

بررسی عملکرد مکانیکی و دوامی بتن خودتراکم حاوی سیمان آمیخته چند پوزولانی

علی ملکی^۱، امیرمحمد رضانیانپور^{۲*}، ایرج محمودزاده کنی^۳

۱. دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشکدگان فنی دانشگاه تهران
۲. دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشکدگان فنی دانشگاه تهران
۳. استاد دانشکده مهندسی عمران، دانشکدگان فنی دانشگاه تهران

ramezianian@ut.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۳/۲۷

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۸/۲۰

چکیده

یکی از راهکارهای مناسب برای کاستن از تولید کربن دی‌اکسید ناشی از تولید سیمان، استفاده از پوزولان‌ها به جای بخشی از سیمان است. استفاده از پوزولان‌ها در سیمان آمیخته دوگانه (یک پوزولان در کنار سیمان)، در عمده موارد منجر به بهبود دوام بتن می‌شود. یکی از کاربردهای گسترده پوزولان‌ها در بتن خودتراکم است، بتنی که در سال‌های اخیر به لحاظ ویژگی‌هایش، مورد اقبال قرار گرفته است. در پژوهش‌های جدید روی استفاده از سیمان آمیخته سه‌گانه (دو نوع پوزولان در کنار سیمان)، بهبود قابل توجه خواص دوامی بتن خودتراکم نسبت به سیمان آمیخته دوگانه مشاهده شد. اما تحقیقات درباره سیمان آمیخته سه‌گانه و خصوصاً سیمان آمیخته چهارگانه (سه نوع پوزولان در کنار سیمان) محدود بوده است. در حالیکه که انتظار می‌رود سیمان آمیخته چهارگانه جدای از مزیت‌های زیست‌محیطی قابل ملاحظه، به بهبود دوام بتن کمک کند. بنابراین هدف از این پژوهش، مطالعه تاثیر استفاده از سیمان آمیخته دوگانه، سه‌گانه و چهارگانه بر خواص دوامی بتن خودتراکم است. به این منظور، از پوزولان‌های تراس و پومیس هر کدام با مقادیر جایگزینی ۰، ۱۰ و ۲۰٪، در کنار ۱۰٪ میکروسیلیس به صورت ثابت استفاده شد. آزمایش‌های مقاومت فشاری، آزمایش فراصوت، عمق نفوذ آب، جذب آب حجمی، مقاومت الکتریکی و مقاومت در برابر نفوذ یون کلراید تسریع شده، انجام شد. نتایج نشان دادند که استفاده از سیمان آمیخته سه‌گانه و چهارگانه منجر به کاهش مقاومت فشاری و کاهش جزئی سرعت فراصوت و حفظ یا بهبود دوام در بتن خودتراکم شد. عملکرد سیمان آمیخته سه‌گانه در نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری، آزمایش فراصوت و عمق نفوذ نسبت به سیمان آمیخته چهارگانه به صورت جزئی بهتر بود. در حالی که سیمان آمیخته چهارگانه مقاومت در برابر نفوذ یون کلراید را نسبت به سیمان آمیخته دوگانه و سه‌گانه بهبود قابل توجهی داد. همچنین، همه طرح‌ها، جذب آب حجمی و مقاومت الکتریکی مشابه مطلوبی داشتند.

واژگان کلیدی: بتن خودتراکم، سیمان آمیخته دوگانه، سیمان آمیخته سه‌گانه، سیمان آمیخته چهارگانه، دوام

۱ - مقدمه

شده در جهان، به صورت ویژه‌ای در این زمینه مورد توجه قرار گرفته است [1]. در نتیجه، تحقیقات بسیاری به منظور امکان‌سنجی کاهش مصرف سیمان و جایگزینی بخشی از آن با مصالح دوست‌دار محیط‌زیست در بتن صورت گرفت که نتیجه آن استفاده از پوزولان‌ها بود. پوزولان‌ها موادی سیلیکاتی یا آلومینو-سیلیکاتی هستند که به دو صورت مصنوعی، که نتیجه

