تحقیقات بتن
سال پانزدهم، شمارهٔ دوم
تابستان ۱۴۰۱
ص ۱۰۹ – ۹۷
تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۸/۰۸
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۱/۱۸

بررسی پوسته‌شدگی بتن خودتراکم حاوی ترکیب‌های پوزولانی

علی ملکی
دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشکدگان فنی دانشگاه تهران، تهران، ایران.
امیر محمد رمضانیان‌پور *
دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشکدگان فنی دانشگاه تهران، تهران، ایران.
ایرج محمودزاده کنی
استاد دانشکده مهندسی عمران، دانشکدگان فنی دانشگاه تهران، تهران، ایران.

چکیده

پوزولان‌ها، مواد آلومینو-سیلیکاتی هستند که جایگزینی بخشی از سیمان با آن‌ها، به بهبود خواص دوامی بتن کمک می‌کند. همچنین، با تولید کمتر سیمان و کاهش تولید کربن‌دی‌اکسید ناشی از آن، به محیط زیست و توسعه پایدار کمک می‌کنند. یکی از کاربردهای پوزولان‌ها در بتن خودتراکم است، بتنی که به‌دلیل ویژگی‌هایش مورد اقبال واقع شده است. از طرفی یکی از موضوعات دوامی، میزان مقاومت بتن در چرخه‌های ذوب و انجماد در مجاورت نمک یا همان پوسته‌شدگی است که با تخریب سطح، دوام بتن را تحت الشعاع قرار می‌دهد. در برخی تحقیقات پیشین، استفاده از ترکیبات دوگانه (یک نوع پوزولان در کنار سیمان) و سه‌گانه (دو نوع پوزولان در کنار سیمان)، علی‌رغم بهبود عملکرد دوامی بتن، مقاومت در برابر پوسته‌شدگی را کاهش داده است. از طرفی تحقیقات درباره پوسته‌شدگی ترکیبات سه‌گانه و چهارگانه (سه نوع پوزولان در کنار سیمان) بسیار محدود بوده است. بدین سبب هدف از این تحقیق، مطالعه و مقایسه تأثیر ترکیبات دوگانه، سه‌گانه و چهارگانه بر پوسته‌شدگی بتن خودتراکم، بوده است. بدین منظور از درصدهای ۰، ۱۰ و ۲۰ از دو پوزولان تراس و پومیس در کنار ۱۰٪ میکروسیلیس در ۹ طرح هوازایی نشده و ۲ طرح ۳٪ هوازایی شده استفاده شد. نتایج نشان داد که یک ترکیب سه‌گانه، بهترین مقاومت پوسته‌شدگی را در بین ترکیبات بدون هوازایی کسب کرد. همچنین بین ترکیبات هوازایی نشده، طرح‌های حاوی ترکیبات دوگانه و سه‌گانه بر خلاف ترکیبات چهارگانه، مقاومت مناسبی در برابر پوسته‌شدگی داشتند. در ضمن هوازایی مقدار پوسته‌شدگی ترکیبات پوزولانی را کاهش محسوسی داد.

واژه‌های کلیدی: بتن خودتراکم، ترکیب دوگانه، سه‌گانه و چهارگانه، پوسته‌شدگی.

* نویسنده مسئول: ramezanian@ut.ac.ir

۱- مقدمه

با رشد فعالیت‌های صنعتی در سطح جهان، استفادهٔ بهینه از منابع با رویکرد حفظ محیط‌زیست و توسعه پایدار، مد نظر قرار گرفته است. یکی از مهم‌ترین نتایج این رویکرد در مهندسی عمران، تلاش برای یافتن راهکاری جهت کاهش تولید سیمان به‌عنوان یکی از مصالح پرمصرف و در عین حال آلوده‌کننده محیط‌زیست بوده است. در نهایت یکی از راهکارهای پیشنهادی، جایگزینی بخشی از سیمان مصرفی با مواد معدنی سیلیکاتی یا آلومینو-سیلیکاتی به نام پوزولان می‌باشد. پوزولان‌ها را از لحاظ نحوهٔ به‌دست آمدن، می‌توان به دو گروه مصنوعی، که نتیجه نهایی و یا جانبی کارخانه‌هایی مثل آلیاژهای فروسیلیس و یا نیروگاه‌های زغال‌سنگ هستند و طبیعی، شامل توف‌ها، خاک‌های دیاتومه، شیل‌ها و خاکستر آتشفشان‌ها تقسیم‌بندی کرد [۱]. این پوزولان‌ها بسته به ساختار شیمیایی و نیز دانه‌بندی دارای تأثیرات مهمی روی خواص متعدد مکانیکی و به‌ویژه دوامی بتن هستند که شناخت آن‌ها مقدم بر استفاده صنعتی از آن‌هاست.

از طرفی یکی از ابتکارات مهم اخیر مهندسین در زمینه تولید بتن، ساخت بتن خودتراکم[1] بوده است [۲]. بتن خود تراکم بتنی است که تحت وزن خود جاری شده و نیازی به لرزاننده ندارد و همه قسمت‌ها را بدون جداشدگی پر می‌کند [۳]. این بتن به جهت برخورداری از خواص سه‌گانه توانایی جریان‌یافتگی، توانایی پرکنندگی و جلوگیری از جداشدگی که ویژگی‌های رئولوژیکی بتن خودتراکم نامیده می‌شوند، به مواد معدنی ریزدانه از جمله پوزولان‌ها نیازمند است [۴].

با مطالعه تحقیقات گسترده پیشین روی تأثیرات به کارگیری پوزولان‌ها و یا ترکیبات دوگانه[2] (یک پوزولان در کنار سیمان) و سه‌گانه[3] (دو پوزولان در کنار سیمان) آن‌ها با سیمان، بر روی خواص مکانیکی و دوامی بتن خودتراکم می توان به این نکته پی برد که این مواد، در بسیاری از موارد موجب بهبود قابل توجه عملکرد بتن به‌ویژه در جنبه‌های دوامی آن شده‌اند. تراس جاجرود موجود در شمال کشور و پومیس تفتان موجود در استان سیستان و بلوچستان دو نمونه از پوزولان‌های طبیعی هستند که در کشورمان به وفور یافت می‌شوند. بررسی‌های انجام گرفته درباره استفاده از پوزولان تراس و پومیس به کار رفته در ترکیبات دوگانه در بتن خودتراکم نشان دادند که این پوزولان‌ها نیاز به فوق‌روان‌کننده را افزایش دادند. همچنین این ترکیبات، مقاومت فشاری ۲۸ روزه را کم کرده اما در سن ۹۱ روز بهبود بخشیدند که این موضوع احتمالا به سبب فعالیت پوزولانی کندتر آن‌ها نسبت به هیدراسیون سیمان است. همچنین استفاده از ترکیبات دوگانه سیمانی-پوزولانی خواص متعدد دوامی را نسبت به طرح بدون پوزولان بهبود بخشیدند، برای مثال مقاومت الکتریکی در بتن خودتراکم حاوی پومیس ۳۰، ۴۰ و ۵۰ درصد سیمان افزایش یافت [۵-۷].

در تحقیقات محدود اخیر، دانشمندان متوجه تأثیرات مثبت قابل توجه ناشی از هم‌افزایی پوزولان‌ها در ترکیبات سه‌گانه و برتری آن‌ها نسبت به ترکیبات دوگانه، در خواص مکانیکی و دوامی بتن خودتراکم شدند. برای مثال نتایج تحقیقات روی ترکیبات سه‌گانه حاوی درصدهای مختلف پومیس و میکروسیلیس، نشان داد که ترکیبات سه‌گانه دارای میکروسیلیس به میزان ۵ تا ۱۰ درصد سیمان و ۱۰ تا ۴۰ درصد سیمان از پومیس مقاومت فشاری بیشتری نسبت به ترکیبات دوگانه با ۱۰ تا ۵۰ درصد پومیس به‌کار رفته داشتند. جدای از آن، میزان مقاومت فشاری با افزایش میزان پومیس و میکروسیلیس در ترکیبات سه‌گانه افزایش یافت اما در ترکیب دوگانه پومیس، کاهنده بود [۸]. همچنین در تحقیقی دیگر، ترکیبات سه‌گانه تا ۲۰٪ پومیس و تا ۱۰٪ میکروسیلیس، متوجه کاهش قابل توجه جذب آب حجمی و افزایش مقاومت الکتریکی آن‌ها نسبت به ترکیبات دوگانه و نیز نمونه شاهد، به عنوان تأثیرات دوامی این ترکیبات شدند[۹].

