

بررسی آزمایشگاهی تأثیر دوده سیلیس، مواد هوازا و نسبت آب به مواد سیمانی بر ریز ساختار و دوام پوسته‌شدگی روسازی‌های بتنی

مجتبی نیلی *

دانشجوی دکتری عمران-مهندسی و مدیریت ساخت، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران.

علی اکبر رضانیپور

استاد دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران.

جعفر سبحانی

عضو هیئت علمی مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، تهران، ایران.

امیر مازیار رییس قاسمی

پژوهشگر مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، تهران، ایران.

چکیده

پوسته‌شدگی در مجاورت نمک‌های یخ‌زدا یکی از چالش‌های اساسی دوام در روسازی‌های بتنی در مناطق سردسیر شناخته می‌شود. در این تحقیق اثر دوده سیلیس و مواد هوازا در روسازی‌های بتنی با سه نسبت آب به سیمان ۰/۳۵، ۰/۴ و ۰/۴۵ بر مقاومت فشاری، مقاومت الکتریکی و دوام بتن در برابر پوسته‌شدگی در مجاورت نمک یخ‌زدا بررسی شده و ساختار میکروسکوپی با استفاده از روش تخلخل سنجی جیوه و تصاویر میکروسکوپ الکترونی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاکی از آن است که بهترین عملکرد در آزمایش پوسته‌شدگی متعلق به نمونه حاوی دوده سیلیس و مواد هوازا می‌باشد. نتایج تخلخل‌سنجی جیوه نشان داد که دوده سیلیس ضمن اصلاح ریزساختار باعث کاهش حجم حفرات کل و شعاع حفره بحرانی نسبت به طرح شاهد گردیده است و از سوی دیگر به علت فعالیت پوزولانی مناسب حجم حفرات کوچکتر از ۱۰ نانو متر را افزایش داده است. تصاویر میکروسکوپ الکترونی طرح‌ها حاکی از آن است که دوده سیلیس به علت فعالیت پوزولانی موثر باعث متراکم‌تر شدن ژل گردید. تصاویر طرح‌های هوادار حاکی از تشکیل حباب‌های کروی، پایدار و دارای توزیع یکنواخت می‌باشد که مشاهدات ریز ساختاری، یافته‌های ماکروسکوپی از جمله دوام پوسته‌شدگی، مقاومت فشاری و مقاومت الکتریکی را تأیید می‌نماید.

واژه‌های کلیدی: پوسته‌شدگی، ریزساختار، دوده سیلیس، مواد هوازا، روسازی بتنی.

۱- مقدمه

انتشار به محل تماس دو لایه و جدا کردن ذرات خمیر و سنگدانه از سطح بتن را دارند و در نهایت سبب پوسته‌شدگی سطح بتن می‌شوند [۱۱،۸].

عوامل مختلفی از قبیل نسبت آب به مواد سیمانی، استفاده از مواد هوازا، عیار سیمان، مواد مکمل سیمانی و مقاومت لایه سطحی بتن بر پوسته‌شدگی بتن در شرایط یخبندان تأثیر دارند. هوازایی در بتن و ملات، مقاومت در برابر پوسته‌شدگی را افزایش می‌دهند. علت این است که ملات‌های هوازایی شده در طی یخ‌زدن منقبض می‌شوند، درحالی‌که ملات‌های بدون حباب هوا منبسط می‌شوند [۱۲] و همزمان فشار هیدرولیکی ناشی از یخ‌زدن آب را کاهش می‌دهند. از طرف دیگر، حباب‌های هوای تولیدشده موجب کاهش آب انداختگی سطحی بتن می‌گردد که در نهایت سبب مقاومت در برابر پوسته‌شدگی می‌گردد [۱۳]. نتایج به‌دست آمده توسط Wu و همکاران [۱۴] حاکی از تأثیر مثبت مواد هوازا بر پوسته‌شدگی بوده است. مواد مکمل سیمان مانند دوده سیلیس نیز به دلیل کاهش تخلخل بتن [۱۵، ۱۶] و افزایش مقاومت ناحیه انتقال [۱۷] باعث افزایش مقاومت بتن می‌شود. به دلیل افزایش در مقاومت فشاری بتن با اضافه کردن دوده سیلیس، مقاومت در برابر پوسته‌شدگی در مجاورت نمک نیز بهبود می‌یابد. همچنین تحقیقات نشان داده است که پارامترهای ریز ساختار از جمله تخلخل و توزیع اندازه حفرات، فاکتورهای مهمی در ارزیابی نفوذپذیری، دوام یخبندان، کرناسیون و مقاومت مکانیکی می‌باشند [۱۸، ۱۹]. علاوه بر این نتایج تحقیقات نشان داده است که در خمیر سیمان با نسبت آب به سیمان ۰/۲۵ با مصرف دوده سیلیس به میزان ۱۰٪ و ۲۰٪، حجم حفرات بزرگتر از ۲۵ نانو به ترتیب ۴۲ و ۷۵ درصد کاهش یافته است [۲۰]. در تحقیقات دیگر، افزایش حجم حفرات ژلی، کاهش قطر بحرانی و اصلاح ریز ساختار را به واکنش پوزولانی ناشی از بکارگیری دوده سیلیس مرتبط نموده اند [۲۱]. مهتا [۲۲] نشان داده است که حفرات بزرگتر از ۵۰۰ آنگستروم که عامل اصلی در کاهش مقاومت و دوام مخلوط می‌باشد در اثر فعالیت پوزولانی به حفرات کوچک تبدیل می‌گردند. نتایج او نشان داده است که با افزودن دوده سیلیس حجم حفرات کوچکتر از ۱۰ نانومتر افزایش و حجم حفرات بین ۱۰۰ تا ۵۰۰۰

در مناطق سردسیر، در شرایط یخبندان، از نمک‌های یخ‌زدا برای یخ‌زدایی روسازی‌ها و پیاده‌روهای بتنی استفاده می‌گردد. این عمل در طی زمان، منجر به پوسته‌شدگی بتن، که یکی از مسایل اصلی دوام بتن در این شرایط آب و هوایی است، می‌شود. پوسته‌شدگی در مجاورت نمک یک خرابی سطحی است که به علت یخ‌زدن محلول نمک روی سطوح بتنی رخ می‌دهد. این خرابی پیش‌رونده شامل جداشدن سنگدانه‌های ریز، خمیر و ملات سخت شده از سطح بتن است. شدت این خرابی با نمایان شدن درشت دانه‌ها به حداکثر می‌رسد. این مشخصات برای اولین بار در دهه ۱۹۵۰ توسط تحقیقات آزمایشگاهی [۱ و ۲] نشان داده شد و پس از آن از طریق تحقیقات کارگاهی تأیید شد [۳]. پوسته‌شدگی بتن در مجاورت نمک ممکن است به تنهایی باعث تخریب روسازی بتنی نگردد. اما این خرابی باعث تسریع ورود مواد شیمیایی مهاجم مانند یون کلرید و سایر مواد خورنده می‌گردد و به گسترش انواع خرابی‌های دیگر منجر می‌شود [۴، ۵]. از طرف دیگر، پوسته‌شدگی باعث افزایش درجه اشباع و در نهایت کاهش مقاومت ناشی از اثر یخبندان داخلی می‌گردد [۶، ۷]. این عوامل عمر مفید روسازی‌های بتنی را کاهش می‌دهند. تاکنون مکانیزم‌های متعددی برای خرابی پوسته‌شدگی بتن در مجاورت نمک ارائه شده است. مکانیزم‌های فشار هیدرولیکی، فشار کریستاله شدن و فشار اسمزی مطرح شدند اما هیچ‌یک از این مکانیزم‌ها توجیه‌کننده تمامی مشخصات خرابی پوسته‌شدگی نمی‌باشند [۵].

Scherer و Valenza [۵، ۸] تحقیقات جامعی را بر روی پوسته‌شدگی در مجاورت نمک انجام دادند و مکانیزم ورقه‌ورقه‌شدن ژلی^۱ را به عنوان عامل اصلی پوسته‌شدگی در مجاورت نمک پیشنهاد دادند. بر اساس این مکانیزم، هنگامی که محلول نمک روی سطح بتن یخ می‌زند، یک ترکیب دو ماده‌ای بتن و یخ تشکیل می‌گردد. چنانچه دمای ترکیب در زیر نقطه ذوب محلول کاهش یابد، لایه یخ ۵ برابر بیشتر از بتن زیرین تمایل به انقباض دارد [۹، ۱۰]. بسته به غلظت محلول، لایه یخ تحت اثر کشش وارد شده بر آن توسط لایه بتنی زیرین، ترک می‌خورد. ترک‌های لایه یخ تمایل نفوذ به لایه سیمانی زیرین و در نتیجه

^۱ glue-spall

آورده شده است. این تغییر در ساختار میکروسکوپی

به دلیل تأثیر دوده سیلیس بر اصلاح ریز ساختار در ناحیه مرزی ITZ بوده است.

