۲٫۵٪ دوده‌ی سیلیسی هستند.

۳.۲. آزمایش‌های انجام‌شده

آزمایش مقاومت فشاری و مقاومت الکتریکی بر روی نمونه‌های مکعبی ۱۰ cm، آزمایش RCPT براساس استاندارد ASTM C1202[۲۲] و آزمایش RCMT براساس استاندارد AASHTO TP64[۲۳] بر روی نمونه‌های استوانه‌یی با قطر ۱۰ cm و ضخامت ۵ cm انجام شده است. با توجه به اینکه آزمایش RCMT قبلاً درکشور انجام نشده است؛ در ادامه، توضیح کوتاهی درخصوص این آزمایش و مقایسه‌ی آن با آزمایش متداول RCPT ارائه شده است.

به‌دلیل طولانی‌بودن پدیده‌ی نفوذ یون کلر در بتن در بررسی‌های آزمایشگاهی استفاده از روش‌های تسریع‌شده‌ی نفوذ یون کلر متداول است. یکی از روش‌های متداول تسریع‌شده در ارزیابی مقاومت بتن در برابر نفوذ یون کلر آزمایش RCPT است که در آیین‌نامه‌ی ملی پایایی بتن در محیط خلیج فارس و دریای عمان (پیشنهادی)[۲۴] نیز به این آزمایش ارجاع شده‌است. در آزمایش RCPT یک وجه نمونه‌ی بتنی در تماس با محلول هیدروکسیدسدیم قرار داده می‌شود. سپس

جدول ۳. مقادیر اجزاء مخلوط‌های ساخته‌شده.

کد طرح	W/B	سیمان (kg/m^3)	سرباره (kg/m^3)	دوده‌ی سیلیسی (kg/m^3)	شن (SSD) (kg/m^3)	ماسه (SSD) (kg/m^3)	فوق روان‌ساز (٪)	دمای بتن تازه (°C)	اسلامپ (mm)
کنترل	۰٫۳۸	۴۲۰	۰	۰	۸۷۶	۸۷۶	۰٫۴۴	۲۰	۱۲٫۵
SF۲٫۵	۰٫۳۸	۴۰۹٫۵	۰	۱۰٫۵	۸۷۴	۸۷۴	۰٫۴۸	۲۰٫۶	۱۴٫۰
SF۵	۰٫۳۸	۳۹۹	۰	۲۱	۸۷۲	۸۷۲	۰٫۵۱	۲۱٫۶	۱۱٫۰
SF۷٫۵	۰٫۳۸	۳۸۸٫۵	۰	۳۱٫۵	۸۷۰	۸۷۰	۰٫۵۴	۲۲	۱۳٫۰
SF۱۰	۰٫۳۸	۳۷۸	۰	۴۲	۸۶۹	۸۶۹	۰٫۵۶	۲۱	۱۳٫۰
SL۱۵	۰٫۳۸	۳۵۷	۶۳	۰	۸۷۳	۸۷۳	۰٫۴۰	۲۲	۱۲٫۵
SL۳۰	۰٫۳۸	۲۹۴	۱۲۶	۰	۸۷۰	۸۷۰	۰٫۳۷	۲۲	۱۳٫۵
SL۵۰	۰٫۳۸	۲۱۰	۲۱۰	۰	۸۶۶	۸۶۶	۰٫۳۳	۲۰	۱۴٫۰
SL۱۵-SF۲٫۵	۰٫۳۸	۳۴۶٫۵	۶۳	۱۰٫۵	۸۷۲	۸۷۲	۰٫۴۲	۱۹	۱۳٫۰
SL۱۵-SF۵	۰٫۳۸	۳۳۶	۶۳	۲۱	۸۷۰	۸۷۰	۰٫۴۴	۲۰	۱۲٫۰
SL۱۵-SF۷٫۵	۰٫۳۸	۳۲۵٫۵	۶۳	۳۱٫۵	۸۶۸	۸۶۸	۰٫۴۶	۲۱	۱۲٫۰
SL۳۰-SF۲٫۵	۰٫۳۸	۲۸۳٫۵	۱۲۶	۱۰٫۵	۸۶۹	۸۶۹	۰٫۳۸	۱۸	۱۲٫۵
SL۳۰-SF۵	۰٫۳۸	۲۷۳	۱۲۶	۲۱	۸۶۷	۸۶۷	۰٫۴۰	۱۹	۱۳٫۵
SL۳۰-SF۷٫۵	۰٫۳۸	۲۶۲٫۵	۱۲۶	۳۱٫۵	۸۶۵	۸۶۵	۰٫۴۲	۲۲	۱۴٫۰
SL۵۰-SF۲٫۵	۰٫۳۸	۱۹۹٫۵	۲۱۰	۱۰٫۵	۸۶۵	۸۶۵	۰٫۳۴	۲۰	۱۳٫۵
SL۵۰-SF۵	۰٫۳۸	۱۸۹	۲۱۰	۲۱	۸۶۳	۸۶۳	۰٫۳۶	۲۰	۱۴٫۰
SL۵۰-SF۷٫۵	۰٫۳۸	۱۷۸٫۵	۲۱۰	۳۱٫۵	۸۶۱	۸۶۱	۰٫۳۸	۲۱	۱۳٫۰

از طریق الکترود کاتد قرارگرفته در محلول کلرید سدیم و الکترود آند قرارگرفته در محلول سود جریان ۶۰ ولت به آزمونه اعمال می‌شود. جریان عبوری طی ۶ ساعت اندازه‌گیری و ثبت می‌شود. بر این اساس مقدار کل شارژ الکتریکی عبورکرده از نمونه برحسب کولمب محاسبه و با عنوان نتیجه‌ی آزمایش گزارش می‌شود. در تفسیر نتایج، نمونه‌های با شارژ عبوری بالاتر دارای نفوذپذیری بیشتری در برابر یون کلر در نظرگرفته می‌شوند. به‌دلیل برخی کاستی‌ها در آزمایش RCPT نظیر افزایش دمای نمونه در طول آزمایش و خطاهای ناشی از آن، و همچنین دخالت یون‌های دیگر غیر از یون کلر در مقدار جریان عبوری، روش دیگری مبتنی بر انتقال یون کلرید به نام روش RCMT توسعه یافته است.[۲۳،۲۵،۲۶] نوع نمونه‌ها و نحوه‌ی آماده‌سازی آنها در آزمایش RCMT مشابه آزمایش RCPT و شامل قطعات به ضخامت ۵ cm بریده‌شده از استوانه‌های ۱۰ cm × ۲۰ است. تفاوت عمده‌ی این روش با روش RCPT، حجم بسیار بالاتر محلول نمک در تماس با نمونه است؛ که از افزایش دمای آن جلوگیری می‌کند. همچنین میزان نفوذپذیری بتن در برابر یون کلر به جای اندازه‌گیری مقدار جریان عبوری از نمونه، از طریق شکافتن نمونه و تعیین مستقیم عمق نفوذ یون کلرید مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. نتیجه‌ی آزمایش نیز به‌صورت نرخ نفوذ یون کلر از رابطه‌ی ۱ محاسبه می‌شود.

$$M = \frac{h}{Vt} \qquad (۱)$$

که در این رابطه، M نرخ نفوذ یون کلر بر حسب میلی‌متر بر ولت ساعت، h عمق نفوذ یون کلر بر حسب میلی‌متر، V ولتاژ اعمال‌شده به آزمونه‌ها برحسب ولت، و t مدت زمان آزمایش بر حسب ساعت است.