اما یکی از مهمترین خواص دوامی بتن به خصوص در نواحی سردسیر یا دارای آب و هوایی با تغییرات دمایی زیاد، مقاومت در برابر پوسته‌شدگی است. در طول عمر بتن، برای مثال در روسازی‌های بتنی، چرخه‌های ذوب و یخ نمکی زیادی با تغییرات متعدد رطوبتی حادث می‌شود که سبب تخریب بتن از دو طریق می‌شود: یکی انبساط یخ در منافذ مویینه و دوم حرکت مایعات به سمت قسمت‌های غیر یخ زده که سبب ایجاد ترک در بتن می‌شوند [۱۰-۱۲]. پوسته‌شدگی نمکی نه به تنهایی بلکه به همراه خطرات ثانویه ناشی از آن سبب تخریب بتن و کاهش مقاومت می‌شود ازجمله اینکه پوسته‌شدگی، نفوذپذیری بتن را افزایش می‌دهد

[1] Self-consolidating concrete (SCC)
[2] Binary
[3] Ternary

[۱۳–۱۵]. تحقیقات گسترده‌ای روی عوامل مؤثر بر پوسته‌شدگی از جمله اثر پوزولان‌ها انجام گرفته است. در تحقیقی تأثیر جایگزینی سیمان با پوزولان طبیعی و میکروسیلیس و خاکستربادی در مقادیر ۸٪ و ۲۰٪ وزنی سیمان در ترکیب‌های دوگانه و در نسبت آب به سیمان‌های ۰/۳۶ و ۰/۴۳ مورد بررسی قرار گرفت. نتیجه آن بود که استفاده از میکروسیلیس تأثیر مثبتی بر پوسته‌شدگی داشته که می‌تواند به سبب افزایش مقاومت فشاری بوده باشد در حالی که پوزولان‌های دیگر سبب کاهش مقاومت پوسته‌شدگی شدند [۱۶]. در تحقیقی دیگر بتن خودتراکم دربردارنده ۱۲٪ خاکستربادی و ۵٪ میکروسیلیس از بتن معمولی بدون این افزودنی‌ها کمتر دچار پوسته‌شدگی نمکی شده بود [۱۷] که نشان از عملکرد مؤثر و بهبوددهنده این ترکیبات پوزولانی داشت. پوسته‌شدگی نمکی تنها به نوع سیمان و یا پوزولان به‌کار رفته وابسته نبوده، بلکه به حفرات هوا موجود در بتن نیز وابسته است. رمضانیان‌پور و همکاران [۱۸] تحقیقاتی را روی تأثیر حباب‌های هوا روی پوسته‌شدگی بتن معمولی انجام دادند، نتیجه گرفتند: «حباب‌های هوای وارده در بتن از سه طریق کاهش آب‌انداختگی، فراهم کردن مکانی برای مکیدن و یخ زدن مایعات بدون تخریب بتن و کاهش نفوذ یون‌های نمک در بتن به‌دلیل کاهش حفرات به هم پیوسته برای مقاومت بتن در برابر تخریب ناشی از پوسته‌شدگی نمکی مفید است». در تحقیقاتی دیگر محققین متوجه شدند که در پوسته‌شدگی بتن غلتکی، بهترین عملکرد مربوط به نمونه‌های هوازایی شده بدون پوزولان (تراس) بوده و نمونه‌های هوازایی نشده دارای پوزولان تراس نسبت به نمونه کنترل مقاومت پوسته‌شدگی را کاهش دادند [۱۹].

نتیجه آنکه علی رغم عملکرد بسیار مطلوب ترکیبات سه‌گانه پوزولانی در بهبود خواص مکانیکی و دوامی بتن خودتراکم، تحقیقات روی پوسته‌شدگی ترکیبات سه‌گانه بسیار محدود و گاه دارای نتایج مغایر با بقیه آزمایش‌های دوامی است. ضمن اینکه به ندرت تحقیقی روی مقاومت در برابر پوسته‌شدگی ترکیبات چهارگانه[1] (سه پوزولان در کنار سیمان) انجام شده است. به همین سبب این تحقیق با هدف شناسایی و مقایسه عملکرد ترکیبات دوگانه، سه‌گانه و چهارگانه در برابر پوسته شدگی و نیز تأثیر هوازایی بر نتایج انجام شد. در این زمینه، از سه پوزولان میکروسیلیس، تراس جاجرود و پومیس تفتان استفاده شد که در ایران به صورت فراوان یافت می‌شوند.

۲- برنامه آزمایشگاهی

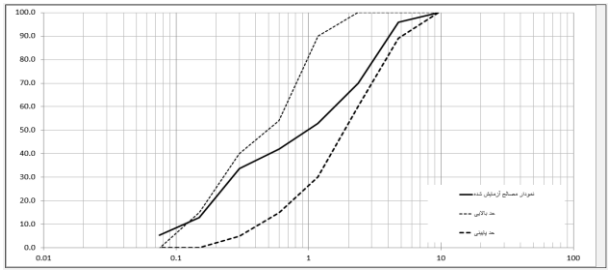
۲-۱- مشخصات مصالح مصرفی

سیمان به‌کار رفته در این پژوهش تیپ دو ساوه بوده و دارای وزن مخصوص $3/15\ gr/cm^3$ می‌باشد. نتایج آزمایش جذب آب و وزن مخصوص خشک ماسه و شن مصرفی در جدول ۱ ارائه شده است. همچنین به منظور رسیدن به کارایی مناسب در طرح‌های اختلاط، از فوق‌روان‌کننده کربوکسیلاتی اتر استفاده شد. آنالیزهای XRF به‌منظور شناسایی بهتر مصالح مورد استفاده انجام شد و درصد اکسیدهای مصالح مورد استفاده در جدول ۲ ارائه شده است.

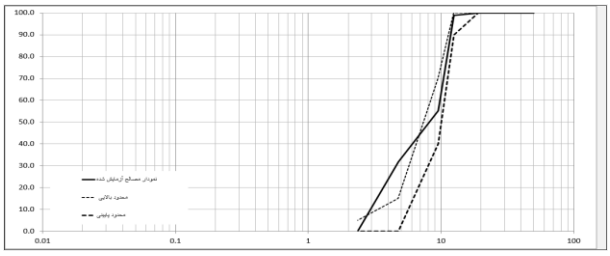
جدول ۱- نتایج آزمایش جذب آب و وزن مخصوص

سنگدانه	وزن مخصوص خشک (gr/cm^3)	درصد جذب آب (٪)
ماسه بادی	۲/۶۹	۲/۷۴
شن نخودی	۲/۶۵	۳
ماسه	۲/۶	۲/۴

دانه‌بندی ماسه و شن مصرفی را به دست آورده و داده‌های حاصل در شکل ۱ و ۲ مشاهده می‌شود.