Zhang و همکاران [۲۱] تأثیر میزان حباب تولید شده در بتن را بر منحنی توزیع اندازه حفرات با روش تخلخل سنجی جیوه بررسی کردند. نتایج حاکی از آن است که در صورت هوادار کردن بتن به میزان ۴ تا ۵ درصد توزیع اندازه حفرات به نحو مطلوبی در خمیر سیمان صورت می‌گیرد و در صورتی که میزان هوا به محدوده ۷ تا ۱۰ درصد برسد، فاصله حباب‌ها از یکدیگر کاهش یافته و ضمن کاهش قابل توجه مقاومت فشاری عملکرد مناسبی از هوازایی در برابر دوام بتن نمی‌توان انتظار داشت. مطالعات انجام شده توسط Wu و همکاران [۲۳] در خصوص تأثیر دوده سیلیس، بر ریز ساختار بتن فوق توانمند، حاکی از آن است که حجم کل منافذ موئنه در محدوده قطر های ۱۰ نانو تا ۵ میکرون به طور قابل توجهی کاهش یافته است و کاهش حفرات موئنه بزرگتر از ۵۰ نانو نیز باعث بهبود مقاومت مکانیکی و نفوذپذیری گردیده است.

در این تحقیق، اثر دوده سیلیس بر میزان پوسته‌شدگی روسازی‌های بتنی حاوی مواد هوازا و بدون این مواد در سه نسبت آب به مواد سیمانی، مورد ارزیابی قرار گرفته است. از سوی دیگر تأثیر دوده سیلیس و همچنین مواد هوازا بر روند کسب مقاومت فشاری و مقاومت الکتریکی بتن‌ها تعیین گردیده است. جهت ارزیابی نتایج، ساختار تخلخلی نمونه‌ها توسط روش تخلخل سنج جیوه اندازه‌گیری شده تا نقش عوامل تعیین‌کننده در خواص میکروسکوپی توسط منحنی‌های توزیع اندازه حفرات تبیین گردد. همچنین طرح‌های مختلف از طریق تصاویر میکروسکوپ الکترونی با یکدیگر مقایسه گردیده‌اند تا نقش دوده سیلیس در تراکم ژلی و همچنین استقرار حباب‌های هوای عمدی تولید شده در خمیر سیمان مورد ارزیابی قرار گیرد.

۲- برنامه آزمایشگاهی

۲-۱- مصالح و طرح‌های مخلوط

در این تحقیق از سیمان پرتلند نوع ۱-۴۲۵ استفاده شده است. دوده سیلیس کارخانه فرو آلیاژ ازنا به‌عنوان جایگزین بخشی از سیمان در تعدادی از طرح‌ها مورد استفاده قرار گرفته است. مشخصات شیمیایی و فیزیکی سیمان و دوده سیلیس در جدول ۱

جدول ۱- مشخصات شیمیایی و فیزیکی سیمان و دوده سیلیس

ترکیب شیمیایی (%)	سیمان	
	۱-۴۲۵	پوزولان دوده سیلیس
CaO	۶۳/۸۲	۰/۵
SiO ₂	۲۰/۷۸	۹۳/۶
Al ₂ O ₃	۴/۶۵	۱/۳
Fe ₂ O ₃	۴/۱۶	۹
MnO	۰/۰۹	۰/۰۹
MgO	۱/۲۴	۱
Na ₂ O	۰/۳۴	۰/۳۶
K ₂ O	۰/۶۵	۰/۹
TiO ₂	۰/۳۱	۰/۶۷
SO ₃	۱/۴۹	<۰/۱
C ₃ S	۵۹	-
C ₂ S	۱۵	-
C ₃ A	۵/۳	-
C ₄ AF	۱۳	-
وزن مخصوص	۳/۱۵	۲/۱۴
نرمی (cm ² /gr)	۳۲۹۹	۲۳۰۰۰۰
افت سرخ شدن	۱/۳۵	۱/۷۷

برای همه طرح‌های مخلوط، از شن شکسته به‌عنوان سنگ‌دانه درشت با حداکثر اندازه ۱۹ میلیمتر و ماسه طبیعی به‌عنوان سنگ‌دانه ریز استفاده شده است. وزن مخصوص سنگ‌دانه درشت و ریز به ترتیب ۲۵۲۰ kg/m³ و ۲۵۶۰ kg/m³ می‌باشد. همچنین جذب آب سنگ‌دانه درشت ۲/۲٪ و سنگدانه ریز ۲/۹٪ با مدول نرمی ۳/۲ می‌باشد. در ساخت مخلوط‌ها برای رسیدن به کارایی مطلوب از فوق روان‌کننده نسل سوم با پایه پلی‌کربوکسیلیک اتر با چگالی ۱/۱ استفاده گردید. افزودنی هوازا بر پایه مواد شوینده گیاهی برای رسیدن به مقدار هوای مطلوب استفاده شد. بر اساس استاندارد ACI 201 [۲۴] حباب هوای

مورد نیاز در شرایط شدید و در معرض چرخه های یخ زدن و آب شدن (روسازی های بتنی، عرشه پل ها، مخازن آب و...) برای بتن ساخته شده با ماکزیمم اندازه سنگدانه برابر با ۱۹ میلی متر $6 \pm 1/5$ درصد توصیه شده است. در این تحقیق ۱۲ طرح مخلوط شامل بتن با حباب هوا و بدون حباب هوا با نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۳۵، ۰/۴ و ۰/۴۵ ساخته شده است. مشخصات طرح های مخلوط بتن در جدول ۲ ارائه شده است. همه طرح های مخلوط حاوی 375 kg/m^3 مواد سیمانی هستند.

جدول ۲- طرح های مخلوط بتن

نام طرح	W/B	شن (kg/m^3)	ماسه (kg/m^3)	دوده سیلیس (kg/m^3)	افزودنی هوازا (%)	هوای بتن تازه (%)	فوق روان کننده (%)	اسلامپ (mm)
C35	۰/۳۵	۸۱۱/۸	۹۹۲/۲	-	-	۱/۹	۰/۴۵	۳۵
C35AE	۰/۳۵	۷۶۶/۲	۹۳۶/۵	-	۰/۰۳۵	۶/۵	۰/۴۵	۴۰
C35SF8	۰/۳۵	۸۱۲/۵	۹۹۳/۱	۳۰	-	۲/۳	۰/۵۵	۳۰
C35SF8AE	۰/۳۵	۷۷۸/۴	۹۵۱/۴	۳۰	۰/۱۱	۶/۸	۰/۵۵	۳۵
C40	۰/۴	۸۱۵/۱	۹۹۶/۲	-	-	۱/۸	۰/۲۵	۴۰
C40AE	۰/۴	۹۸۴/۹	۸۰۵/۸	-	۰/۰۴۵	۶	۰/۲۵	۴۵
C40SF8	۰/۴	۹۷۹/۸	۸۰۱/۷	۳۰	-	۲/۲	۰/۳۵	۳۰
C40SF8AE	۰/۴	۷۷۶/۴	۹۵۸/۹	۳۰	۰/۰۹	۶/۵	۰/۳۵	۳۵
C45	۰/۴۵	۷۹۳/۸	۹۷۰/۲	-	-	۲	-	۶۰
C45AE	۰/۴۵	۷۴۲/۶	۹۰۷/۶	-	۰/۰۳۴	۵/۵	-	۷۰
C45SF8	۰/۴۵	۷۹۸/۲	۹۶۴/۶	۳۰	-	۱/۸	-	۳۰
C45SF8AE	۰/۴۵	۷۴۳/۷	۹۰۸/۹	۳۰	۰/۰۸	۵/۴	-	۳۵

۲-۲- آزمون ها و روش ها

نمونه ها در آون با دمای ۶۰ درجه تا وزن ثابت نگهداری شدند. زاویه تماس و کشش سطحی به ترتیب ۱۴۰ درجه و 480 mN/m می باشد. ریز ساختار نمونه های بتنی با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مورد مطالعه قرار گرفته است. بدین منظور جهت انجام آزمایش نمونه های مکعبی به ابعاد 10 mm برش داده شد و سپس در محفظه مخصوص، خشک و با طلا روکش شده است. آزمایش مقاومت الکتریکی ویژه سطحی نمونه ها با استفاده از دستگاه مقاومت الکتریکی چهار نقطه ای (روش ونر) بر اساس AASHTO T358-17 [۲۷] در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه اندازه گیری گردید.