با افزایش روزافزون اهمیت محیط‌زیست در بخش‌های گوناگون صنعت، استفاده از مصالح دوست‌دار محیط‌زیست در مهندسی عمران، مورد تاکید قرار گرفته است. سیمان به عنوان یکی از پرمصرف‌ترین مصالح آلوده‌کننده محیط زیست با مصرف ۱۳٪ از انرژی مصرفی جهانی و تولید ۷ درصد از کربن دی‌اکسید تولید

نهایی یا جانبی کارخانه‌هایی مثل آلیاژهای فروسیلیس یا نیروگاه‌های زغال‌سنگ هستند و طبیعی، شامل توف‌ها، خاک‌های دیاتومه، شیل‌ها و خاکستر آتشفشان‌ها تقسیم بندی می‌شوند [2]. به عنوان نمونه، تراس و پومیس دو نوع پوزولان طبیعی در ایران هستند که اولی در جاجرود، و دومی در سیستان و بلوچستان و نیز در دماوند و سبلان یافت می‌شود.

از طرفی یکی از کاربردهای مهم پوزولان‌ها، در بتن خودتراکم است. نوآوری این بتن که تحت وزن خود جاری شده و قابلیت عبور از بین میلگردها و جلوگیری از جداشدگی دارد، یکی از مهمترین نوآوری‌های مهندسی در زمینه بتن بوده است [3, 4]. این بتن به مواد ریزدانه به منظور بهبود دانه‌بندی نیازمند است که در این راستا می‌توان از پوزولان‌ها استفاده نمود [5].

مزایای فراوان پوزولان‌ها در حفظ خواص مکانیکی و بهبود خواص دوامی بتن خودتراکم در بسیاری تحقیقات مشاهده شده است. برای نمونه پژوهشگران مشاهده کردند که با استفاده از سیمان آمیخته دوگانه^۱ (یک پوزولان در کنار سیمان) دارای تراس یا پومیس در درصدهای کمتر از ۳۰، مقاومت فشاری نسبت به نمونه شاهد کاهش یافت، اما در سن ۹۰ روز بهبود یافت [9-6]. هرچند بعضی پژوهشگران کاهش مقاومت فشاری ناشی از فعالیت پوزولانی کمتر پومیس نسبت به هیدراسیون سیمان را مربوط به همه سنین می‌دانند [10]. در تحقیقاتی دیگر، پژوهشگران دریافتند که تراس در سیمان آمیخته دوگانه، با کاهش نفوذپذیری از میزان نفوذ یون کلراید کاسته است، به گونه‌ای که ۴۰٪ کاهش نفوذ کلراید به ازای ۲۰٪ استفاده از تراس در سن ۲۸ روز، مشاهده شد. همچنین مشاهده شد که مقاومت الکتریکی بتن خودتراکم نیز با استفاده از این ماده افزایش یافته است، مثلاً ۲۰٪ جایگزینی تراس در سن ۲۸ روز مقاومت الکتریکی را دو برابر کرده است [6, 11]. همچنین پژوهشگران در بتن خودتراکم حاوی ترکیب‌های دوگانه دارای پومیس کمتر از ۳۰٪، دریافتند که مقاومت الکتریکی ثابت مانده، اما در درصدهای بالاتر به کارگیری پومیس، افزایش یافته است، برای مثال، در سن ۲۸ روز و جایگزینی ۵۰٪ پومیس مقاومت الکتریکی ۲ برابر شده است. همچنین استفاده از ۱۰٪ پومیس در سیمان آمیخته دوگانه،