شکل ۱- (ماسه ۰–۵ و ماسه بادی با نسبت ۸۰ به ۲۰) در محدوده استاندارد



شکل ۲- مقایسه دانه‌بندی سنگدانه نخودی با محدوده مجاز استاندارد

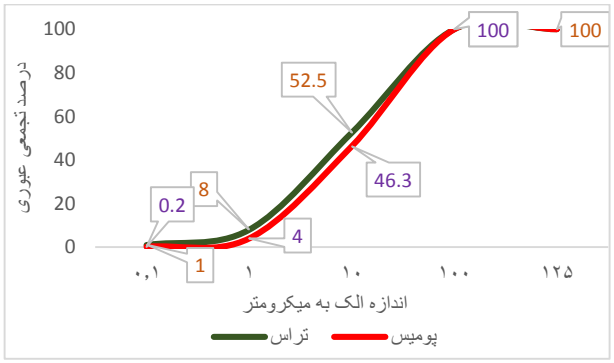
[1] Quaternary

جدول ۲- ساختار شیمیایی و اکسیدهای مصالح به کار رفته در بتن

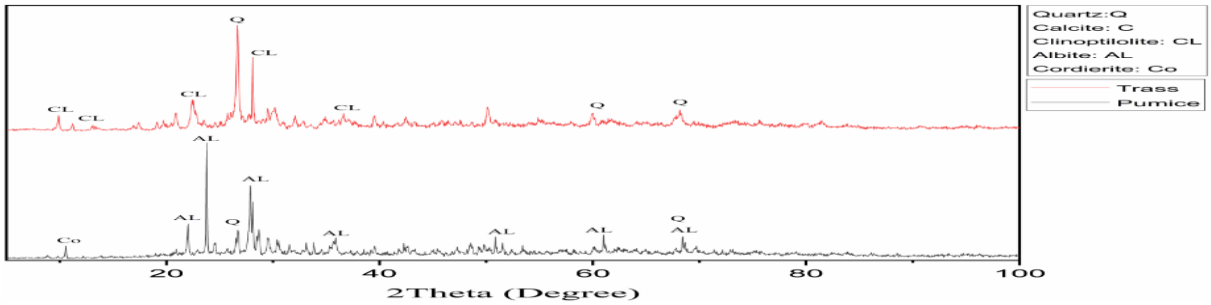
مصالح	سیلیس SiO_2	آلومینا Al_2O_3	اکسید آهن Fe_2O_3	اکسید کلسیم CaO	اکسید منیزیم MgO	سولفیت SO_3	اکسید سدیم Na_2O	اکسید پتاسیم K_2O	$SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3$	وزن مخصوص kg/m^3	بلین m^2/kg
تراس	۷۴/۸۵	۱۱/۷۱	۲/۰۴	۳/۸۲	۱/۴	۰/۲۲	۲/۱۱	۲/۹۴	۸۸/۶	۲۵۰۰	۶۵۰
پومیس	۵۹/۴۴	۱۵/۹	۴/۷۴	۱۰/۶۴	۲/۱۹	۱/۲۶	۳/۳۵	۱/۸	۸۰/۰۸	۲۶۲۰	۴۹۰
میکروسیلیس	۹۳/۴۷	۱/۱۷	۱/۵	۰/۹۵	۱	۰/۲	۰/۲۲	۱/۰۸	۹۶/۱۴	۲۳۵۰	۲۰۰۰۰
شن نخودی	۶۵/۷۸	۱۱/۲۵	۳/۳۷	۱۱/۴۳	۲/۱۳	۰/۰۷	۲/۳۳	۲/۸۹	–	۲۶۵۰	–
ماسه ۰-۵	۶۶/۵۵	۱۱/۱۷	۳/۲۲	۱۰/۵۷	۱/۸۷	۰/۰۷	۲/۸۳	۲/۸۱	–	۲۶۰۰	–
ماسه آبتویل	۳۱/۶۸	۵/۴۴	۱/۴۶	۵۴/۸۲	۰/۶۷	–	۰/۹۷	۰/۹۳	–	–	–
پودرسنگ آهک	۲/۰۶	۰/۴۶	۰/۸۹	۹۳/۱۷	۰/۸۳	۰/۳۳	۱/۱۵	۰/۰۴	–	–	–
سیمان تیپ ۲	۲۰/۱۸	۳/۷۸	۳/۷۹	۶۴/۰۷	۱/۲۳	۳/۶	۱/۳۶	۰/۹۶	–	۳۱۵۰	۳۱۷

به‌منظور ایجاد امکان قیاس پوزولان‌ها با توجه به اهمیت دانه‌بندی آن‌ها، آزمون بلین و اندازه ذرات روی پوزولان‌ها انجام شد. بلین میکروسیلیس ازنا مصرفی بیش از $20000\ m^2/kg$ و بلین تراس $650\ m^2/kg$ و بلین پومیس تفتان مصرفی $490\ m^2/kg$ به‌دست آمده و نمودار اندازه ذرات تراس و پومیس به شکل ۳ است.

آزمایش XRD به‌منظور بررسی ساختار کریستالی دو پوزولان تراس و پومیس به‌کار رفته در ترکیبات سه و چهارگانه انجام شد. نتایج نشان داد که فازهای اصلی تراس عبارتند از کوارتز[1]، کلسیت[2] و کلینوپتیلولیت[3] اما پومیس دارای آلبیت[4] و کوارتز و کردیریت[5] است. این فازها در شکل ۴ ارائه و نام‌گذاری شده است.



شکل ۳- مقایسه بلین دو پوزولان تراس و پومیس



شکل۴- مقایسه XRD دو پوزولان تراس و پومیس

۲-۲- ساخت نمونه‌ها

در جریان طرح‌های آزمایشی، ترتیب مناسب‌تر اختلاط به این شکل شد که ابتدا شن و ماسه اضافه شده و مخلوط شوند و سپس سیمان و پوزولان‌ها اضافه شده و مخلوط شوند. سپس پودرسنگ آهک و میکروسیلیس به‌صورت ژل به همراه بخشی از آب اختلاط اضافه شده و در حین اختلاط باقی آب و فوق‌روان‌کننده اضافه شوند.

در جدول ۳ اختلاط‌های نهایی آمده است. در نام گذاری طرح‌ها

[1] Quartz
[2] Calcite
[3] Clinoptilolite
[4] Albite
[5] Cordierite

از یک یا دو حرف ابتدایی پوزولان مصرفی در زبان انگلیسی و درصد استفاده در روبه‌روی حرف استفاده شده است.

جدول۳- یازده طرح شامل ۹ طرح اصلی + (۲ طرح بیشینه و کمینه پوزولانی با ۳ درصد حباب هوا)

اسم	پومیس (Kg/m^3)	تراس (Kg/m^3)	سیمان (Kg/m^3)	شن (۴ تا ۱۲) (Kg/m^3)	فوق روان کننده (Kg/m^3)	ماسه ریز آبتاویل (Kg/m^3)	ماسه ۰-۵ (Kg/m^3)	پودرسنگ آهک (Kg/m^3)	میکروسیلیس (Kg/m^3)	هوازا ٪	آب به مواد سیمانی
SF10	۰	۰	۳۵۰	۷۰۰	۱۰	۲۰۰	۸۰۰	۱۴۰	۳۵	۰	۰/۳۹
SF10T10	۰	۳۵	۳۱۵	۷۰۰	۱۰	۲۰۰	۸۰۰	۱۴۰	۳۵	۰	۰/۳۹
SF10T20	۰	۷۰	۲۸۰	۷۰۰	۱۰/۵	۲۰۰	۸۰۰	۱۴۰	۳۵	۰	۰/۳۹
SF10P10	۳۵	۰	۳۱۵	۷۰۰	۱۰	۲۰۰	۸۰۰	۱۴۰	۳۵	۰	۰/۳۹
SF10P20	۷۰	۰	۲۸۰	۷۰۰	۱۰	۲۰۰	۸۰۰	۱۴۰	۳۵	۰	۰/۳۹
SF10T10P10	۳۵	۳۵	۲۸۰	۷۰۰	۱۲	۲۰۰	۸۰۰	۱۴۰	۳۵	۰	۰/۳۹
SF10T20P10	۳۵	۷۰	۲۴۵	۷۰۰	۱۲/۸۵	۲۰۰	۸۰۰	۱۴۰	۳۵	۰	۰/۳۹
SF10T10P20	۷۰	۳۵	۲۴۵	۷۰۰	۱۲	۲۰۰	۸۰۰	۱۴۰	۳۵	۰	۰/۳۹
SF10T20P20	۷۰	۷۰	۲۱۰	۷۰۰	۱۲/۵	۲۰۰	۸۰۰	۱۴۰	۳۵	۰	۰/۳۹
SF10A3%	۰	۰	۳۵۰	۷۰۰	۱۰	۲۰۰	۸۰۰	۱۴۰	۳۵	٪۳	۰/۳۹
SF10T20P20 A3%	۷۰	۷۰	۲۱۰	۷۰۰	۱۲/۵	۲۰۰	۸۰۰	۱۴۰	۳۵	٪۳	۰/۳۹

SF: Silica Fume, T: Trass, P: Pumice, A: Air-entrainement

۲-۳- شرایط عمل‌آوری

برای عمل‌آوری، نمونه‌ها حداکثر بعد از ۴۸ ساعت از قالب بیرون آورده شده و تا سن ۲۸ روزه در آب اشباع آهکی با دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد قرار داده شدند.

۲-٤- آزمایش‌های انجام شده

آزمایش جریان اسلامپ به جهت سنجش میزان روانی بتن و بر اساس استاندارد ASTM C1611 انجام شده است. آزمایش T50 و آزمایش شاخص پایداری چشمی نیز با استاندارد ASTM C1611 [۲۰] انجام شد. آزمایش حلقه J طبق استاندارد ASTM C1621 [۲۱] و به جهت تعیین میزان قابلیت عبور بتن انجام شده است.