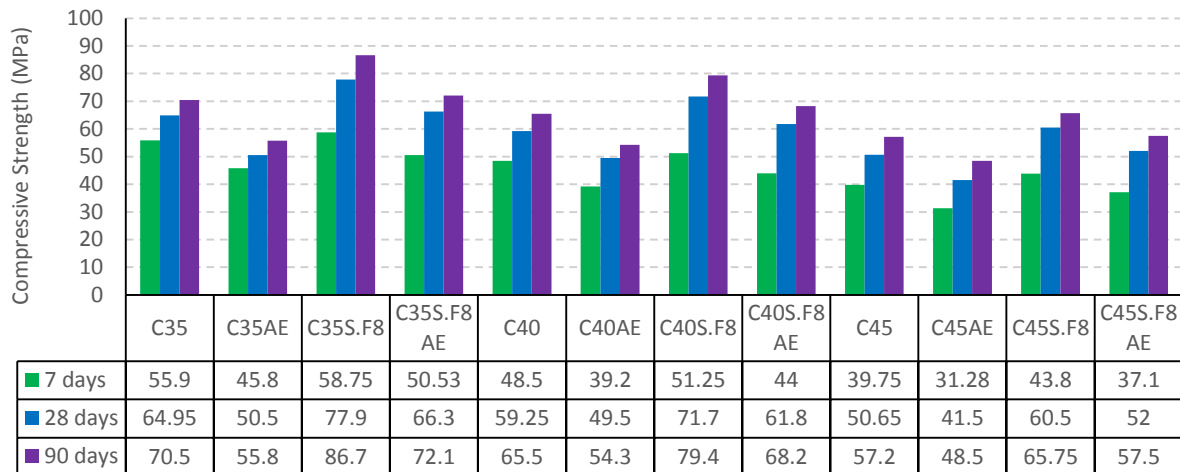
آزمایش مقاومت فشاری در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روز بر اساس BS EN 12390-3 [۲۵] بر روی آزمون های مکعبی بتنی به ابعاد $100 \times 100 \times 100$ میلیمتر انجام شد. آزمایش دوام در برابر پوسته شدگی در مجاورت نمک بر اساس ASTM C672 [۲۶] انجام شد. برای اندازه گیری ساختار تخلخل و توزیع اندازه منافذ، با استفاده از تخلخل سنج جیوه ای (MIP) به وسیله دستگاه Porosimeter PASCAL 440 و Porosimeter PASCAL 140 به ترتیب برای اندازه گیری حفرات نانویی و میکرونی استفاده شده است. دستگاه مذکور قادر است جیوه را تا فشار ۴۱۴ مگاپاسکال به داخل حفرات وارد نماید و شعاع حفرات را اندازه گیری نماید. جهت انجام آزمایش نمونه ای در اندازه کوچکتر از ۱۰ میلیمتر از آزمون ها جدا و با قرار دادن در الکل ایزوپروپرانول از ادامه هیدراسیون جلوگیری به عمل آمد. سپس

۳- نتایج آزمایشگاهی و تفسیر نتایج

۳-۱- مقاومت فشاری

نتایج مقاومت فشاری نمونه های بتنی در شکل ۱ نشان داده شده

است. همانطور که انتظار می‌رود، با افزایش سن، مقاومت فشاری تمامی نمونه‌ها افزایش یافته است که علت آن پیشرفت بیشتر واکنش‌های هیدراسیون سیمان و واکنش پوزولانی در طول زمان می‌باشد. همچنین با کاهش نسبت آب به مواد سیمانی، مقاومت فشاری نمونه‌ها افزایش می‌یابد.



شکل ۱- مقاومت فشاری مخلوط‌های بتن

هوای وارد شده در نمونه‌های بتنی حاوی دوده سیلیس اثر کمتری روی مقاومت فشاری دارد و این از مزایای کاربرد دوده سیلیس می‌باشد. بیشترین مقاومت فشاری در سنین ۲۸ و ۹۰ روز برابر ۷۷/۹ و ۸۶/۷ مگاپاسگال و متعلق به نمونه C35SF8 بوده است. به نظر می‌رسد این بهبود مقاومت فشاری بتن‌ها به علت نسبت آب به سیمان کم و استفاده از دوده سیلیس بوده است.

۳-۲- پوسته شدگی در مجاورت نمک

نمونه‌ها تحت چرخه‌های یخ زدن و آب شدن در حضور نمک‌های یخ زدا بوسیله معیارهای چشمی بر اساس ASTM C672 ارزیابی شدند. بر اساس این استاندارد، معیارهای آزمون چشمی بین ۰ تا ۵ رده‌بندی می‌گردند. رده پوسته شدگی اندازه‌گیری شده پس از ۵۰ چرخه یخ زدن و آب شدن در جدول ۳ نشان داده شده است.

نتایج نشان می‌دهد که مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی حاوی حباب هوا، کمتر از نمونه بتنی بدون حباب هوا است. علت این پدیده افزایش میزان حفرات و تخلخل بتن، در صورت ایجاد کردن حباب هوا در بتن با استفاده از مواد حباب‌هوازا است. وجود حباب‌های ایجاد شده در بتن باعث تمرکز و تشدید تنش و همچنین تسریع رشد و انتشار ترک‌ها و ریز ترک‌ها می‌شود. در نتیجه کاهش مقاومت فشاری یکی از معایب استفاده از سیستم حباب‌هوازا ایجاد شده در بتن است.

با توجه به نتایج، ملاحظه می‌شود که کاهش مقاومت فشاری در اثر استفاده از مواد هوازا برای نمونه‌های بتنی حاوی دوده سیلیس کمتر از نمونه‌های بتنی بدون دوده سیلیس می‌باشد. این پدیده می‌تواند به دلیل پر شدن خلل و فرج موجود در خمیر سیمان و تقویت ناحیه انتقال در بتن سخت شده توسط دوده سیلیس باشد. بنابراین حباب

جدول ۳- رده خرابی پوسته شدن بتن در مجاورت نمک پس از ۵۰ چرخه برای طرح‌های مختلف بر اساس استاندارد ASTM C672

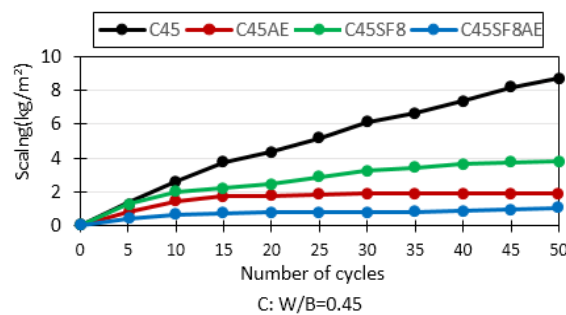
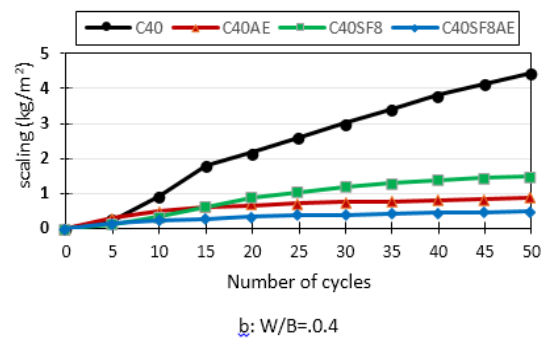
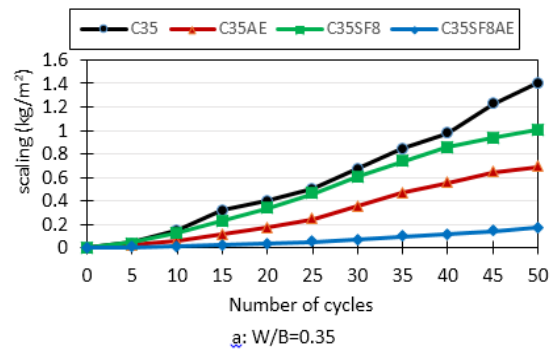
نام طرح	C45	C45AE	C45SF8	C45SF8AE	C35	C35AE
رده خرابی	۵	۴	۵	۳	۴	۲
نام طرح	C35SF8	C35SF8AE	C40	C40AE	C40SF8	C40SF8AE
رده خرابی	۳	۱	۵	۳	۴	۲

ASTM C672 و نتایج ارزیابی مقدار ذرات پوسته شده از سطح با هم مطابقت دارند. این نتایج، نشان می دهد که در طرح های بدون مواد هوازا، عملکرد بتن های حاوی دوده سیلیس، در این آزمایش مناسب تر بوده و هوازایی، عملکرد بهتری نسبت به دوده سیلیس داشته است. این بدان معناست که مهم ترین پارامتر اثرگذار بر مقاومت پوسته شدگی بتن استفاده از هوازایی در بتن می باشد که در تحقیقات Remzi و همکاران [۲۸] نیز به آن اشاره شده است. همچنین در طرح های با مواد هوازا نیز عملکرد بتن های حاوی دوده سیلیس و هوازا بهتر می باشد.