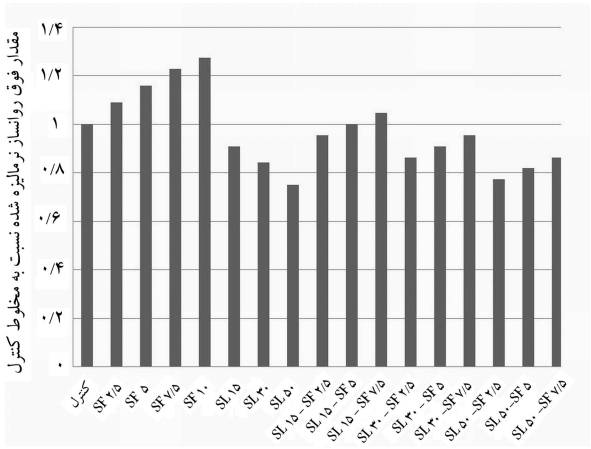
۳. نتایج و تجزیه و تحلیل آنها

۱.۳. میزان مصرف فوق روان‌ساز

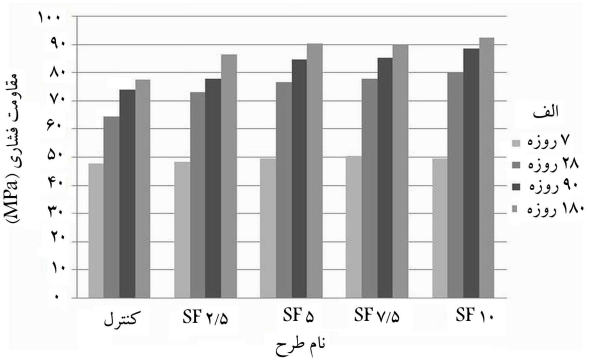
مقدار فوق روان‌ساز لازم برای حفظ کارآیی مخلوط‌های دوجزئی و سه‌جزئی در حد مخلوط کنترل می‌تواند به‌منزله‌ی شاخصی از تأثیر کاربرد مواد مکمل سیمانی بر نیاز آبی بتن تلقی شود. در شکل ۳، مقدار فوق روان‌ساز موردنیاز هر مخلوط نسبت به مخلوط کنترل ارائه شده است. همان‌طور که از نتایج مشخص است، مصرف فوق روان‌ساز در مقایسه با مخلوط کنترل، با کاربرد سرباره کاهش و با مصرف دوده‌ی سیلیسی افزایش می‌یابد. در مخلوط‌های سه‌جزئی شاهد برآیند اثر ۲ ماده‌ی مکمل سیمانی هستیم و تمامی مخلوط‌های سه‌جزئی در مقایسه با مخلوط‌های دوجزئی حاوی مقدار برابر دوده‌ی سیلیسی نیاز به فوق روان‌ساز کمتری داشته‌اند. همچنین به‌جز مخلوط سه‌جزئی حاوی ۱۵٪ سرباره و ۷٫۵٪ دوده‌ی سیلیسی سایر مخلوط‌های سه‌جزئی، نیاز آبی کمتری در مقایسه با مخلوط کنترل داشته‌اند. بر این اساس استفاده از سیمان‌های سه‌جزئی می‌تواند مشکل نیاز آبی بالای مخلوط‌های دوجزئی حاوی دوده‌ی سیلیسی را رفع کند.

۲.۳. نتایج آزمایش مقاومت فشاری

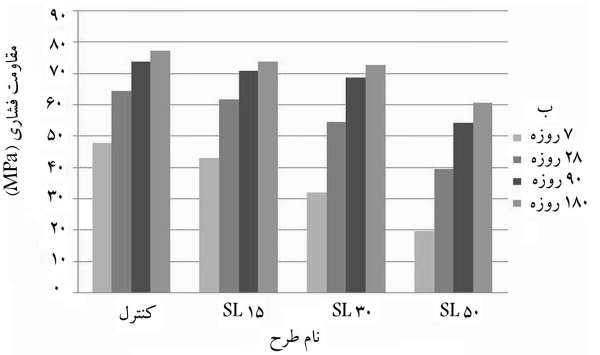
نتایج آزمایش مقاومت فشاری مخلوط‌های دوجزئی مورد مطالعه در شکل ۴، در سنین ۷ تا ۱۸۰ روزه با یکدیگر مقایسه شده‌اند. طرح‌های دوجزئی حاوی دوده‌ی سیلیسی در تمام سنین خصوصاً سنین بالاتر از ۷ روز دارای مقاومتی بیش از نمونه‌ی



شکل ۳. مقدار فوق روان‌ساز لازم برای حفظ کارآیی مخلوط‌های دوجزئی و سه‌جزئی در حد مخلوط کنترل.



الف)بتن دو جزئی حاوی دوده سیلیسی؛

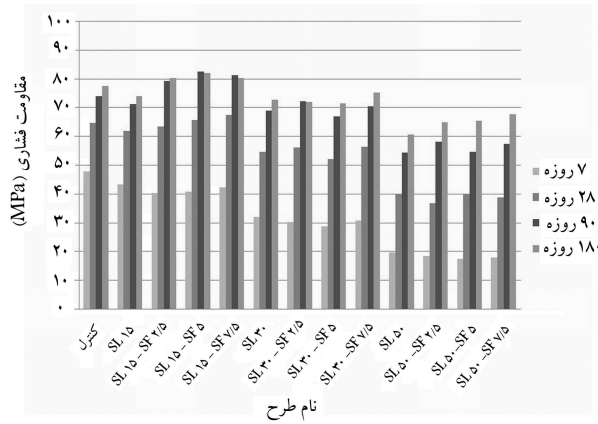


ب)بتن دو جزئی حاوی سرباره.

شکل ۴. مقاومت فشاری مخلوط‌های دوجزئی در مقایسه با مخلوط کنترل.