آزمایش واکنش پوزولانی ASTM C311 [۲۲] برای هر پوزولان بر روی ۶ نمونه مکعبی انجام شد. آزمایش مقاومت فشاری بر اساس استاندارد BS 1881-116 [۲۳] هر طرح اختلاط بر روی سه نمونه انجام شده است. آزمایش پوسته‌شدگی بر اساس استاندارد LS 412 [۲۴] و بر روی دو نمونه برای هر طرح اجرا شد (با این توضیح که ابعاد نمونه‌ها ۱۵×۱۵×۱۵ سانتی‌متر مکعب بود). دلیل انتخاب استاندارد LS 412 به جای ASTM C672، کمی بودن تحلیل در این استاندارد به جای تحلیل کیفی، و نیز استفاده از نمک سدیم کلرید بود که نسبت به کلسیم کلرید، کاربرد بیشتری دارد. آزمایش میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM[1]) وآزمایش نقطه‌ای (EDX[2]) بر روی ۶ نمونه انجام شد. آزمایش XRD بر روی ۱۰ نمونه تراشیده شده از سطح پوسته شده بتن انجام شد.

۳- تحلیل نتایج آزمایش‌ها

۳-۱- آزمایش‌های بتن تازه

نتایج آزمایش‌ها بتن تازه روی طرح‌های اختلاط در جدول ۴ ارائه شده است. ضمنا جریان اسلامپ و جی‌رینگ همه طرح‌ها در محدوده قابل پذیرش استانداردهای افنارک و ACI 237 [۲۵،۴] برای تولید بتن خودتراکم قرار داشتند. این محدوده‌ها عبارت از جریان اسلامپ ۶۵۰ تا ۸۰۰ میلی‌متر، T50 بین ۲ تا ۵ ثانیه، حلقه J از ۰ تا ۱۰ میلی‌متر و شاخص پایداری چشمی کمتر از ۲ است.

[1] Scanning Electron Microscope

[2] Energy Dispersive X-ray

در طرح‌های حاوی تراس برای جلوگیری از کاهش شدید جریان اسلامپ، افزایش فوق‌روان‌کننده مدنظر قرار گرفت. همچنین استفاده از ۲۰ درصد تراس SF10T20 و SF10T20P10 ، بیشترین میزان فوق‌روان‌کننده مصرفی، ۱۰/۵ و ۱۲/۸۵ کیلوگرم، در بین طرح‌های سه‌گانه و چهارگانه و نیز بیشترین میزان T50 با ۴/۲ و ۳/۹ ثانیه را ثبت کردند. در ضمن شاخص پایداری چشمی این طرح‌ها برابر یک بود که نشان از کاهش مقاومت جداشدگی داشت. به نظر می‌آید دلیل افزایش ویسکوزیته ساختار، خواص و دانه‌بندی بسیار ریز این پوزولان و جذب آب بتن بوده است.

جدول ۴- نتایج آزمایش رئولوژیکی

شماره طرح	میزان جریان اسلامپ (mm)	میزان جی‌رینگ (mm)	میزان تی۵۰ (S)	شاخص پایداری چشمی
SF10	۶۹۰	۴	۳/۴	۰
SF10T10	۶۵۵	۵	۳/۶	۰
SF10T20	۶۸۰	۶	۴/۲	۱
SF10P10	۶۸۵	۴	۳/۲	۰
SF10P20	۶۸۹	۲	۲/۹	۰
SF10T10P10	۶۸۰	۴	۳/۳	۰
SF10T20P10	۶۵۰	۷	۳/۹	۰
SF10T10P20	۷۱۰	۵	۳/۱	۱
SF10T20P20	۶۹۰	۵	۳/۸	۰
SF10A3%	۷۰۰	۴	۳/۲	۰
SF10T20P20 A3%	۷۱۵	۵	۳/۵	۰

همچنین ترکیبات سه‌گانه حاوی میکروسیلیس و پومیس نسبت به طرح شاهد، کاهش ناچیزی در جریان اسلامپ و یا افزایش فوق‌روان‌کننده در مقایسه با طرح حاوی تراس مشاهده شد. برای مثال SF10P10 و SF10P20 هیچ تغییری در میزان فوق‌روان‌کننده مصرفی، ۱۰ کیلوگرم، نسبت به طرح شاهد نداشتند. در حالی که جریان اسلامپ، جی‌رینگ و T50 در این طرح‌ها به ترتیب ۶۸۵ و ۶۸۹ میلی متر، ۴ و ۲ میلی متر و ۳/۲ و ۲/۹ ثانیه بوده و نشان از بهبود رئولوژی بتن در ترکیب دارای ۲۰٪ پومیس نسبت به ترکیب حاوی ۱۰٪ پومیس داشت. همچنین پومیس در درصدهای به کار رفته تأثیر منفی در مقاومت جداشدگی به جای نگذاشت. در طرح‌های حاوی ترکیبات چهارگانه نیز تأثیر مثبت پومیس نمایان بود. برای مثال طرح SF10T10P20 نسبت به طرح SF10T10P10 علی‌رغم فوق‌روان‌کننده برابر، جریان اسلامپ بیشتر، ۷۱۰ نسبت به ۶۸۰ میلی‌متر و T50 کمتری، ۳/۱ نسبت به ۳/۳ ثانیه، داشت. همچنین طرح‌های هوازایی شده SF10A3% و SF10T20P20A3% ، جریان اسلامپ را به ۷۰۰ و ۷۱۵ میلی‌متر افزایش دادند، اما تغییر محسوسی در نتایج دیگر موارد رئولوژیکی ایجاد نکرد که به‌دلیل عدم اثرگذاری هوازایی بر ویسکوزیته بتن بود. در مجموع ترکیبات چهارگانه نیاز به فوق‌روان‌کننده را به مقدار کمی نسبت به ترکیبات دوگانه و سه‌گانه افزایش دادند.

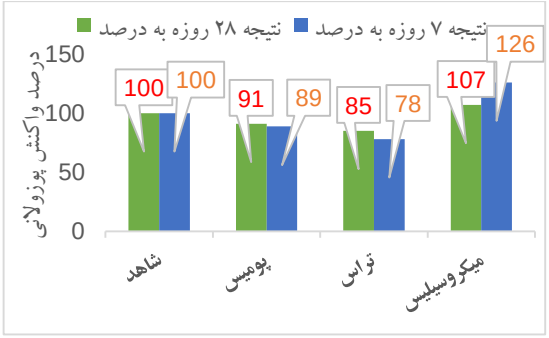
۳-۲- آزمایش‌های بتن سخت‌شده

۳-۲-۱- فعالیت پوزولانی

فعالیت پوزولانی دو پوزولان اصلی مورد آزمایش به همراه میکروسیلیس در جدول ۵ و شکل ۵ قیاس شده‌اند. بنابر نتایج مندرج، در سن ۷ و ۲۸ روز، تکامل فعالیت پوزولانی تراس، ۷۸٪ و ۸۵٪، و پومیس، ۸۹٪ و ۹۱٪، بوده است. اما میکروسیلیس سرعت فعالیت پوزولانی بیشتری، ۱۲۶٪ در هفت روز و ۱۰۷٪ در ۲۸ روز، داشت. عمده روند تکمیل فعالیت پوزولانی پومیس در ۷ روز با اختلاف ۲٪ از نتیجه ۲۸ روزه اتفاق افتاد اما تراس در زمان بین ۷ و ۲۸ رشد قابل توجه‌تری، ۷٪، از خود نشان داد. در مجموع تراس با ۸۵٪ پیشرفت فعالیت پوزولانی کمترین و میکروسیلیس با ۱۰۷٪ پیشرفت واکنش پوزولانی بیشترین سرعت فعالیت پوزولانی ۲۸ روزه را داشتند. پومیس در هر دو سن رشدی بالاتر از تراس داشت که این موضوع علی‌رغم ریزدانگی بیشتر تراس، برتری پومیس در نرخ فعالیت پوزولانی ۷ و ۲۸ روزه نسبت به تراس را نمایش داد. نتیجه آنکه در ترکیبات ۲۸ روزه، انتظار تولید ژل سیلیکاتی بیشتری از نتیجه تکمیل فعالیت پوزولانی پومیس نسبت به تراس می‌رود.