در شکل های ۳ و ۴، تصاویر مقایسه ای بین پوسته شدگی سطحی مخلوط های مختلف بعد از ۵۰ چرخه نشان داده شده است. نتایج ارائه شده نشان می دهد که حباب های وارد شده در بتن، مقاومت در برابر پوسته شدگی در مجاورت نمک را بهبود می بخشد. بطوریکه میزان ذرات پوسته شده را در نسبت های آب به سیمان ۰/۴۵، ۰/۴ و ۰/۳۵ به ترتیب ۰/۷۷، ۰/۸۰ و ۰/۵۰ کاهش داده است. حباب های ایجاد شده در بتن از سه طریق در جهت بهبود پوسته شدگی مفید می باشند: ۱- کاهش آب انداختگی در اثر حباب زایی [۱۳ و ۲۹]. ۲- ایجاد فضای مناسب برای ورود یخ و مکش مایعات موجود در خلل و فرج ماتریس بتن. ۳- کاهش نفوذ محلول نمک به داخل بتن و قطع کردن کانال ها و حفره های به هم پیوسته در خمیر سیمان.

Powers و Helmuth [۳۰] در تحقیقات خود به این نتیجه رسیدند که بتن حاوی حباب هوا، به دلیل شکل گیری یخ در حفرات و مکیدن مایعات موجود در خلل و فرج اطراف، منقبض می شود و در نتیجه سبب کاهش پوسته شدگی می شود. محققین دیگر نشان داده اند که حباب هوا باعث کاهش آب انداختگی و در نتیجه افزایش مقاومت سطح می شود و این افزایش مقاومت لایه سطحی، باعث کاهش پوسته شدگی می گردد [۳۱]. همچنین در صورت استفاده از مواد هوازا، یخ زدن اولیه در حباب هوا، مکشی را به محلول منفذی وارد می کند که باعث فشرده شدن ساختار حفرات می شود. در واقع فشرده شدن ماتریس تخلخل به دلیل یخ زدن در حباب های هوا می تواند سبب کاهش تنش مخرب شود. بنابراین تأثیر حباب زایی در بتن به حدی است که محققین دریافته اند که سرد شدن نمونه بتنی هوازایی شده تا دمای 18°C معادل سرد شدن نمونه بتنی بدون هوازا تا دمای حدود 12°C است [۵].

همانطور که مشاهده می شود پس از ۵۰ چرخه یخ زدن و آب شدن نمونه C45 با رده خرابی ۵ بیشترین میزان پوسته شدگی و نمونه C35SF8AE طرح هوادار حاوی دوده سیلیس با رده خرابی ۱ کمترین میزان پوسته شدگی را دارند. وزن ذرات جدا شده از سطح نمونه های بتن در اثر نمک های یخ زدا در شکل ۲ ارائه شده است.



شکل ۲- وزن ذرات جدا شده از سطح نمونه های بتن در اثر نمک های یخ زدا

نتایج نشان می دهد که کمترین میزان پوسته شدگی متعلق به C35SF8AE به مقدار ۱۹۰ گرم بر مترمربع می باشد که بر اساس مشاهده چشمی نیز در رده ۱ (پوسته شدگی بسیار ناچیز) طبقه بندی گردیده است. از سوی دیگر طرح C45 نیز با مقدار پوسته شدگی ۸۶۷۸ گرم بر مترمربع در رده ۵ (پوسته شدگی شدید)، ضعیف ترین عملکرد را در آزمایش دوام پوسته شدگی نشان داده است. همانگونه که مشاهده می شود، نتایج بازرسی چشمی بر اساس

می‌کند. از سوی دیگر بهبود ریز ساختار خمیر نیز به واسطه مکانیزم‌های متعدد همچون ارتقا درجه پلیمریزاسیون $C-S-H$ و کاهش نواحی ضعیف ریزساختاری با حذف کریستال‌های هیدروکسید کلسیم و تبدیل آن‌ها به $C-S-H$ می‌تواند به بهبود مقاومت در برابر پوسته شدگی سطحی منجر گردد. همچنین دوده سیلیس سبب کاهش نفوذپذیری در بتن و در نتیجه مقاومت در برابر پوسته شدگی می‌گردد. نتایج این تحقیق حاکی از آن است که بتن‌های هوادار حاوی دوده سیلیس بهترین عملکرد را در برابر پوسته شدگی از خود نشان داده است. به طوری که مقدار پوسته شدگی در هر ۳ طرح مخلوط $C40S.F8AE$, $C45S.F8AE$ و $C35S.F8AE$ به ترتیب با ۱/۰۶۷ و ۰/۴۹ و ۰/۱۷۰ کیلوگرم بر مترمربع کمترین میزان پوسته شدگی را در بین طرح‌های مخلوط بتن داشته است. بخشی از بهبود در عملکرد بتن‌های هوادار حاوی دوده سیلیس می‌تواند به علت نفوذ کمتر محلول به داخل بتن حاوی حباب هوا باشد. زیرا دوده سیلیس که خاصیت پوزولانی مناسبی دارد، حفرات به هم پیوسته بتن سخت شده را پر کرده و فضاهای بهم پیوسته بهبود و نفوذ محلول به داخل بتن کاهش یافته و در نتیجه میزان یخ موجود در داخل بتن کاهش می‌یابد. از طرف دیگر حباب هوا نیز برای کنترل انبساط محلول یخ‌زده وجود دارد. پس می‌توان نتیجه گرفت که ترکیب دوده سیلیس و افزودنی هوازا گزینه مطلوبی می‌باشد. دوده سیلیس نفوذپذیری را کاهش داده و پایداری بهتر هوا در بتن تازه با یک فاصله حباب‌های یکنواخت را موجب می‌گردد و به این ترتیب بهترین مقاومت در برابر پوسته شدگی را در مقایسه با طرح‌های دیگر نتیجه می‌دهد. همچنین، نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که کاهش نسبت آب سیمان سبب می‌شود نفوذپذیری بتن کم شده و سبب محدود کردن نفوذ آب و مایع یخ‌زدا به درون بتن شده و بتنی مقاوم در برابر تنش‌های ایجاد شده نتیجه می‌دهد.

۳-۳- مقاومت الکتریکی

نتایج آزمایش مقاومت الکتریکی سطحی در شکل ۵ نشان داده شده است. مقاومت الکتریکی بتن به طور کلی به دو عامل ریز ساختار خمیر سیمان و قابلیت رسانایی مایع منفذی بستگی دارد [۳۲] که شامل میزان بهم پیوستگی و یا پیچیدگی (Tortuosity)، شبکه منافذ موئینه و وجود یون‌های مختلف در مایع منفذی می‌باشد و



a- C40



b- C40AE



c- C40SF8



d- C40SF88A

شکل ۳- خرابی پوسته شدگی نمونه‌های بتنی در مجاورت نمک پس از ۵۰ چرخه یخ‌زدن و آب شدن ($W/B=0.4$)



a- C35



b- C35AE



c- C35SF8

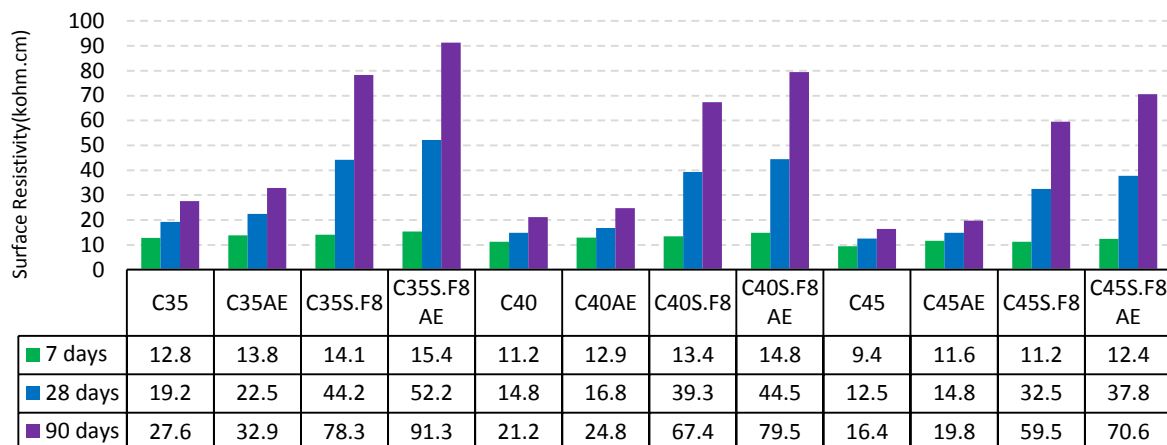


d- C35SF8AE

شکل ۴- خرابی پوسته شدگی نمونه‌های بتنی در مجاورت نمک پس از ۵۰ چرخه یخ‌زدن و آب شدن ($W/B=0.35$)

نتایج تحقیق حاضر نشان می‌دهد که با اضافه کردن دوده سیلیس میزان پوسته شدگی در نسبت‌های آب به سیمان ۰/۴۵، ۰/۴ و ۰/۳۵ به ترتیب ۵۶٪، ۶۶٪ و ۲۸٪ کاهش یافته است. علت آن بهبود ریز ساختار ناحیه انتقالی سنگ‌دانه از طریق کاهش اندازه کریستال‌های هیدروکسید کلسیم و تبدیل آن به $C-S-H$ می‌باشد که در نتیجه پیوستگی بهتری بین سنگ‌دانه و خمیر سیمان برای غلبه بر تنش‌های کششی در چرخه‌های متعدد یخ‌زدن و آب شدن ایجاد

می تواند شاخص مناسبی برای تخمین ساختار داخلی و شبکه تخلخلی بتن مورد توجه قرار گیرد.