کنترل هستند. با افزایش میزان مصرف دوده‌ی سیلیسی مقاومت فشاری افزایش می‌یابد. کاربرد ۱۵٪ سرباره به جای سیمان باعث افت جزئی مقاومت نسبت به بتن کنترل شده است. با افزایش درصد جایگزینی سرباره به ۳۰٪، مقاومت فشاری خصوصاً در سنین اولیه کاهش یافته است. با افزایش درصد استفاده از سرباره به ۵۰٪، مقاومت فشاری افت قابل‌توجهی در تمام سنین می‌یابد. مقدار افت مقاومت فشاری ۲۸ روزه‌ی مخلوط‌های دوجزئی حاوی ۱۵، ۳۰ و ۵۰ درصد سرباره در مقایسه با مخلوط کنترل در حدود ۵، ۲۵ و ۵۰ درصد بوده است.

نتایج آزمایش مقاومت فشاری مخلوط‌های سه‌جزئی حاوی سرباره و دوده‌ی سیلیسی موردمطالعه در سنین ۷ تا ۱۸۰ روزه با یکدیگر و مخلوط‌های دوجزئی



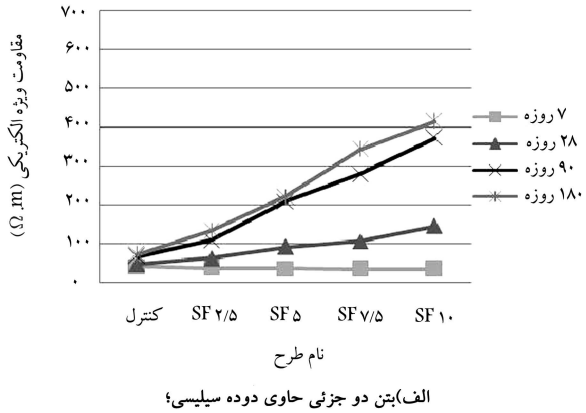
شکل ۵. مقاومت فشاری مخلوط‌های سه‌جزئی در مقایسه با مخلوط کنترل و مخلوط دوجزئی حاوی سرباره.

حاوی سرباره و بتن کنترل در شکل ۵ مقایسه شده‌اند. استفاده از ۲٫۵٪ دوده‌ی سیلیسی به‌صورت توأم با ۱۵٪ سرباره باعث شده است تا افت جزئی مقاومت بتن دوجزئی حاوی ۱۵٪ سرباره در مقایسه با بتن کنترل جبران و حتی در سنین ۹۰ و ۱۸۰ روزه فراتر از بتن کنترل شود. با افزایش مقدار مصرف دوده‌ی سیلیسی عملکرد این بتن سه‌جزئی قدری بهتر می‌شود و افزودن دوده‌ی سیلیسی به بتن‌های دوجزئی حاوی ۳۰ و ۵۰ درصد سرباره فقط باعث افزایش جزئی مقاومت فشاری بتن می‌شود و نمی‌تواند جبران افت مقاومت فشاری آنها را نسبت به بتن کنترل کند.

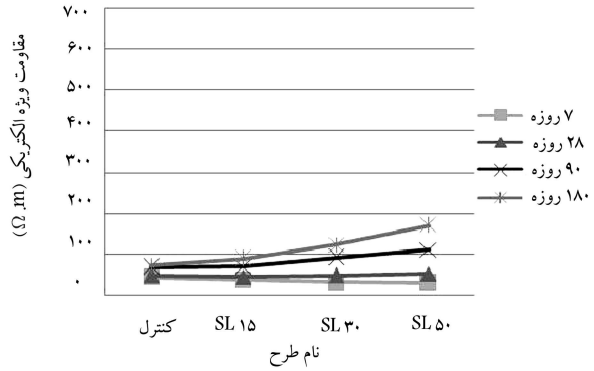
در مخلوط‌های سه‌جزئی حاوی دوده‌ی سیلیسی و سرباره به نظر می‌رسد دوده‌ی سیلیسی دارای دو اثر مختلف در روند توسعه‌ی خواص مخلوط باشد. از یک سو دوده‌ی سیلیسی با واکنش‌پذیری بالا و اثر ریزپرکنندگی باعث ارتقاء مقاومت از سنین ۷ روز به بالا می‌شود و از سوی دیگر استفاده از آن قلیائیت مخلوط را قدری کاهش می‌دهد. با توجه به وابستگی نرخ واکنش سرباره به قلیائیت محیط،[۲۷و۲۸] به نظر می‌رسد افت قلیائیت ناشی از کاربرد دوده‌ی سیلیسی، باعث کمترشدن نرخ واکنش‌های سرباره شده است و بر این اساس در مقادیر استفاده از ۳۰ و ۵۰ درصد سرباره علی‌رغم استفاده از دوده‌ی سیلیسی تا ۷٫۵٪ مواد سیمانی، امکان دستیابی به مقاومت در حد مخلوط کنترل فراهم نشده است. شایان ذکر است که در برخی تحقیقات امکان دستیابی به مقاومت ۲۸ روزه در حد مخلوط کنترل تا حد ۳۵٪ مصرف سرباره و ۳ تا ۶ درصد دوده‌ی سیلیسی گزارش شده است،[۸] که احتمالاً این امر به دلیل واکنش‌پذیری بالاتر سرباره‌ی مصرفی در مقایسه با سرباره‌ی مورداستفاده در این پژوهش بوده‌است. البته برخی پژوهش‌ها نیز مقادیر مناسب اجزاء مخلوط سه‌جزئی سرباره را جهت جلوگیری از افت مقاومت، در حد ۲۵٪ سرباره و ۳ تا ۵ درصد دوده‌ی سیلیسی دانسته‌اند؛[۵] که مطابقت بیشتری با نتایج این پژوهش دارد.