جدول ۵- نتایج آزمایش فعالیت پوزولانی

نام پوزولان	نتیجه ۷ روزه (٪)	نتیجه ۲۸ روزه (٪)
شاهد	۱۰۰	۱۰۰
پومیس	۸۹	۹۱
تراس	۷۸	۸۵
میکروسیلیس	۱۲۶	۱۰۷



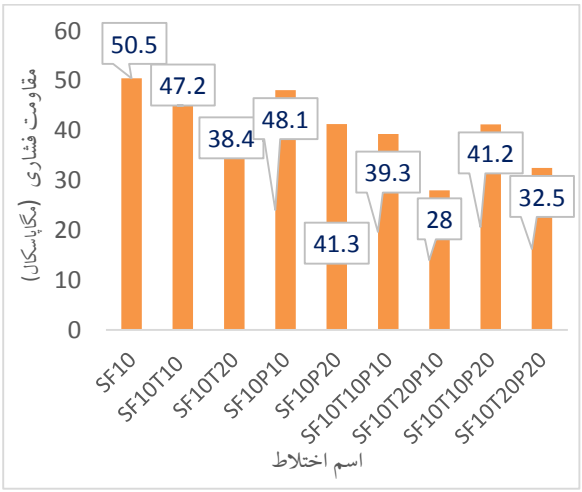
شکل ۵- نمودار درصد واکنش پوزولانی

۳-۲-۲- آزمایش مقاومت فشاری

نتایج آزمایش مقاومت فشاری ۲۸ روزه طبق جدول ۶ و شکل ۶ به‌دست آمده است. SF10 با ۵۰/۵ مگاپاسکال بیشترین و SF10T20P10 با ۲۸ مگاپاسکال کمترین مقاومت فشاری را داشتند. با افزایش پومیس مقاومت کاهش یافت. اما در طرح‌های حاوی تراس در ترکیب‌های سه‌گانه و چهارگانه مقاومت فشاری، با سرعت بیشتری کاهش یافت. این مسئله با توجه به سرعت کمتر فعالیت پوزولانی تراس نسبت به پومیس و هیدراسیون سیمان و به تبع آن تولید ژل سیلیکاتی کمتر، قابل توجیه و منطقی است. نکته مهم در ترکیب‌های چهارگانه، مقاومت فشاری بیشتر SF10T10P20 نسبت به SF10T20 با ۴۱/۲ نسبت به ۳۸/۴ مگاپاسکال، بود، مقاومت این ترکیب چهارگانه تقریبا برابر مقاومت فشاری ترکیب سه‌گانه SF10P20 با ۴۱/۳ مگاپاسکال، بود. این نشان دهنده سازگاری تراس و پومیس در کنار میکروسیلیس و قابلیت رقابت طرح‌های ترکیبی چهارگانه نسبت به سه‌گانه می‌باشد. مورد مهم دیگر تفاوت قابل توجه، ۱۳/۲ مگاپاسکالی، مقاومت فشاری SF10T10P20 نسبت به SF10T20P10 بود که نشان داد کاهش مقاومت فشاری ۲۸ روزه در نتیجه سرعت کم فعالیت پوزولانی تراس در جایگزینی با درصدهای بالاتر ترکیبی چهارگانه تشدید شده است. در نگاه کلی، طرح حاوی ترکیب چهارگانه SF10T10P20 با وجود جایگزینی ۴۰٪ از سیمان با پوزولان‌های مختلف SF10T20 نسبت به دیگر طرح‌های ترکیبی چهارگانه برتر بود. همچنین SF10T10 و SF10P10 هر کدام با جایگزینی ۲۰٪ پوزولان به جای سیمان و کسب حدود ۹۵٪ از مقاومت نمونه SF10 در مجموع مناسب‌ترین طرح‌ها شناخته شدند. در ضمن ترکیبات چهارگانه در مجموع عملکرد ضعیف‌تر اما قابل قبولی نسبت به ترکیبات سه‌گانه داشتند ضمن اینکه بعضی از طرح‌های ترکیبات چهارگانه بر بعضی ترکیبات سه‌گانه برتری داشتند. این مسئله را می‌توان به دلیل فعالیت کندتر پوزولان‌ها و تولید ژل کمتر و در نتیجه وجود حفرات خالی بیشتر دانست. در ضمن این موارد با نتایج آزمایش فعالیت پوزولانی مطابقت داشتند.

جدول ۶- مقاومت فشاری ۲۸ روزه طرح‌ها

ترکیب اختلاط	مقاومت فشاری (MPa)
SF 10	۵۰/۵
SF10T 10	۴۷/۲
SF10T20	۳۸/۴
SF10P10	۴۸/۱
SF10P20	۴۱/۳
SF10T10P10	۳۹/۳
SF10T20P10	۲۸
SF10T10P20	۴۱/۲
SF10T20P20	۳۲/۵



شکل ۶- نمودار مقاومت فشاری طرح‌های مختلف در سن ۲۸ روز

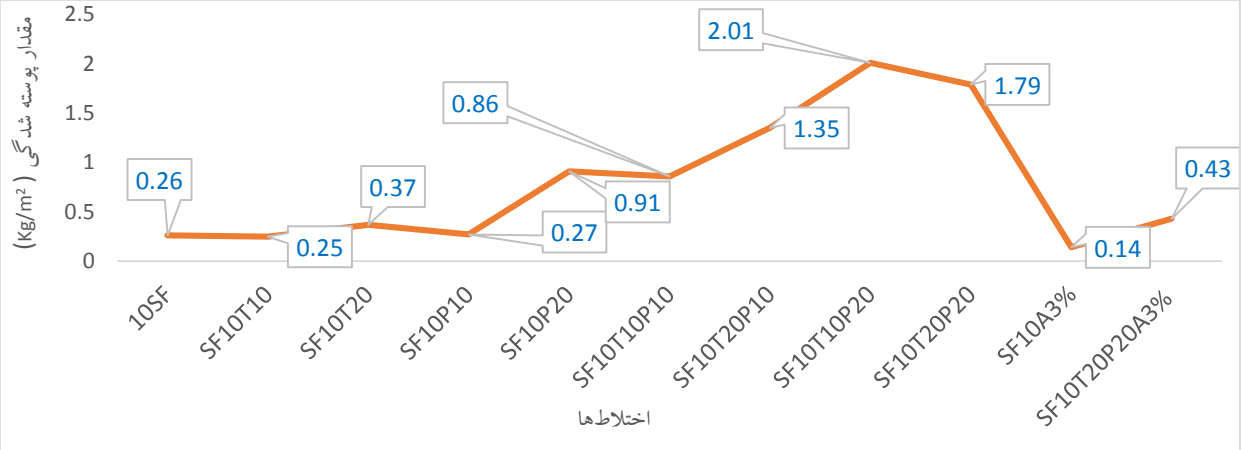
۳-۳- آزمایش پوسته‌شدگی

نتایج این آزمایش در جدول ۷ و شکل ۷ ارائه شده است. به‌منظور یکسان سازی حداکثری متغیرهای گوناگون مؤثر بر پوسته‌شدگی، آزمایش اندازه‌گیری درصد هوا انجام شد و طرح‌های بدون هوازایی در آزمایش تعیین درصد هوا میزان یکسان ۱٪ هوا داشتند. آزمایش پوسته‌شدگی برای بررسی کمی و کیفی تأثیر ترکیب‌های پوزولانی اعمالی بر مقاومت بتن در برابر پوسته‌شدگی و نیز تأثیر هوازایی بر نتایج انجام شد. نتایج ۵۰ چرخه ذوب و یخ نمکی نشان

داد که ترکیب پوزولانی سه‌گانه SF10T10 با ۰/۲۵ کیلوگرم بر متر مربع پوسته‌شدگی، بهترین عملکرد و SF10T10P20 با ۲/۰۱ کیلوگرم بر متر مربع پوسته‌شدگی، نامطلوب‌ترین عملکرد را بین نمونه‌های هوازایی نشده کسب کردند.