شکل ۵- تغییرات مقاومت الکتریکی نمونه های بتنی

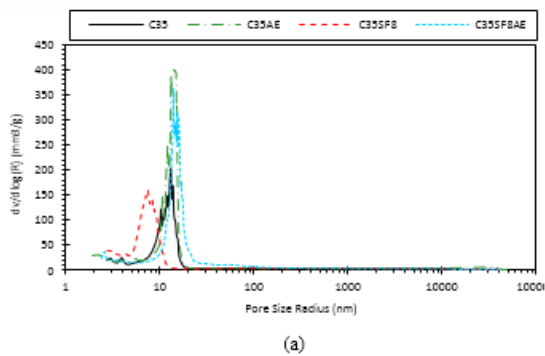
طرح های شاهد افزایش داشته اند. با مقایسه تأثیر جایگزینی سیمان با دوده سیلیس بر نتایج مقاومت فشاری و مقاومت الکتریکی می-توان نتیجه گرفت که واکنش های پوزولانی ارتباطات منافذ را محدود و حفرات بزرگ را به حفرات کوچک تر تبدیل کرده است. همان طور که مشاهده می گردد تأثیر دوده سیلیس در بهبود مقاومت الکتریکی بسیار بیشتر از تأثیر آن بر مقاومت فشاری بوده است. همانطور که در شکل ۵ مشاهده می شود حباب هوای عمدی سبب افزایش نسبی مقاومت الکتریکی سطحی شده است. از آنجا که عمده جریان الکتریکی از داخل خمیر سیمان انجام می شود، حباب های هوای عمدی داخل بتن به عنوان یک نارسا عمل کرده و سبب افزایش مقاومت الکتریکی بتن گردیده است.

همان گونه که مشاهده می شود، مقاومت الکتریکی تمام طرح ها با گذشت زمان به طور قابل ملاحظه ای افزایش پیدا کرده است. این افزایش در مقاومت الکتریکی را می توان به کاهش حجم فضاهای خالی موجود در بتن در اثر پیشرفت هیدراسیون نسبت داد. در نگاه کلی کاهش حجم فضاهای خالی موجود در بتن سخت شده منجر به کم بودن الکترولیت لازم برای عبور جریان از توده خمیر سیمان و افزایش مقاومت الکتریکی اندازه گیری شده خواهد شد. نتایج این تحقیق حاکی از آن است که طرح های حاوی دوده سیلیس افزایش کمی در مقاومت الکتریکی سن کوتاه مدت (۷ روزه) در پی داشته است. این در حالی است که مقاومت الکتریکی در سن ۲۸ و ۹۰ روز افزایش قابل توجهی داشته است. بطوریکه مقاومت الکتریکی بتن های حاوی دوده سیلیس در سن ۲۸ روز برای نسبت های آب به مواد سیمانی ۰/۴۵، ۰/۴۰ و ۰/۳۵ به ترتیب ۱۶۰٪، ۱۶۵٪ و ۱۳۰٪ و در سن ۹۰ روز ۲۶۲٪، ۲۱۸٪ و ۱۸۴٪ رشد نسبت به نمونه شاهد داشته است. به نظر می رسد عامل اصلی، واکنش های پوزولانی می باشد که باعث کاهش رسانایی مایع منفذی می گردد. یون های OH⁻ که در واکنش های پوزولانی مصرف می شوند مهم ترین نقش را در رسانایی مایع منفذی بتن دارند [۳۳]. در نتیجه با مصرف آن ها مقاومت الکتریکی بتن به شدت افزایش می یابد. بیشترین میزان مقاومت الکتریکی در بتن های هوادار حاوی دوده سیلیس بوده است. به نحوی که مقاومت الکتریکی طرح های هوادار حاوی دوده سیلیس با نسبت آب به سیمان ۰/۴۵، ۰/۴ و ۰/۳۵ در سن ۲۸ روز به ترتیب ۲۰۲٪، ۲۰۰٪ و ۱۷۱٪ نسبت به

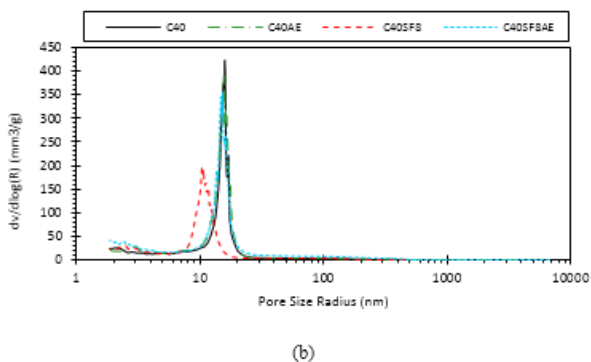
۳-۴- بررسی ریز ساختار با استفاده از تخلخل سنجی نفوذ جیوه

ساختار تخلخلی طرح های مخلوط با روش تخلخل سنجی نفوذ جیوه (MIP) اندازه گیری شدند. منحنی های توزیع اندازه حفرات و همچنین منحنی های مشتق توزیع اندازه حفرات $dV/\log(d(R))$ طرح های مخلوط در شکل های ۶ و ۷ نشان داده شده است. حجم تجمعی کل منافذ قابل نفوذ و شعاع حفره بحرانی در جدول ۴ آورده شده است. نتایج تحقیقات نشان داده است که اندازه حفره بحرانی که متناظر با مقدار ماکزیمم در منحنی $dV/\log(d(R))$ می باشد ارتباط قوی با نفوذپذیری و دوام در مواد پایه سیمانی دارد [۳۴].

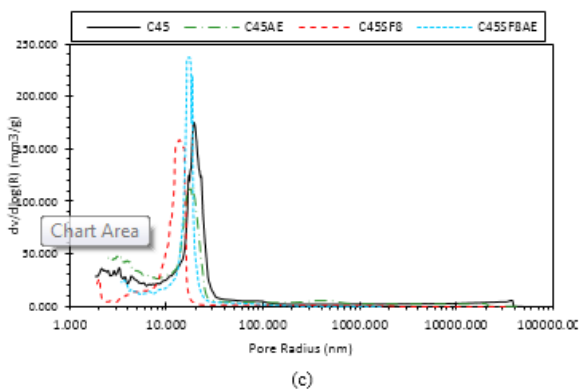
سیمان و کاهش در تخلخل کل می‌باشد. یعنی حفرات بزرگ به حفرات کوچک‌تر تقسیم شده و در نتیجه ریزساختار ملات سیمان اصلاح می‌شود. در حقیقت واکنش پوزولانی بین دوده سیلیس و هیدروکسید کلسیم حاصل از هیدراسیون و تشکیل ژل ثانویه باعث اصلاح ریزساختار و تغییر در توزیع حفرات از لحاظ اندازه و حجم می‌گردد.