۳.۳. نتایج آزمایش مقاومت الکتریکی

مقاومت ویژه‌ی الکتریکی مخلوط‌های دوجزئی موردمطالعه در شکل ۶ از سنین ۷ تا ۱۸۰ روزه با یکدیگر مقایسه شده‌اند. با جایگزین‌کردن بخشی از سیمان با دوده‌ی سیلیسی مقاومت ویژه‌ی الکتریکی بتن در سن ۲۸ روزه و بالاتر بهبود یافته است و با افزایش میزان مصرف دوده‌ی سیلیسی مقدار بهبود در مقاومت ویژه‌ی الکتریکی افزایش یافته است. کاربرد سرباره تا سن ۲۸ روز، اثر محسوسی در مقاومت ویژه‌ی الکتریکی نداشته‌است؛ ولی در سنین ۹۰ و ۱۸۰ روزه باعث افزایش مقاومت ویژه‌ی الکتریکی نسبت به مخلوط کنترل شده‌است. شایان توجه است که اثر دوده‌ی



الف)بتن دو جزئی حاوی دوده سیلیسی؛



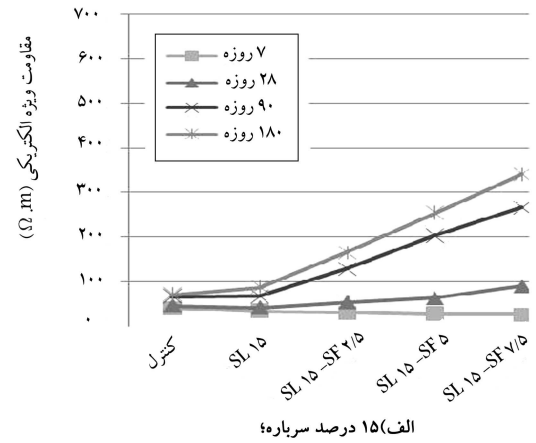
ب)بتن دو جزئی حاوی سرباره.

شکل ۶. مقاومت ویژه‌ی الکتریکی مخلوط‌های دوجزئی در مقایسه با مخلوط کنترل.

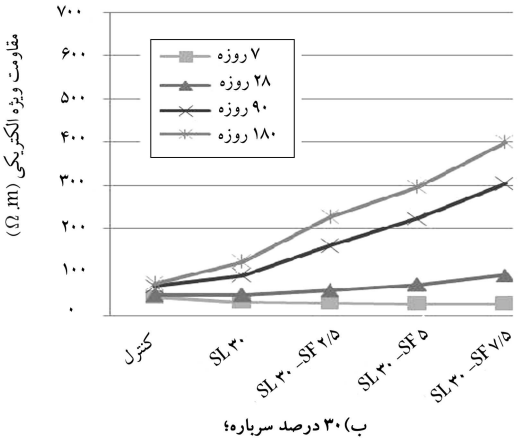
سیلیسی در افزایش مقاومت ویژه‌ی الکتریکی بتن به میزان قابل‌توجهی بیشتر از سرباره بوده است.

در شکل ۷، عملکرد مخلوط‌های سه‌جزئی حاوی سرباره و دوده‌ی‌سیلیسی با مخلوط کنترل و مخلوط دوجزئی حاوی سرباره مقایسه شده است. همان‌طورکه مشخص است، مخلوط‌های سه‌جزئی حاوی ۱۵٪ سرباره و مقادیر مختلف دوده‌ی سیلیسی از سن ۲۸ روزه و بالاتر، دارای مقاومت ویژه‌ی الکتریکی بهتری نسبت به مخلوط‌های دوجزئی دارای سرباره و همچنین نسبت به مخلوط کنترل هستند. نکته‌ی قابل توجه اینکه مخلوط‌های سه‌جزئی حاوی ۳۰٪ و یا ۵۰٪ سرباره و مقادیر مختلف دوده‌ی سیلیسی برخلاف روند مشاهده‌شده برای مقاومت فشاری، دارای مقاومت الکتریکی بالاتری نسبت به مخلوط کنترل و مخلوط‌های دوجزئی حاوی سرباره در سنین ۲۸ روزه و بالاتر بوده‌اند.

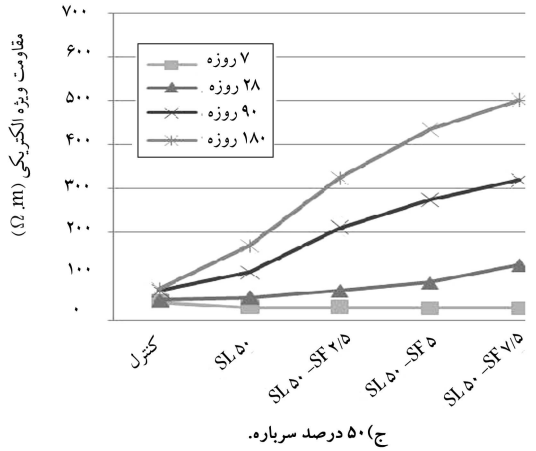
اختلاف در عملکرد مقاومتی مخلوط‌های سه‌جزئی با مقادیر زیاد سرباره (۳۰ و ۵۰ درصد) در مقایسه با عملکرد آنها روی مقاومت الکتریکی را می‌توان ناشی از این دانست که واکنش‌های پوزولانی حجم منافذ را کم نمی‌کنند، بلکه منافذ را ریزتر و گسسته می‌کنند. تأثیر ریزترشدن و گسسته‌شدن منافذ روی مقاومت الکتریکی بسیار بالاتر از تأثیر آنها در خواص مقاومتی است. همچنین مقاومت الکتریکی بتن، علاوه‌بر حجم و ساختار منافذ به ساختار شیمیایی آب منفذی نیز بستگی دارد؛ در صورتی‌که خواص مقاومتی ارتباط خاصی با این پارامترها ندارند. کاربرد سرباره و دوده‌ی سیلیسی به لحاظ رقیق‌سازی و همچنین قابلیت ترکیب یون‌های مختلف نظیر Na^+ و K^+ در فرآورده‌های واکنش، باعث کاهش یون‌های $(OH)^-$ در آب منفذی می‌شوند. با توجه به نقش مهم یون‌های $(OH)^-$ در هدایت الکتریکی بتن،



الف)۱۵ درصد سرباره؛



ب) ۳۰ درصد سرباره؛



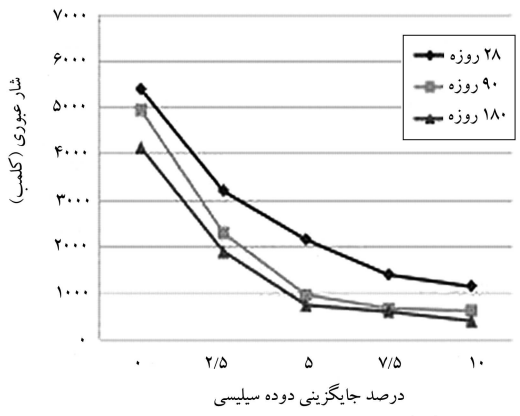
ج) ۵۰ درصد سرباره.

شکل ۷. مقاومت ویژه‌ی الکتریکی مخلوط‌های سه‌جزئی در مقایسه با مخلوط کنترل و مخلوط دوجزئی حاوی سرباره.