جدول ۷- نتایج آزمایش پوسته‌شدگی

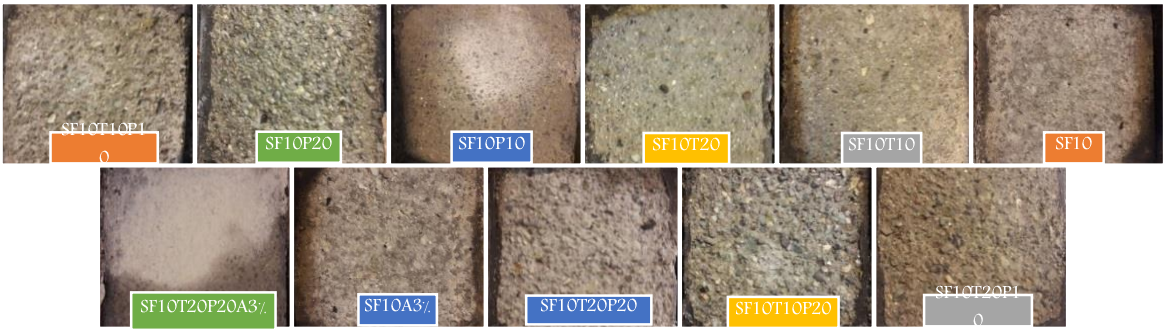
شماره طرح	مقدار پوسته‌شدگی در هر هفت روز به گرم							جمع به گرم	Kg/m²
SF10	۰/۳	۰/۴	۰/۲	۰/۹	۰/۷	۱/۷	۱/۶	۵/۸	۰/۲۶
SF10T10	۰/۸	۰/۵	۰/۶	۰/۷	۰/۴	۱/۴	۱/۲	۵/۶	۰/۲۵
SF10T20	۰/۹	۰/۵	۰/۷	۰/۸	۰/۲	۲/۷	۲/۵	۸/۳	۰/۳۷
SF10P10	۰/۷	۰/۸	۰/۹	۰/۳	۰/۶	۱/۴	۱/۳	۶	۰/۲۷
SF10P20	۴	۲/۹	۲/۱	۲/۳	۴/۱	۲/۶	۲/۵	۲۰/۵	۰/۹۱
SF10T10P10	۹	۱/۳	۱	۰/۹	۱/۶	۲/۷	۲/۸	۱۹/۳	۰/۸۶
SF10T20P10	۱۰	۱/۳	۱/۲	۴/۵	۴/۹	۴/۲	۴/۲	۳۰/۳	۱/۳۵
SF10T10P20	۱۵/۴	۵/۹	۳/۲	۴/۷	۶/۶	۴/۶	۴/۵	۴۴/۹	۲/۰۱
SF10T20P20	۱۶	۳/۲	۳/۲	۵	۴/۳	۴/۴	۴/۲	۴۰/۳	۱/۷۹
SF10A3%	۰/۲	۰/۴	۰/۳	۰/۵	۰/۲	۰/۷	۰/۹	۳/۲	۰/۱۴
SF10T20P20A3%	۰/۴	۱/۱	۰/۷	۱/۳	۱/۴	۲/۴	۲/۵	۹/۸	۰/۴۳



شکل ۷- نمودار تغییرات پوسته‌شدگی طرح‌های مختلف

در نگاه کلی، با افزایش نوع و کمیت پوزولان‌های مصرفی در ترکیب‌های سه و چهارگانه، افزایش قابل توجه پوسته‌شدگی رخ داد. در ضمن هیچ کدام از طرح‌های چهارگانه با ۰/۸۶ تا ۲/۰۱ کیلوگرم بر متر مربع پوسته‌شدگی، نتایج قابل قبولی از خود نشان ندادند. فلذا همان‌طور که در مقدمه توضیح داده شد، به سبب نقش مثبت هوازایی بتن در کسب مقاومت در برابر پوسته‌شدگی، دو طرح SF10A3% و SF10T20P20A3% جهت آزمایش امکان بهبود مقاومت ترکیب‌های پوزولانی با هوازایی، انتخاب شدند. نتایج نشان داد پوسته‌شدگی دو طرح هوازایی شده کاهش قابل‌توجهی نسبت به طرح هوازایی نشده مشابه دارد. چنان‌که SF10A3% در مقایسه با SF10 به ترتیب با ۰/۱۴ و ۰/۲۶ کیلوگرم بر متر مربع پوسته‌شدگی، ۷۶٪ کاهش را نشان داد. همچنین، SF10T20P20A3% در مقایسه با SF10T20P20 به ترتیب با ۰/۴۳ و ۱/۷۹ کیلوگرم بر متر مربع پوسته‌شدگی، ۴۶٪ کاهش را نشان داد. از این مسئله، می‌توان نتیجه گرفت که علی‌رغم کاهش قابل توجه مقاومت در برابر پوسته‌شدگی نمکی در طرح‌های حاوی مقدار زیاد پوزولان در بین ترکیب‌ها می‌توان با هوازایی، تا اندازه بسیار قابل قبولی از میزان پوسته‌شدگی کاست. در مجموع این نتیجه

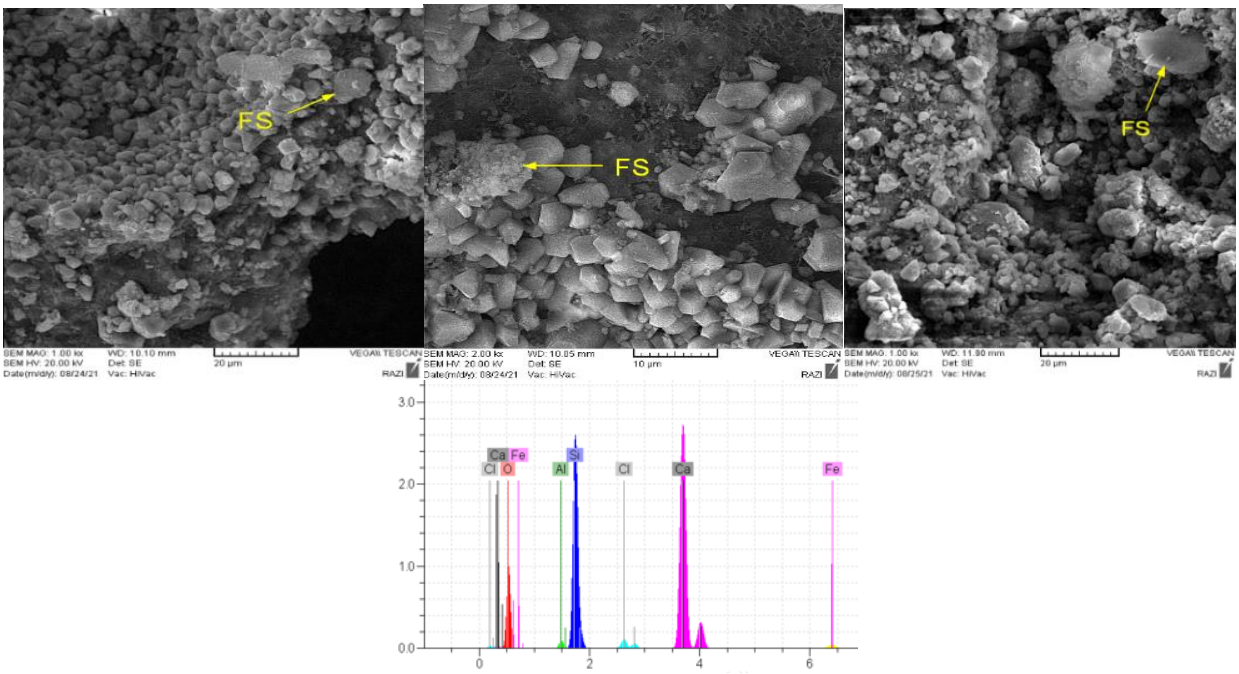
حاصل شد که ترکیبات سه‌گانه عملکرد بهتری نسبت به ترکیبات دوگانه و چهارگانه داشتند اما با هوازایی می‌توان عملکرد ترکیبات چهارگانه را تا حدود بسیار زیادی بهبود بخشید. شکل ۸ پوسته‌شدگی سطح طرح‌های مختلف را نمایش می‌دهد.



شکل ۸- نمونه‌های بتنی بعد از آزمایش پوسته‌شدگی

۳-٤- آزمایش SEM و EDX

در محل تخریب نمونه‌های پوسته‌شده از آن‌ها عکس‌برداری میکروسکوپی صورت گرفت. اترینگایت و نمک فریدل (با نماد FS)، در محل پوسته-شدگی رویت شد که در شکل‌های ۹ تا ۲۰ نمایش داده شده است.



شکل ۹ تا ۱۲- نمک فریدل در بتن بعد ازآزمایش پوسته‌شدگی و EDS آن‌ها

این نتایج با فرمولاسیون اترینگایت که دارای پیک‌های اصلی Al, Ca, S است و نیز فرمولاسیون و نتایج تحقیقات پیشین نمک فریدل دارای پیک‌های اصلی Al, Cl, Ca مطابقت کامل دارند. و اترینگایت را اثبات کرد.