(a)

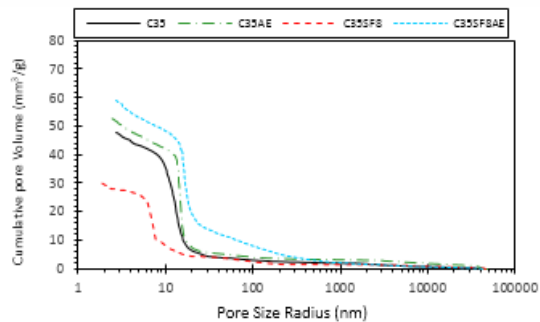


(b)

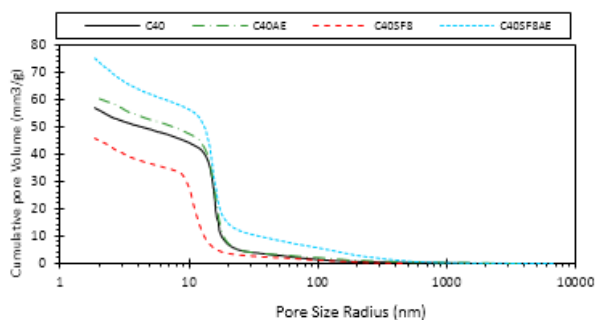


(c)

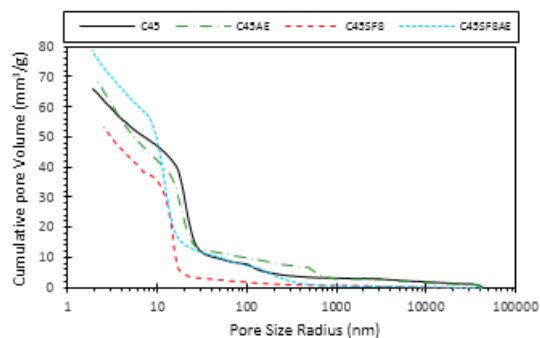
شکل ۷- نمودار دینامیک توزیع اندازه منافذ برای طرح های $W/B = 0.35$ (a) و $W/B = 0.40$ (b) و $W/B = 0.45$ (c) در $w/b=0.35$ با اضافه کردن دوده سیلیس، حجم کل منافذ قابل نفوذ $36/5\%$ و شعاع حفره بحرانی نیز 45% کاهش می‌یابد و



(a)



(b)



(c)

شکل ۶- نمودار توزیع اندازه منافذ برای طرح های

$W/B = 0.45$ (c) و $W/B = 0.40$ (b) و $W/B = 0.35$ (a)

همان‌گونه که مشاهده می‌شود استفاده از دوده سیلیس در کاهش حجم کل منافذ و اصلاح توزیع اندازه منافذ مشارکت می‌کند. بطوریکه در $w/b=0.45$ حجم کل منافذ و شعاع حفره بحرانی به ترتیب $19/5\%$ و $30/1\%$ کاهش یافته است. تأثیر دوده سیلیس بر میزان کاهش حجم کل منافذ و شعاع بحرانی در طرح‌های C40 به ترتیب $19/5\%$ و $36/5\%$ بوده است. این کاهش به دلیل این است که ریزساختار بتن تحت تأثیر افزودن دوده سیلیس به مخلوط قرار می‌گیرد. تأثیر اصلی عبارت است از کوچک‌سازی ساختار حفره‌ای ملات

شعاع حفره بحرانی مربوط به نمونه حاوی دوده سیلیس در نسبت آب به سیمان ۰/۳۵ با ۳۰/۲۵ mm³/gr و ۷/۳۳ nano می باشد که علت آن اثر متقابل دوده سیلیس و کاهش نسبت آب به سیمان بر اصلاح ریز ساختار منافذ و کاهش حجم حفرات و شعاع حفره بحرانی می باشد که در تحقیقات دیگر محققین نیز تایید گردیده است [۲۳].

نتایج تحقیقات نشان می دهد که منافذ مویینه بزرگتر از ۲۵ نانو در شعاع در خواص مکانیکی و نفوذپذیری تأثیر اساسی دارند [۳۵] در تحقیقات گزارش شده است که منافذ با اندازه ریزتر از ۱۰ نانو منافذ ژلی مربوط به ژل C-S-H می باشد که آب درون این فضاهای کوچک توسط پیوند هیدروژنی نگهداشته میشود این منافذ عمدتاً روی خزش و جمع شدگی تأثیر گذار هستند [۳۴] هر چه مقدار این منافذ یعنی منافذ ژلی بیشتر باشد نشان دهنده تشکیل ژل C-S-H بیشتر در مواد پایه سیمانی سخت شده می باشد.

براین اساس به منظور بررسی بهتر نتایج طرح های حاوی دوده سیلیس، مقایسه ای بین میزان حجم حفرات بزرگ (بزرگتر از ۲۵ نانو) و حفرات ژلی (حفرات کوچکتر از ۱۰ نانو) موجود در طرح ها انجام شده است. همانطور که در جدول ۵ مشاهده می شود در w/b=0.40 با جایگزینی دوده سیلیس حجم حفرات بزرگتر از ۲۵ نانو به میزان ۳۶/۸٪ کاهش و حجم حفرات کوچکتر از ۱۰ نانو ۴۰/۲٪ افزایش یافته است. در w/b=0.35 جایگزینی دوده سیلیس حجم حفرات بزرگ را ۱۹/۵٪ کاهش و حجم حفرات ژلی را ۹۰٪ افزایش داده است.

جدول ۵- میزان تخلخل حفرات (mm³/g)

کد طرح		Nano ۱۰ ≤	Nano ۲۵ ≥
C45		۱۹/۰۷	۱۶/۰۷
C45SF8		۲۲/۹۱	۳/۵
C40		۱۲/۷۵	۴/۸۷
C40S.F8		۱۷/۸۷	۳/۰۸
C35		۱۱/۵۹	۵/۴۵
C35S.F8		۲۲/۱۲	۴/۳۹

این تغییرات نشاندهنده کاهش حجم حفرات بزرگ و افزایش حجم حفرات کوچکتر از ۱۰ نانو که بیانگر افزایش حجم ژل ناشی از واکنش های پوزولانی می باشد. بنابراین با اضافه کردن دوده سیلیس و در نتیجه واکنش پوزولانی موثر و تشکیل ژل ثانویه حجم

در نتیجه نتایج تخلخل سنج جیوه نشان می دهد که تأثیر دوده سیلیس در کاهش تخلخل کل و ریزتر کردن حفره بحرانی در طرح با نسبت آب به سیمان ۰/۳۵ موثرتر بوده است. نتایج نشان می دهد که بکار گیری مواد هوازا در w/b=0.40 سبب تغییرات اندکی در ساختار حفره ای اندازه گیری شده، به طوری که حجم کل منافذ قابل نفوذ ۷/۴٪ افزایش و شعاع بحرانی هم حدود ۱٪ کاهش یافته است. در w/b=0.35 هوازایی سبب افزایش ۱۰/۹٪ در حجم کل منافذ و افزایش ۶/۲٪ در شعاع حفره بحرانی شده است. در طرح های حاوی دوده سیلیس که هوازایی شده است مشاهده می شود که در w/b=0.40 حجم کل منافذ قابل نفوذ ۳۱/۴٪ افزایش و شعاع حفره بحرانی ۴٪ کاهش می یابد و در w/b=0.35 حجم کل منافذ قابل نفوذ ۲۵/۷٪ افزایش و شعاع حفره بحرانی ۴/۱٪ کاهش می یابد.

جدول ۴- حجم تجمعی کل منافذ قابل نفوذ و شعاع حفره بحرانی

کد طرح	Total Cumulative Volume(mm ³ /g)	Critical pore Radius(nm)
C35	۴۷/۶۲	۱۳/۳۲
C35AE	۵۲/۸۱	۱۴/۱۵
C35S.F8	۳۰/۲۵	۷/۳۳
C35S.F8AE	۵۹/۰۲	۱۳/۸۷
C40	۵۷/۰۹	۱۵/۹۴
C40AE	۶۱/۳۴	۱۵/۷۸
C40S.F8	۴۵/۹۶	۱۰/۴۲
C40S.F8AE	۷۵/۰۱	۱۵/۲۹
C45	۶۵/۸۴	۱۹/۶۰
C45AE	۶۹/۷۶	۱۸/۷۸
C45SF8	۵۲/۹۸	۱۳/۷۰
C45SF8AE	۷۸/۷۲	۱۷/۰۱

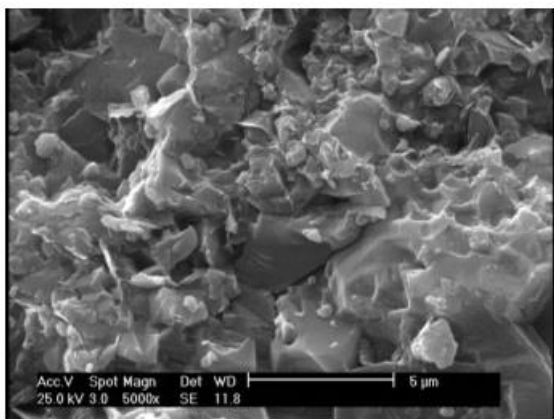
به کار گیری هم زمان دوده سیلیس و مواد هوازا در مخلوطها باعث تغییر نقشه تخلخلی و تشکیل حباب های هوای کروی، یکنواخت، پایدار، ریز و بسته را در ملات سیمان گردیده و این حباب های هوای کروی به طور مؤثری لوله های مویینه و اتصال منافذ را مسدود (بلاک) کرده و دوام در برابر پوسته شدگی در برابر نمک های یخ زدا را بهبود ببخشد که نتایج به دست آمده در بخش پوسته شدگی را مورد تأیید قرار می دهد. کمترین حجم حفرات قابل نفوذ و کمترین

این ترتیب ریزساختار بسیار متراکم تر می شود. در شکل ۹ مشاهده می شود که در نمونه های هوادار حفرات و فواصل تقریبی حباب ها که به صورت منظم، کروی و در فواصل مناسب و همچنین پایدار در ملات توزیع گردیده اند. در تصویر نمونه حاوی دوده سیلیس و هوازا اثر همزمان دوده سیلیس و هوازا به وضوح قابل مشاهده است. به هر حال متراکم شدن توده ژلی به علت فعالیت پوزولانی و همچنین تشکیل سیستم منظم حباب های هوای عمدی و در ملات باعث گردیده است که ساختار تخلخلی نمونه ها اصلاح و همچنین این حباب های هوای کروی به طور موثری اتصال منافذ را مسدود سازد. بدیهی است اصلاح ریز ساختار عامل مهمی بر بهبود مقاومت مکانیکی و دوام پوسته شدگی نمونه ها قلمداد می گردد. تصاویر SEM نتایج حاصل از MIP و پوسته شدگی را تأیید می نماید.