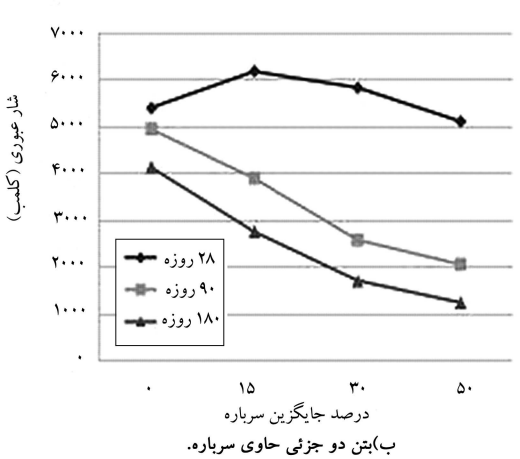
کاهش آنها در بتن‌های حاوی مواد مکمل سیمانی می‌تواند باعث افزایش مقاومت الکتریکی بتن شود.[۲۹]

۴.۳. نتایج آزمایش تسریع‌شده‌ی نفوذ یون کلرید (RCPT)

نتایج آزمایش تسریع‌شده‌ی نفوذ یون کلرید مخلوط‌های دوجزئی مطابق ASTM C۱۲۰۲ در سنین ۲۸، ۹۰ و ۱۸۰ روزه در شکل ۸ ارائه شده است. با اضافه‌شدن دوده‌ی سیلیسی به بتن بار الکتریکی عبوری (شار عبوری) از نمونه در



الف)بتن دو جزئی حاوی دوده سیلیسی؛



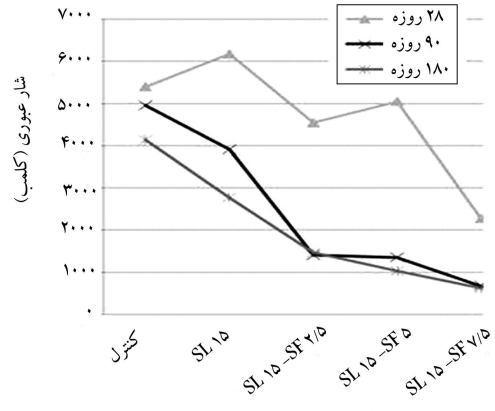
ب)بتن دو جزئی حاوی سرباره.

شکل ۸. شار عبوری مخلوط‌های دوجزئی در مقایسه با مخلوط کنترل.

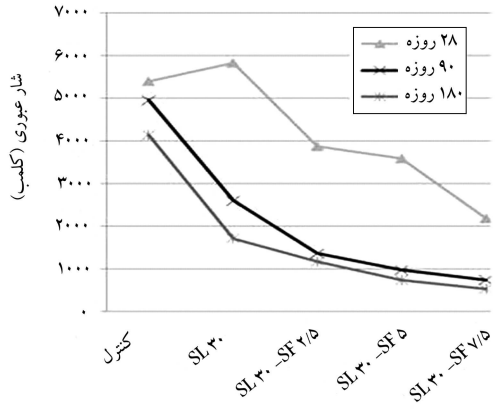
تمام سنین به‌طور قابل ملاحظه‌یی کاهش می‌یابد. با افزایش میزان دوده‌ی سیلیسی شار عبوری از نمونه کاهش بیشتری پیدا کرده است. در سن ۲۸ روزه کاربرد سرباره عمدتاً باعث افزایش شار عبوری در مقایسه با بتن کنترل شده است. لیکن در سن ۹۰ و ۱۸۰ روزه‌ی بتن‌های حاوی سرباره، عملکرد بهتری به لحاظ شار عبوری در مقایسه با بتن کنترل دارند و با افزایش درصد جایگزینی سرباره نیز این عملکرد بهتر می‌شود.

در شکل ۹ نتایج آزمایش RCPT مخلوط سه‌جزئی حاوی سرباره و دوده‌ی سیلیسی با مخلوط دوجزئی حاوی سرباره و مخلوط کنترل در سنین مختلف مقایسه شده است. استفاده‌ی توأم از دوده‌ی سیلیسی باعث کاهش قابل توجه بارالکتریکی عبوری بتن‌های حاوی سرباره در تمام سنین از جمله سن ۲۸ روزه می‌شود. با افزایش مقدار مصرف دوده‌ی سیلیسی، مقدار کاهش در بارالکتریکی عبوری بیشتر می‌شود.

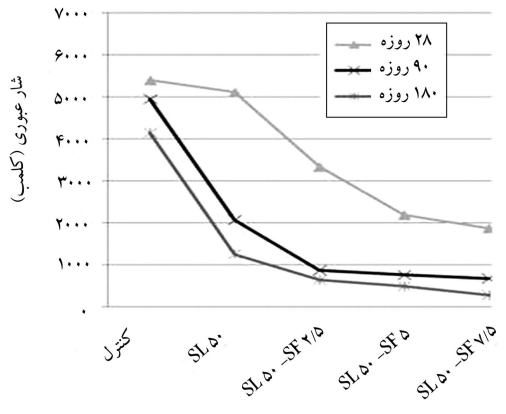
روند مشاهده‌شده به‌صورت کلی با نتایج آزمایش مقاومت الکتریکی مطابقت دارد و نشانگر این است که با استفاده از بتن سه‌جزئی می‌توان عملکرد ضعیف‌تر بتن‌های سرباره‌یی در سن ۲۸ روزه نسبت به بتن کنترل را جبران و ارتقاء بسیار قابل‌توجهی به لحاظ مقاومت در برابر نفوذ یون کلر در سنین ۲۸ روزه و بالاتر ایجاد کرد. با توجه به اینکه در آزمایش RCPT نیز بار الکتریکی عبورکرده از آزمونه به ریزساختار منافذ و همچنین یون‌های انتقال‌دهنده‌ی جریان نظیر $^{-}(OH)$ و $^{-}(Cl)$ بستگی دارد، دلایل ذکرشده برای عملکرد بهتر مخلوط‌های سه‌جزئی در بخش ۳.۳. برای این بخش نیز قابل استناد است.



الف)۱۵ درصد سرباره؛



ب) ۳۰ درصد سرباره؛

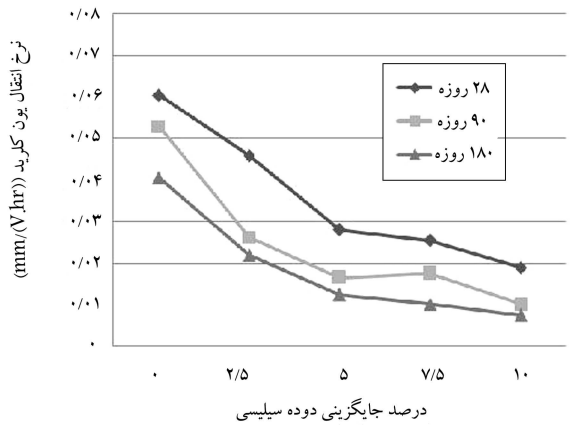


ج) ۵۰ درصد سرباره.