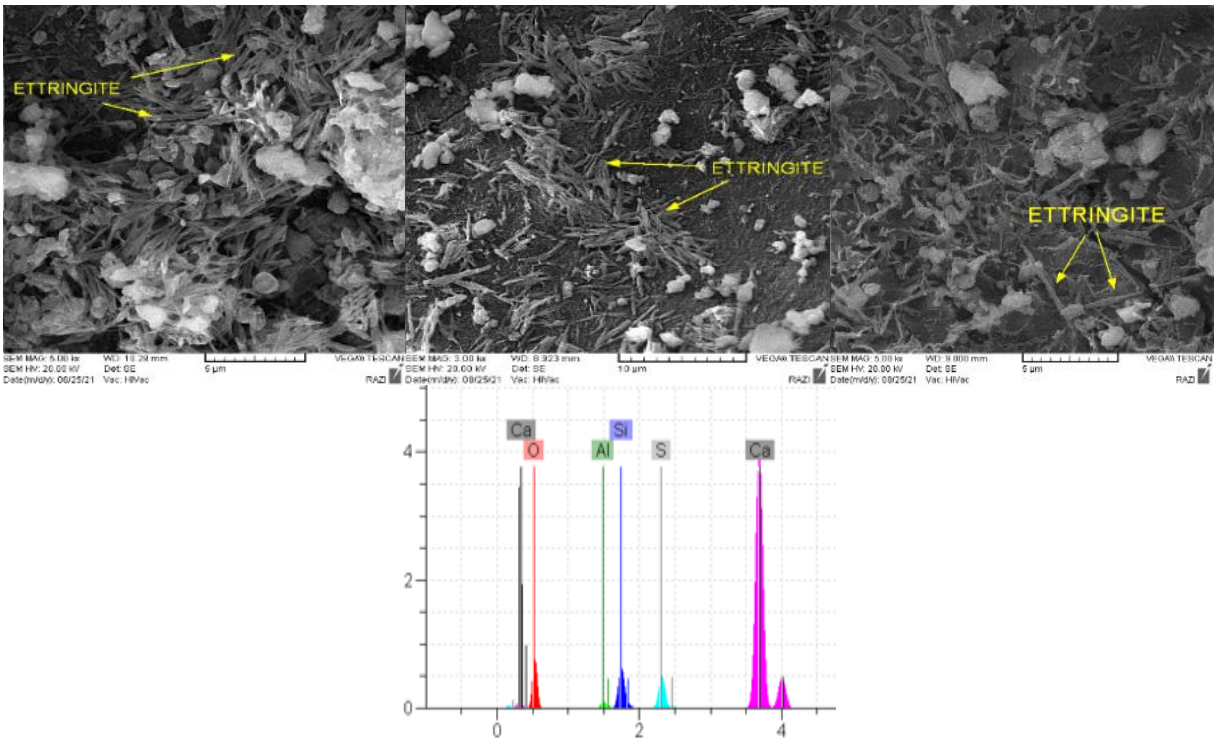
۳-۵- آزمایش XRD روی سطح بتن

نتایج این آزمایش روی نمونه‌های پودر شده از سطح پوسته‌شده، که در شکل‌های ۲۱ و ۲۲ نشان داده شده است، وجود نمک فریدل

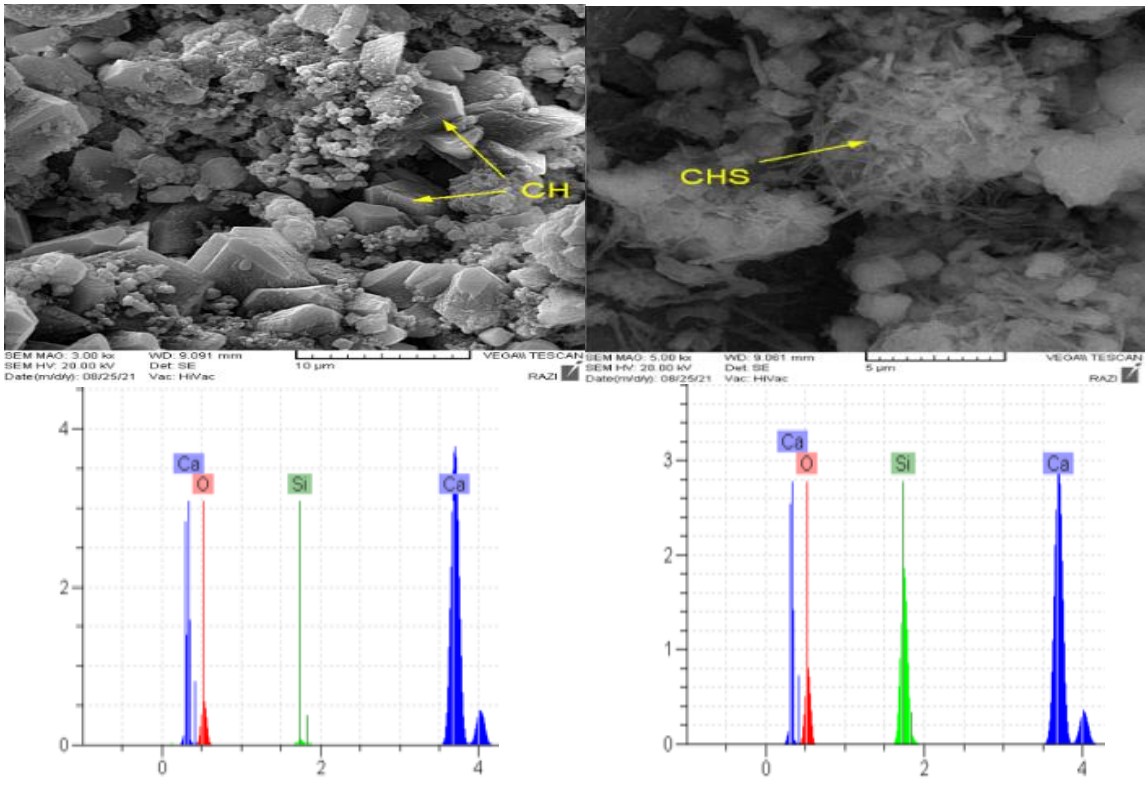
٤- نتیجه‌گیری

با توجه به مجموعه آزمایش‌ها انجام شده می‌توان نتیجه گرفت:

- ترکیبات چهارگانه مقدار فوق‌روان‌کننده بیشتری نسبت به ترکیبات سه‌گانه و دوگانه جهت کسب جریان اسلامپ مورد نیاز مصرف کردند اما خواص رئولوژیک مناسبی داشتند.



شکل ۱۳ تا ۱۶- اترینگایت تشکیل شده از نتیجه تخریبهای پوسته‌شدگی و EDS آن‌ها

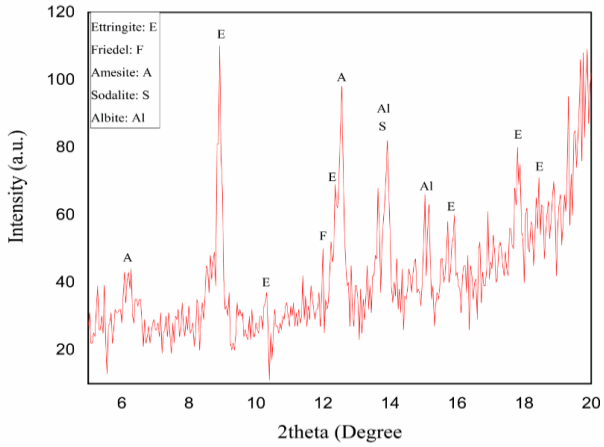


شکل ۱۷ تا ۲۰- CSH-CH پوزولانی تشکیل شده و EDS آن‌ها

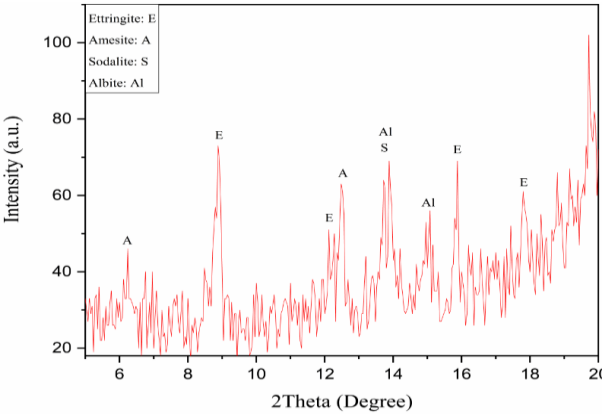
- تراس کمترین سرعت واکنش پوزولانی را نسبت به پومیس و میکروسیلیس داشت و پومیس نیز برخلاف میکروسیلیس سرعت فعالیت پوزولانی کمتری نسبت به هیدراسیون سیمان در سن ۲۸ روز داشت.
- ترکیبات سه‌گانه به‌طور کلی عملکرد بهتری در مقاومت فشاری نسبت به ترکیبات چهارگانه داشتند.