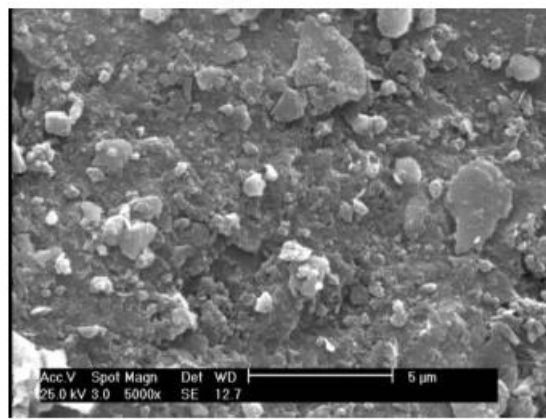
حفرات بزرگ کاهش یافته و سبب تبدیل منافذ بزرگ به منافذ ریز شده که نقش مهمی را در بهبود مقاومت، نفوذناپذیری و دوام ملات سیمانی بازی می کند.

۳-۵- تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی

تأثیر دوده سیلیس و مواد هوازا بر ریز ساختار مخلوطها توسط تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی در شکل های ۸ و ۹ نشان داده شده است. همان گونه که در شکل ۸ مشاهده می شود استفاده از دوده سیلیس باعث بهبود چشمگیر ریز ساختار می شود. به عبارت دیگر دوده سیلیس می تواند با هیدروکسید کلسیم کریستالی به سرعت واکنش بدهد و ژل C-S-H تولید نماید به این ترتیب ابعاد و مقدار کریستال های هیدروکسید کلسیم کاهش می یابد و به جای آن ژل C-S-H خالی موجود را پر می کند. به

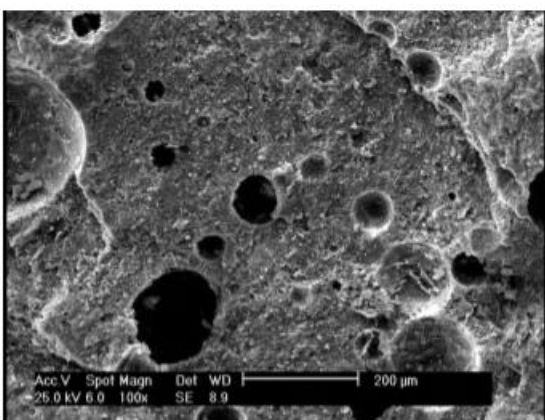


(a)- C45

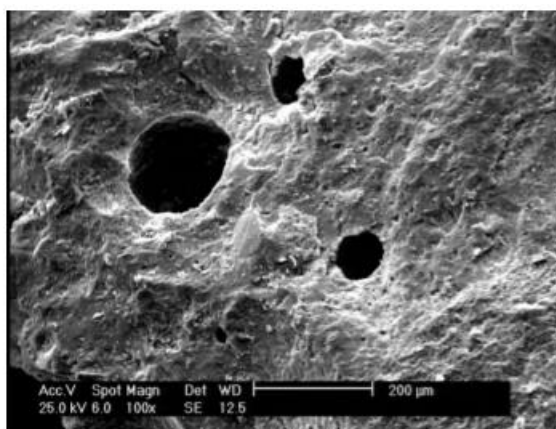


(b)- C45F8

شکل ۸- تصاویر میکروسکوپ الکترونی نمونه های شاهد و حاوی دوده سیلیس



(a)- C45AE



(b)- C45SF8AE

شکل ۹- تصاویر میکروسکوپ الکترونی نمونه های هوازایی شده و حاوی دوده سیلیس

۴- نتیجه گیری

که حبابها کروی شکل و با قطر و فاصله مناسب از هم توزیع شده- اند که این توزیع مناسب حبابها در خمیرسیمان نقش مؤثری در کاهش پوسته شدگی داشته است.

- مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی حاوی حباب هوا کمتر از نمونه‌های بدون حباب هوا بوده است. علت این پدیده افزایش میزان حفرات و تخلخل بتن است که باعث کاهش مقاومت فشاری میگردد از سوی دیگر اضافه کردن دوده سیلیس در طرح های حاوی حباب هوا باعث گردیده تا کاهش مقاومت فشاری ناشی از هوادار کردن بتن‌ها جبران گردد.

- به کارگیری دوده سیلیس، سبب افزایش مقاومت الکتریکی نمونه‌ها به خصوص در سنین ۲۸ و ۹۰ روزه می‌شود. می‌توان گفت از آنجایی که مقاومت الکتریکی به هر دو عامل ریز ساختار فیزیکی بتن و رسانایی مایع منفذی بستگی دارند، واکنش‌های پوزولانی از یکطرف سبب کاهش حجم فضاهای خالی موجود در بتن و از طرف دیگر با مصرف یون‌های OH^- موجود در مایع منفذی سبب کاهش رسانایی مایع منفذی میگردد در نتیجه مقاومت الکتریکی بتن به مقدار زیادی افزایش می‌یابد.

۵- مراجع

- [1] Verbeck, G.J. and Klieger, Studies of salt scaling of concrete. Highway Research Board Bulletin, Vol. 150, 1-17, 1957.
- [2] Arnfelt, H., Damage on concrete pavements by wintertime salt treatment. In Meddelande (Vol. 66). Statens Väginstytut Stockholm, 1943.
- [3] Jana, D., Concrete, Construction, or Salt—Which Causes Scaling? Concrete international, 26(11), pp.31-38, 2004.
- [4] Alonso, C., Andrade, C., Castellote, M. and Castro, P., Chloride threshold values to depassivate reinforcing bars embedded in a standardized OPC mortar. Cement and Concrete research, 30(7), pp.1047-1055, 2000.
- [5] Valenza II, J.J. and Scherer, G.W., A review of salt scaling: II. Mechanisms. Cement and Concrete Research, 37(7), pp.1022-1034, 2007.
- [6] Scherer, G.W. and Valenza, J.J., Mechanisms of frost damage. Materials science of concrete, 7(60), pp.209-246, 2005.
- [7] Scherer, G.W., Crystallization in pores. Cement and Concrete research, 29(8), pp.1347-1358, 1999.
- [8] Valenza, J.J., II. Mechanism for salt scaling (Doctoral dissertation, PhD thesis, Princeton University), www.jvalenza.com/thesis.html, 2005.

بر اساس مطالعات صورت گرفته موارد زیر قابل استنتاج و نتیجه‌گیری می‌باشد:

- کاهش نسبت آب به سیمان باعث بهبود دوام پوسته شدگی، افزایش مقاومت الکتریکی و افزایش مقاومت فشاری گردیده است که علت آن بهبود تخلخل و کاهش فضاهای مویینه خمیر سیمان میباشد.

- جایگزینی ۸٪ دوده سیلیس به جای سیمان همانگونه که باعث افزایش مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی در تمام سنین گردید، سبب بهبود دوام بتن در برابر پوسته شدگی نسبت به نمونه های شاهد میشود که علت آن واکنشهای پوزولانی مؤثر است که باعث بهبود ITZ بین سنگ‌دانه و خمیر سیمان شده و با افزایش پیچ و خم های منافذ مویینه و کاهش اتصالات آنها، ساختار بتن را متراکم تر و نفوذپذیری بتن را کاهش داده است.

- بهترین عملکرد در نتایج پوسته شدگی متعلق به طرحهای هوادار حاوی دوده سیلیس با کاهش ۸۸٪ نسبت به نمونه شاهد میباشد که به دلیل ترکیب تأثیر مثبت دوده سیلیس در متراکم کردن ساختار بتن و تأثیر مثبت هوازایی در کاهش آب انداختگی و افزایش مقاومت لایه سطحی بتن‌ها بوده است.