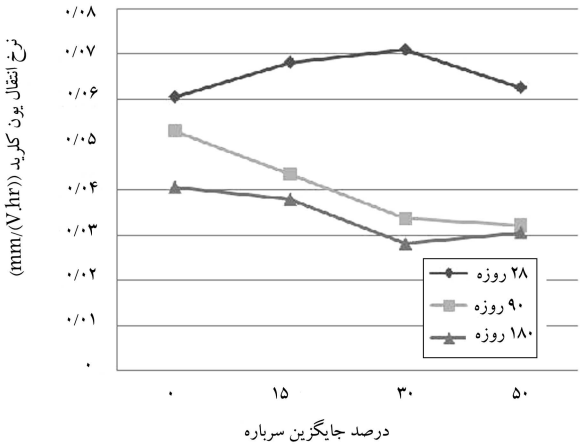
شکل ۹. شار عبوری مخلوط‌های سه‌جزئی در مقایسه با مخلوط کنترل و مخلوط دوجزئی حاوی سرباره.

۵.۳. نتایج آزمایش تسریع‌شده‌ی انتقال یون کلرید (RCMT)

نتایج آزمایش تسریع‌شده‌ی انتقال یون کلرید مخلوط‌های دوجزئی مطابق AASHTO TP۶۴ در سنین مختلف در شکل ۱۰ ارائه شده‌است. با اضافه‌شدن دوده‌ی سیلیسی به بتن، نرخ انتقال یون کلر به‌طور قابل ملاحظه‌یی کاهش می‌یابد و با افزایش مقدار دوده‌ی سیلیسی، نرخ انتقال یون کلرید کاهش بیشتری پیدا می‌کند. کاربرد سرباره در مقادیر مختلف جایگزینی سیمان باعث افزایش نرخ انتقال یون کلرید در سن ۲۸ روزه می‌شود. لیکن در سنین ۹۰ و ۱۸۰ روزه، عملکرد مخلوط‌های



الف)بتن دو جزئی حاوی دوده سیلیسی؛



ب)بتن دو جزئی حاوی سرباره.

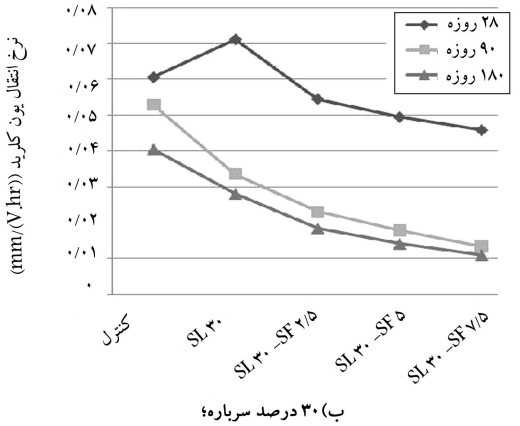
شکل ۱۰. نرخ انتقال یون کلر مخلوط‌های دوجزئی در مقایسه با مخلوط کنترل.

دوجزئی حاوی سرباره نسبت به مخلوط کنترل بهتر می‌شود. ضمناً افزایش مقدار مصرف از ۱۵٪ به ۳۰٪ باعث بهبود در نتیجه‌ی آزمایش RCMT در سنین ۹۰ و ۱۸۰ روزه می‌شود. لیکن تأثیر افزایش مقدار سرباره از ۳۰٪ به ۵۰٪ در کاهش نرخ انتقال یون کلرید جزئی است. شایان ذکر است که عملکرد مخلوط‌های دوجزئی حاوی دوده‌ی سیلیسی حتی در درازمدت به میزان قابل‌توجهی بهتر از مخلوط‌های دوجزئی حاوی سرباره است.

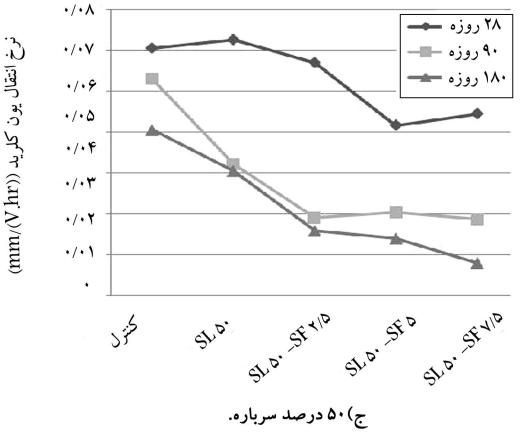
در شکل ۱۱ ، نتایج آزمایش تسریع شده‌ی انتقال یون کلر مطابق TP۶۴ AASHTO برای مخلوط‌های سه‌جزئی حاوی سرباره و دوده‌ی سیلیسی با مخلوط دوجزئی حاوی سرباره و مخلوط کنترل در سنین ۲۸، ۹۰ و ۱۸۰ روزه مقایسه شده است. استفاده از دوده‌ی سیلیسی در بتن‌های حاوی درصدهای مختلف سرباره باعث کاهش نرخ انتقال یون کلرید در تمام سنین شده است، به‌طوری که نرخ نفوذ یون کلر مخلوط‌های سه‌جزئی حاوی دوده‌ی سیلیسی و سرباره حتی در سن ۲۸ روزه نیز کمتر از بتن کنترل است. با افزایش مقدار مصرف دوده‌ی سیلیسی در بتن حاوی سرباره، کاهش نرخ انتقال یون کلرید بیشتر می‌شود.

به‌صورت کلی نتایج آزمایش RCMT روند مشاهده‌شده برای آزمایش‌های مقاومت الکتریکی و RCPT را تأیید می‌کند و امکان جبران ضعف عملکرد ۲۸ روزه‌ی مخلوط‌های حاوی سرباره در سن ۲۸ روزه، از طریق کاربرد توأم با دوده‌ی سیلیسی و همچنین ارتقاع قابل توجه دوام درازمدت آنها را نشان می‌دهد. نکته‌ی

الف)۱۵ درصد سرباره؛



ب) ۳۰ درصد سرباره؛



ج)۵۰ درصد سرباره.

شکل ۱۱. نرخ انتقال یون کلرید مخلوط‌های سه‌جزئی در مقایسه با مخلوط کنترل و مخلوط دوجزئی حاوی سرباره.