- ترکیب سه‌گانه حاوی ۱۰٪ تراس و میکروسیلیس، بهترین عملکرد را در پوسته‌شدگی داشتند. ولی مقاومت در برابر پوسته‌شدگی بتن حاوی ترکیبات چهارگانه بسیار کمتر بود. در حالی‌که نتایج آزمایش نمونه‌های هوازایی شده نتایج دلگرم‌کننده‌ای مبنی بر امکان کنترل و کاهش محسوس میزان پوسته‌شدگی ترکیبات پوزولانی دیگر با استفاده از هوازایی برجای گذاشت. چنانکه پوسته‌شدگی طرح چهارگانه حاوی بیشترین پوزولان سه درصد هوازایی شده، نسبت به طرح مشابه هوازایی نشده، ۷۶٪ کاهش پیدا کرد.

- از نتایج آزمایش‌های SEM، EDS این نتیجه برداشت شد که در محل تخریب بتن به وسیله پوسته‌شدگی، اترینگایت و نمک فریدل مشاهده شد. جدای از عکس‌برداری‌ها و EDS، حتی XRD سطح تراشیده شده‌ی بتن اثبات کننده وجود این دو ماده بود.



شکل ۲۱- XRD از SF10T20P20 جهت اثبات وجود نمک فریدل و اترینگایت



شکل ۲۲- SF10P20 جهت اثبات وجود نمک فریدل و اترینگایت

۵- مراجع

[1] ASTM C618, “Standard Specification for Coal Fly... - Google Scholar . Available from: https://scholar.google.com/scholar?hl=en&as_sdt=0%2C5&q=ASTM+C618%2C+“Standard+Specification+for+Coal+Fly+Ash+and+Raw+or+Calcined+Natural+Pozzolan+for+Use+as+a+Mineral+Admixture+in+Concrete”%2C+ASTM+Publication%2C+United+States%2C+1999&btnG=.

[2] Ma A, Abba SI, Nuruddeen MM. Self-Compacting Concrete – A Review. 2017;[May 2018].

[3] Okumara H, Ouchi M. Self-compacting concrete development, present use and future. 1st Int RILEM Symp Self-Compacting Concr. 1999;3–14. Available from: https://books.google.com/books?hl=fa&lr=&id=D4Vn96zmWuwC&oi=fnd&pg=PA3&ots=dtMWyFnCmX&sig=fl4FKxWkKQCv4qx3zgkd93VCUKs.

[4] ACI Committee 237. 237R-07 Self-Consolidating Concrete. Mi, Usa. 2007. 30 p.

[۵] رمضانیانپور, علی اکبر، ذوالفقارنسب.آرش، بهمنزاده.فرناز، پورابراهیمی.محمدرضا. بررسی عملکرد پوزولان تراس بر خواص مکانیکی و دوام بتن خود تراکم تبریز: دهمین کنگره بین المللی مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران; ۱۳۹۴. p. 8 .

[6] Benli A, Karataş M, Sastim MV. Influence of ground pumice powder on the bond behavior of reinforcement and mechanical properties of self-compacting mortars. Comput Concr 2017 20[3]:283–90. Available from: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061817311273?casa_token=KTQBP_RkrmgAAAAA:I4_HGj9krQUewoK6IowrL-QPfDPCA9Sevil0bimTnrS6gxxF4V3FC0FnoDlt0ZhjE6dMbe75_cI.

[7] Askarian M, Fakhretaha Aval S, Joshaghani A. A comprehensive experimental study on the performance of pumice powder in self-compacting concrete [SCC]. J Sustain Cem Mater. 2018 Nov 2;7[6]:340–56.

[8] Bani Ardalan R, Joshaghani A, Hooton RD. Workability retention and compressive strength of self-compacting concrete incorporating pumice powder and silica fume. Constr Build Mater. 2017;134:116–22.

[۹] طریقت،امیر،کوشکی جهرمی،امیر ,امیرکبیر, ۲۰۲۱ . تأثیر پودر پومیس طبیعی تفتان و میکروسیلیس بر خواص مکانیکی و دوام بتن. https://iranjournals.nlai.ir/handle/123456789/803238.

[10] Janusz A. Investigation of deicing chemicals and their interactions with concrete materials ۲۰۱۰ ;

Available from: https://docs.lib.purdue.edu/dissertations/AAI1489623/.
[11] Zhang X, Wang L, Zhang J. Mechanical behavior and chloride penetration of high strength concrete under freeze-thaw attack. Cold Reg Sci Technol. 2017 Oct 1;142:17–24.
[12] Liu Z, Hansen W. Pore damage in cementitious binders caused by deicer salt frost exposure. Constr Build Mater. 2015 Nov 15;98:204–16.
[13] Beckett D. Influence of carbonation and chlorides on concrete durability. Concrete. 1983;17[2].
[14] Hime WG. Corrosion of Steel--Random Thoughts and Wishful Thinking. Concr Int. 1993;15[10]:54–7.
[15] Alonso C, Andrade C, Castellote M, Castro P. Chloride threshold values to depassivate reinforcing bars embedded in a standardized OPC mortar. Cem Concr Res. 2000;30[7]:1047–55.
[16] Nili M, Zaheri M. Deicer salt-scaling resistance of non-air-entrained roller-compacted concrete pavements. Elsevier. 2011; Available from: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095006181000499X.
[17] MAILLARD JL, ROUGEAU P, MARY-DIPPE C. Comparative study on properties of SCC and HPC concrete used in precast construction. In: Self-compacting concrete. France: RILEM Publications, Cachan; 1999.
[۱۸] رمضانیانپور، علی اکبر ، جعفری، محسن، پورجوادی، علی. اثر انواع سیمان ها و حباب هوای وارد شده بر مقاومت بتن در برابر پوسته شدگی در مجاورت نمک. ۱۳۹۱.
[19] Ramezanianpour AA, Mohammadi A, Dehkordi ER, Chenar QB. Mechanical properties and durability of roller compacted concrete pavements in cold regions. Constr Build Mater. 2017 Aug 15;146:260–6.
[20] ASTM Committee C09.47. ASTM C1611-09 Standard Test Method for Slump Flow of Self-Consolidating Concrete. Annu B ASTM Stand Vol 0402. 2009;i:1–6.
[21] ASTM C1621. C 1621M-09b "Standard Test Method for Passing Ability of Self-Consolidating Concrete by J-Ring." Annu B ASTM Stand. 2014;i:5.
[22] ASTM C 311-04. Standard Test Methods for Sampling and Testing Fly Ash or Natural Pozzolans for Use in Portland-Cement Concrete. Annu B ASTM Stand. 2005;04.02:204–12.
[23] BS 1881-116. Testing concrete - Part 116 : Method for determination of compressive strength of concrete cubes. Br Stand. 2010;2[2]:1–14.
[24] MTO LS-412-R17. Method of Test for Scaling Resistance of Concrete Surfaces Exposed to Deicing Chemicals. Minist Transp Ontario Lab Test Man. 1997;[17]:1–5.
[25] EFNARC The European Guidelines for Self-Compacting Concrete: Specification P and U. The European Guidelines for Self-Compacting Concrete: Specification, Production and Use. Eur Guidel Self Compact Concr. 2005.

Investigation on scaling of SCC containing pozzolanic blends

Ali Maleki
M.Sc. Candidate, school of Civil Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.
Amir Mohammad Ramezanianpour *
Associate professor, school of Civil Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.
Iradj Mahmoudzadeh kani
Professor, school of Civil Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.

Abstract

Pozzolans are alumina-silicate materials, partially replacing cement to improve many durability features of concrete. They can also help the environment and contribute to sustainable development through reducing the production of cement, culminating in the decrease of carbon-dioxide. One of the important applications of pozzolans is in the production of self-consolidating concrete (SCC), a concrete that has been receiving extensive attention nowadays due to its properties. On the other hand, one of the durability features is the resistance of concrete against scaling due to freezing and thawing in the presence of salt that generally causes distress in the surface of concrete. In some previous studies, it was observed that binary (one pozzolan along with cement) and ternary (two pozzolans along with cement) blends decreased resistance against salt scaling despite providing considerable improvements in durability characteristics of concrete. There has been limited studies done on scaling resistance of ternary and quaternary blends (three pozzolans along with cement) to date. Hence, the purpose of this study was to investigate the effect of binary, ternary and quaternary blends on SCC scaling. For this purpose, 0, 10 and 20 percent of trass and pumice, beside 10% of silica fume was used in 9 mixtures in addition to two mixtures with 3% air-entrainment. The results illustrated that a ternary mix had the best performance among non-air-entrained mixtures. Overall, binaries and ternaries illustrated good scaling resistance compared to quaternaries. In addition, air-entrainment significantly increased resistance against salt scaling.

Keywords: SCC, binary, ternary and quaternary blends, scaling.

* Corresponding Author: ramezanian@ut.ac.ir