- نتایج تخلخل سنجی جیوه نشان داده است که به کارگیری دوده سیلیس در طرح‌ها باعث کاهش تخلخل کل، اصلاح ریز ساختار و کاهش شعاع بحرانی گردیده و از طرف دیگر سبب افزایش حجم حفرات ژلی گردیده است بدین ترتیب دوده سیلیس ضمن اصلاح ساختار تخلخلی بتن باعث بهبود دوام پوسته شدگی گردیده است.

- هوادار نمودن بتن اگرچه باعث گردیده که تخلخل کل نسبت به بتن بدون هوا افزایش یابد اما باعث تشکیل حباب‌های هوای کروی، یکنواخت، پایدار، ریز و بسته را در ملات سیمان گردیده و این حباب‌های هوا به‌طور مؤثری لوله‌های مویینه و اتصال منافذ را مسدود کرده و دوام در برابر پوسته شدگی را بهبود ببخشد که نتایج بدست آمده در بخش پوسته شدگی را مورد تأیید قرار می‌دهد.

- تصاویر میکروسکوپ الکترونی نشان داده است که بتن‌های حاوی دوده سیلیس دارای ژل متراکم‌تری در مقایسه با بتن شاهد میباشد. از سوی دیگر تصاویر بتن‌های حباب دار حاکی از آن است

- Concrete research, 11(4), pp.507-518, 1981.
- [23] Wu, Z., Shi, C. and Khayat, K.H., Influence of silica fume content on microstructure development and bond to steel fiber in ultra-high strength cement-based materials (UHSC). *Cement and Concrete Composites*, 71, pp.97-109, 2016.
- [24] ACI 201.2 R, Guide to durable concrete. Farmington Hills, MI: American Concrete Institute, 2008.
- [25] BS EN 12390-3, Testing hardened concrete-Part3: Compressive strength of test specimens, 2009.
- [26] ASTM C672/C672M-12, Standard Test Method for Scaling Resistance of Concrete Surfaces Exposed to Deicing Chemicals, 2012.
- [27] AASHTO T358-17, Standard Method of Test for Surface Resistivity Indicating Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration. Standard by American Association of State and Highway Transport. Official, 2017.
- [28] Remzi S.; Mehmet A.; Rüstem G.; Cafer C., Determination of the optimum conditions for de-icing salt scaling resistance of concrete by visual examination and surface scaling, *J. Construction and Building Materials* 24, 2010, pp. 353–360, 2010.
- [29] Marchand, J., Pigeon, M., Boisvert, J., Isabelle, H. L., and Houdusse, O., Deicer salt scaling resistance of roller compacted concrete pavements containing fly ash and silica fume. *ACI Special Publication, SP-132*, V.M. Malhotra (Ed.), pp. 151-178, 1992.
- [30] Powers, T. C. and Helmuth, R. A., Theory of volume changes in hardened Portland-cement paste during freezing. *Proc. Highw. Res. Board*, Vol. 32, pp. 285-297, 1953.
- [31] Powers, T.C., *Properties of Fresh Concrete*, John Wiley and Sons. Inc., New York, p.301, 1986.
- [32] R. Polder, C. Andrade, B. Elsener, O. Vennesland, J. Gulikers, R. Weidert, et al., "Test methods for on site measurement of resistivity of concrete," *Materials and Structures*, vol. 33, pp. 603-611, 2000.
- [33] Shi, C., Stegemann, J.A. and Caldwell, R.J., Effect of supplementary cementing materials on the specific conductivity of pore solution and its implications on the rapid chloride permeability test (AASHTO T277 and ASTM C1202) results. *Materials Journal*, 95(4), pp.389-394, 1998.
- [34] Halamickova, P., Detwiler, R.J., Bentz, D.P. and Garboczi, E.J., Water permeability and chloride ion diffusion in Portland cement mortars: relationship to sand content and critical pore diameter. *Cement and concrete research*, 25(4), pp.790-802, 1995.
- [9] Ciardullo, J.P., Sweeney, D.J. and Scherer, G.W., Thermal expansion kinetics: Method to measure permeability of cementitious materials, IV. Effect of thermal gradients and viscoelasticity. *Journal of the American Ceramic Society*, 88(5), pp.1213-1221, 2005.
- [10] Scherer, G.W., Characterization of saturated porous bodies. *Materials and structures*, 37(1), pp.21-30, 2004.
- [11] Valenza, J.J. and Scherer, G.W., Mechanism for salt scaling. *Journal of the American Ceramic Society*, 89(4), pp.1161-1179, 2006.
- [12] Sun, Z. and Scherer, G.W., Effect of air voids on salt scaling and internal freezing. *Cement and Concrete Research*, 40(2), pp.260-270, 2010.
- [13] Valenza II, J.J. and Scherer, G.W., A review of salt scaling: I. Phenomenology. *Cement and Concrete Research*, 37(7), pp.1007-1021, 2007.
- [14] Wu, Z., Libre, N.A. and Khayat, K.H., Factors affecting air-entrainment and performance of roller compacted concrete. *Construction and Building Materials*, 259, p.120413, 2020.
- [15] Scrivener, K.L., Crumbie, A.K. and Laugesen, P., The interfacial transition zone (ITZ) between cement paste and aggregate in concrete. *Interface science*, 12(4), pp.411-421, 2004.
- [16] Scrivener, K.L., Bentur, A. and Pratt, P.L., Quantitative characterization of the transition zone in high strength concretes. *Advances in Cement Research*, 1(4), pp.230-237, 1988.
- [17] Detwiler, R.J. and Mehta, P.K., Chemical and physical effects of silica fume on the mechanical behavior of concrete. *Materials Journal*, 86(6), pp.609-614, 1989.
- [18] Gonen, T. and Yazicioglu, S., The influence of compaction pores on sorptivity and carbonation of concrete. *Construction and building materials*, 21(5), pp.1040-1045, 2007.
- [19] Basheer, L., Basheer, P.A.M. and Long, A.E., Influence of coarse aggregate on the permeation, durability and the microstructure characteristics of ordinary Portland cement concrete. *Construction and Building Materials*, 19(9), pp.682-690, 2005.
- [20] Hooton, R.D., Permeability and pore structure of cement pastes containing fly ash, slag, and silica fume. In *Blended cements*. ASTM International, 1986.
- [21] Zhang, P., Li, D., Qiao, Y., Zhang, S., Sun, C. and Zhao, T., Effect of air entrainment on the mechanical properties, chloride migration, and microstructure of ordinary concrete and fly ash concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 30(10), p.04018265, 2018.
- [22] Mehta, P.K., Studies on blended Portland cements containing Santorin earth. *Cement and*

[35] P.K. Metha, P.J.M. Monterio, Concrete, Microstructure, Properties and Materials, McGraw-Hill, London, 2006.

Experimental study of the effects of water-binder ratio, silica fume and air-entrainment on the microstructure and salt scaling resistance of concrete pavements

M. Nili *

Ph.D. Candidate, Department of Civil and Environmental Engineering, Amirkabir University of Technology.

A. A. Ramezani pour

Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Amirkabir University of Technology.

J. Sobhani

Departement of concrete Technology, Road, Housing and Urban Development Research Center.

A.M. Raeiss ghasemi

Departement of concrete Technology, Road, Housing and Urban Development Research Center.

Abstract

Salt scaling of concrete pavements is known as a serious problem in cold regions. In the present study the effect of water-binder (W/B) ratio, silica fume and air entraining on the salt scaling resistance, compressive strength and electrical resistance were investigated. Microstructure of the concretes was assessed by mercury intrusion porosimetry and scanning electron microscope. Water-binder ratios were 0.35, 0.40 and 0.45. Silica fume was used, by 8% weight of cement, in the predetermined mixtures. The results showed that the best salt scaling resistance was correspondent to the air entrained silica fume specimens. By reducing the water-binder ratio, the amount of surface scaling was decreased. The MIP results declared that silica fume refined the microstructure and also decreased the total porosity and critical pore radius compared with those for the reference specimens. Furthermore, the MIP results of the silica fume specimens declared that the pores smaller than 10 nano were increased, due to the effective pozzolanic reaction. The scanning electron microscope images showed that the concrete containing silica fume had a denser gel compared with those for the reference ones. Introducing silica fume into the specimens had remarkable effect on the later age electrical resistance of the concrete. It was concluded that the highest electrical resistance belonged to the durable specimens. The results of the present study clarify how the micro structure may influence the salt scaling resistance of concrete pavement, this achievement will surely reduce the cost of rehabilitation of concrete pavements in the cold regions.

Keywords: Salt scaling, Microstructure, Silica fume, air-entrainment, Concrete pavement.

* Corresponding Author: mojtaba.nili@yahoo.com