قابل توجه اینکه در آزمایش RCMT برخلاف آزمایش‌های مقاومت الکتریکی و RCPT، جریان عبوری از نمونه اندازه‌گیری نمی‌شود و پارامتر اندازه‌گیری‌شده میزان نفوذ یون کلر به داخل نمونه‌ی بتن است. لذا پدیده‌ی کاهش یون‌های $(OH)^-$ به علت استفاده از دوده‌ی سیلیسی و سرباره اثر قابل‌توجهی در نتایج این آزمایش ندارد. تأثیر یون $(OH)^-$ در هدایت الکتریکی بتن باعث شده است تا برخی پژوهشگران نتایج آزمایش‌های مبتنی بر اندازه‌گیری جریان الکتریکی نظیر آزمایش RCPT را در ارزیابی عملکرد بتن‌های حاوی مواد مکمل سیمانی نظیر سرباره و دوده‌ی سیلیسی اغراق‌آمیز بدانند.[۳۰] براین اساس با توجه به تأیید نتایج آزمایش‌های

مقاومت الکتریکی و RCPT توسط آزمایش RCMT به نظر می‌رسد عملکرد بهتر دوام مخلوط‌های سه‌جزئی، ناشی از عواملی نظیر اصلاح ریزساختار و ریزترشدن ابعاد آنها و قابلیت بیشتر مقیدکردن یون کلرید توسط فرآورده‌های واکنش باشد.

۴. نتیجه‌گیری

استفاده‌ی توأم دوده‌ی سیلیسی و سرباره در بتن باعث کاهش نیاز آبی نسبت به بتن حاوی مقدار برابر دوده‌ی سیلیسی می‌شود. همچنین با استفاده از مخلوط‌های سه‌جزئی امکان کاهش نیاز آبی در مقایسه با مخلوط کنترل نیز وجود دارد.

- مخلوط کنترل نسبت به مخلوط‌های دوجزئی و سه‌جزئی عملکردی ضعیف در رابطه با عملکرد دوام حتی در سنین بالا نظیر ۱۸۰ روز داشته است. بر این اساس تأکید ضوابط مختلف بر لزوم استفاده از پوزولان‌ها و مواد مکمل سیمانی همراه سیمان تحت شرایط محیطی بسیار مهاجم قابل توجیه است.
- با استفاده از دوده‌ی سیلیسی در بتن خصوصیات مقاومتی و دوام بتن هم در سنین کم تا ۲۸ روز و هم در سنین بالا (۱۸۰ روز) بهبود می‌یابد. با افزایش میزان مصرف دوده‌ی سیلیسی بهبود بیشتری در خصوصیات بتن مشاهده می‌شود.
- استفاده از سرباره‌ی داخلی به میزان ۱۵٪ جایگزین سیمان موجب کاهش جزئی مقاومت فشاری بتن می‌شود. همچنین در سن ۲۸ روز باعث افت دوام بتن و در سنین بالا باعث بهبود دوام می‌شود. با افزایش میزان جایگزینی سرباره به ۳۰ و ۵۰ درصد، خصوصیات مقاومتی و دوام بتن در سن ۲۸ روز افت می‌کند. در سنین بالاتر نظیر ۹۰ و ۱۸۰ روز افت دوام جبران می‌شود و دوام بهتری را در مقایسه با مخلوط کنترل دارند. لیکن مقاومت فشاری این طرح‌ها خصوصاً برای مخلوط حاوی ۵۰٪ سرباره در درازمدت نیز به میزان قابل‌توجهی کمتر از مخلوط کنترل است.
- با اضافه‌شدن دوده‌ی سیلسی به طرح‌های حاوی ۱۵٪ سرباره مقاومت بهبود می‌یابد و از سن ۲۸ روزه از نمونه‌ی کنترل بیشتر می‌شود. اما تأثیر افزودن دوده‌ی سیلی سی در بهبود مقاومت فشاری بتن حاوی ۳۰ و ۵۰ درصد سرباره ناچیز است.
- مخلوط‌های ساخته‌شده با سیمان سه‌جزئی حاوی سرباره و دوده‌ی سیلیسی در تمام سنین بررسی‌شده، دارای دوام بهتری نسبت به بتن کنترل و بتن دوجزئی حاوی سرباره هستند.

هرچند دوام بتن‌های سه‌جزئی حاوی سرباره و دوده‌ی سیلیسی در سن ۲۸ روزه کمتر از بتن دوجزئی حاوی درصد برابر دوده‌ی سیلیسی است، اما در بلندمدت دارای عملکردی مشابه یا بهتر هستند.

براساس نتایج حاصله چنانچه کسب مقاومت ۲۸ روزه در حد مخلوط کنترل ضروری باشد، مخلوط سه‌جزئی حاوی ۱۵٪ سرباره به همراه ۲٫۵ الی ۵ درصد دوده‌ی سیلیسی مخلوط یا عملکرد مناسب به لحاظ دوام به‌دست خواهد داد. چنانچه مقاومت ۲۸ روزه پایین‌تر از مخلوط کنترل قابل قبول باشد، مخلوط سه‌جزئی حاوی ۳۰٪ سرباره به همراه ۲٫۵ الی ۵ درصد دوده‌ی سیلیسی علاوه‌بر مزایای عملکرد دوام مناسب، امکان دستیابی به مزیت اقتصادی و زیست‌محیطی بالاتر را فراهم خواهد آورد.

تقدیر و تشکر

نویسندگان از سازمان بنادر و کشتیرانی ایران که با حمایت‌های خود، زمینه‌ی انجام این تحقیق را فراهم آورده‌اند تشکر و قدردانی می‌کنند.

منابع (References)

1. Gielen, D.J. and Moriguchi, Y. "Environmental strategy design for the Japanese iron and steel industry–a global perspective", Tsukuba National Institute for Environmental Studies (2001).
2. ACI Committee 233, *Ground Granulated Blast-Furnace Slag as a Cementitious Constituent in Concrete*, ACI Manual of Concrete Practice, Part1, American Concrete Institute, Farmington Hills (2005).
3. Mindess, S., Young, J.F. and Drawin, D., *Concrete*, 2nd. Ed, Prentice Hall (2002).
4. ASTM C989 "Standard specification for ground granulated blast furnace slag for use in concrete and mortars", **4**(02), American society for testing and materials, west conshohocken (2006).
5. Thomas, M.D.A., Hopkins, D.S., Perreault, M. and Cail, K. "Ternary cement in Canada", *Concrete international*, **29**(7), pp. 59-64 (2007).
6. Tikalsky, P. et al., *Development of Performance Properties of Ternary Mixtures: Phase I Final Report*, Report NO. Pooled Fund Study TPF-5 (117), National Center for Concrete Pavement Technology and Iowa State University (2007).
7. Ahmed, M.S., Kayali, O. and Anderson, W. "Chloride penetration in binary and ternary blended cement concretes as measured by two different rapid methods", *Cement and Concrete Composites*, **30**(7), pp. 576-582 (2008).
8. Bleszynski, R., Hooton, R.D., Thomas, M.D.A. and Rogers, C.A. "Durability of ternary blend concrete with silica fume and blast furnace slag: Laboratory and outdoor exposure site studies", *ACI Materials Journal*, **99**(5), pp. 499-508 (2002).
9. Lane, D.S. and Ozyildirim, C., *Combinations of Pozzolans and Ground, Granulated, Blastfurnace Slag for Durable Hydraulic Cement Concrete*, Report No. VTRC 00-R1, Virginia Department of Transportation (1999).
10. Lee, N.P. and Chisholm, D.H., *Durability of Reinforced Concrete Structures Under Marine Exposure in New Zealand*, Study report No.145, BRANS (2005).

11. ACI Committee 234, *Guide for the Use of Silica Fume in Concrete*, ACI Manual of Concrete Practice, Part1, American Concrete Institute, Farmington Hills (2005).
12. Bouzoubaâ, N., Bilodeau, A., Sivasudaram, V., Foumier, B. and Golden, D.M. "Development of ternary blends for high-performance concrete", *ACI Materials Journal*, **101**(1), pp. 19-29 (2004).
13. Nehdi, M.L. and Summer, J. "Optimization of ternary cementitious mortar blendes using factorial experimental", *Materials and Structures*, **35**(8), pp. 495-503 (2002).
14. Assaad, J. and Khayat, K.H., "Formwork pressure of self-consolidating concrete made with various binder types and contents", *ACI Materials Journal*, **102**(4), pp. 215-223 (2005).
15. Gesoğlu, M., Guneyisi, E. and Ozbay, E. "Properties of self-compacting concretes made with binary ternary and quaternary cementitious blends of fly ash, blast furnace slag and silica fume", *Construction and Building Materials*, **23**(5), pp. 1847-1854 (2009).
16. Khayat, K.H., Yahia, A. and Sayed, M. "Effect of supplementary cementitious materials on rheological properties, bleeding, and strength of structural grout", *ACI Materials Journal,* **105**(6), pp. 583-593 (2008).
17. Bágel, L. "strength and pore structure of ternary blended cement mortars containing blast furnace slag and silica fume", *Cement and Concrete Research*, **28**(7), pp. 1011-1022 (1998).
18. Alexander, M.G. and Magee, B.J. "Durability performance of concrete containing condensed silica fume", *Cement and Concrete Research*, **29**(6), pp. 917-922 (1999).
19. Famili, H., Bagheri, A.R and Irajian,M., "Pozzolanic and slag materials in Iran and their utilization in concrete", the first international conference on concrete and development, (In Persain) (2001).
20. Taherinia, A., "Sulfate resisting slag coment", The first seminar on role of admixturel in concrete, (In Persain) (1989).
21. Iranian Standard No.302, "Concrete aggregates, specification" Iran Standard organisation, (In Persain) (2003).
22. ASTM C 1202, "Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration", American society for testing and materials, West conshohochen (2006).
23. AASHTO TP 64, "Predicting chloride penetration of hydraulic cement concrete by the rapid migration procedure", American Association of state Highway and Transportation officers, Washing for DC(2007).
24. Building and housing research center, "National code for durability of concrete in the persian golf environment", Publicational building and housing research center, Iran (In Persain) (2005).
25. Hooton, R.D., Thomas, M.D. and Stanish, A., *Prediction of Chloride Penetration in Penetration in Concrete*, Report No: FHWA-RD-00-14, University of Toronto Department of Civil Engineering (2001).
26. Tang, L. and SØrensen, H.E. "Precision of the Nordic test methods for measuring the chloride diffusion/migration coefficients of concrete", *Materials and Structures*, **34**(8), pp. 479-485 (2001).
27. Hewlett, P.C., *Lea's Chemistry of Cement and Concrete*, Arnold, London, Great Britain (1997).
28. Lothenbach, B., Scrivener, K. and Hooton, R.D. "Supplementary cementitious materials", *Cement and Concrete Research*, **41**, pp. 217-229 (2011).
29. Buenfeld, N.R., et al. "Chloride transport in concrete subjected to electrical field", *A.S.C.E. Journal of Materials in Civil Eng.*, **10**(4), pp. 220-228 (1998).
30. Shi, C. "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), pp. 537-545 (2004).

MECHANICAL AND DURABILITY PROPERTIES OF TERNARY CONCRETES CONTAINING BLAST FURNACE SLAG AND SILICA FUME

A.R. Bagheri(corresponding author)
bagheri@kntu.ac.ir
H. Zanganeh
hamedzanganeh@gmail.com
M.M. Moalemi
mohsen.moalemi@yahoo.com
Dept. of Civil Engineering
K.N.Toosi University of Technology

Sharif Civil Engineering Journal
Volume 29, Issue 4, Page 117-126, Research Note

© Sharif University of Technology

- Received 8 May 2011; received in revised form 16 May 2012; accepted 22 September 2012.

Abstract

In this paper, the potential of using a combination of the blast furnace slag of an Isfahan steel work, and silica fume to achieve concrete with high durability and appropriate rate of strength gain has been investigated. The performance of the ternary concrete is compared with control and binary mixes. The binary concrete studied includes mixes containing slag at cement replacement levels of 15, 30 and 50 percent, and mixes containing silica fume at cement replacement levels of 2.5, 5, 7.5 and 10 percent. The ternary concrete includes a combination of silica fume and slag at various cement replacement levels. The w/b ratio and total cementitious material content was kept constant for all mixes at 0.38 and 420 Kg/m^3, respectively. Concrete mixes were evaluated for compressive strength, electrical resistance, rapid chloride permeability (ASTM C1202 RCPT test) and rapid chloride migration (AASHTO TP64 RCMT test), at various ages up to 180 days.

Combined use of silica fume and slag resulted in reduced water demand, compared to mixes containing silica fume. Using ternary mixes, it was also possible to reduce water demand compared to the control concrete. Use of slag at a 15% replacement level of cement did not cause a considerable reduction in strength properties. For slag at 30% and 50% replacement levels of cement, strength properties were considerably lower than control at all ages.The results show that simultaneous use of silica fume has only a moderate effect in improving the slow rate of strength gain of binary mixes containing slag. Therefore ternary mixes with high slag content have considerably lower strength than control at all ages. The durability of ternary mixes, even at the age of 28 days, was better than the control mix, and the problem of the lower durability of binary mixes containing slag at 28 days can, thus, be overcome through the use of ternary mixes. At later ages, ternary mixes have excellent durability and can even outperform binary mixes containing equal amounts of silica fume. Using an appropriate combination of slag and silica fume, it is possible to obtain ternary mixes with 28 day strength comparable to the control mix, and with considerably improved durability, particularly in the long term.

Key Words: ternary concrete, slag, silica fume, durability, RCPT, RCMT.