جذب آب حجمی بتن را کمی افزایش داد اما در درصدهای بالاتر استفاده از پومیس، جذب آب حجمی کاهش یافت، ضمن اینکه در سن ۹۱ روز جذب آب حجمی این طرح‌ها نسبت به نمونه شاهد کمتر بود [12, 13]. در تحقیقی دیگر، پژوهشگران با جایگزینی ۱۵٪ پومیس افزایش در عمق نفوذ را نسبت به نمونه شاهد، مشاهده کردند، در حالی که در جایگزینی ۷/۵ درصد از پومیس، شاهد کاهش عمق نفوذ در سن ۲۸ روز بودند بودند. ضمن اینکه در هر دو طرح در سن ۹۱ روز، کاهش عمق نفوذ نسبت به طرح شاهد، مشاهده شد [13]. از این تحقیقات می‌توان نتیجه‌گیری نمود که میزان بهبود دوام بتن حاوی سیمان آمیخته دوگانه پوزولانی جدای از نوع پوزولان، به سن و درصد استفاده از آن، بستگی دارد. این تغییرات به سبب تاثیر میزان نوع ژل سیلیکاتی تولید شده و نیز میزان خاصیت پرکنندگی ناشی از انواع پوزولان‌ها در سن و درصدهای مختلف به کار رفته است. اما در تحقیقات اخیر، پژوهشگران متوجه تاثیر قابل توجه هم‌افزایی سیمان آمیخته سه‌گانه^۲ (دو پوزولان در کنار سیمان) در بهبود قابل توجه خواص دوامی در عین کنترل و در مواردی بهبود خواص مکانیکی بتن خودتراکم شدند. پژوهشگران مشاهده کردند که طرح حاوی ۲۵٪ پومیس به همراه ۵٪ میکروسیلیس در سن ۲۸ روز مقاومت را کاهش داد، اما در سن ۹۱ روز افزایشی، به میزان ۱۰ مگاپاسکال، مشاهده شد. حال آنکه طرح ۴۰٪ پومیس و ۱۰٪ میکروسیلیس در هر دو سن دارای مقاومتی بیش از طرح شاهد بود [9]. در تحقیق دیگری مشاهده شد که استفاده از سیمان آمیخته سه‌گانه حاوی میکروسیلیس و پومیس، جذب آب مویینه را به طرز قابل توجهی کاهش داد و حتی در ترکیب حاوی ۲۰٪ پومیس با ۱۰٪ میکروسیلیس جذب آب تقریباً به صفر رسید. همچنین، مقاومت الکتریکی در مقایسه با طرح حاوی سیمان آمیخته دوگانه با پومیس، دو برابر شد [8]. در تحقیق دیگری، طرح حاوی سیمان آمیخته سه‌گانه متشکل از ۶۰ درصد پومیس و ۹ درصد میکروسیلیس انتشار کلراید را نسبت به طرح کنترل، ۸ برابر کاهش داد. همچنین، جذب آب حجمی را نسبت به طرح کنترل و طرح‌های حاوی

تحقیقات محدودی روی سیمان آمیخته چندگانه پوزولانی در بتن خودتراکم انجام شده است و این تحقیقات بعضی از شاخص‌های دوامی را نیز در بر نمی‌گیرد پس این کمبود در تحقیقات پیشین مشاهده می‌شود. بنابراین رویکرد اصلی این تحقیق، ارزیابی و مقایسه نتایج دوامی استفاده از سیمان آمیخته دوگانه، سه‌گانه و چهارگانه پوزولانی با استفاده از تراس جاجرود و پومیس تفتان و میکروسیلیس به عنوان سه پوزولان فراوان در ایران، در بتن خودتراکم بوده است. در این زمینه از ۹ طرح اختلاط دارای ۱۰٪ میکروسیلیس به صورت ثابت، در کنار درصد‌های متغیر ۰، ۱۰ و ۲۰ از تراس و پومیس استفاده شد. همچنین تلاش شد تا با ارائه کامل‌ترین نتایج در رابطه با آثار هم‌افزایی پوزولان‌ها، افق دید جدیدی در استفاده گسترده‌تر از پوزولان‌ها در کشورمان ایجاد شود.

۴- برنامه آزمایشگاهی

۴-۱- مشخصات مصالح مصرفی

در این پژوهش، سیمان به کار رفته تپ دو ساوه بوده و دارای وزن مخصوص $3/15 \text{ gr/cm}^3$ می‌باشد. از شن نخودی به وزن مخصوص خشک $2/65 \text{ gr/cm}^3$ و جذب آب ۳٪ و ماسه استاندارد به وزن مخصوص خشک $2/6 \text{ gr/cm}^3$ و جذب آب برابر ۲/۴٪ استفاده شد. همچنین ماسه بادی به وزن مخصوص خشک $2/69 \text{ gr/cm}^3$ و جذب آب ۲/۷۴٪ به کار گرفته شد. دانه‌بندی شن و ماسه‌ها در شکل‌های ۱ و ۲ ارائه شده است. همچنین به منظور رسیدن به کارایی مناسب در طرح‌های اختلاط، از فوق‌روان‌کننده کربوکسیلاتی اتر استفاده شد.

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

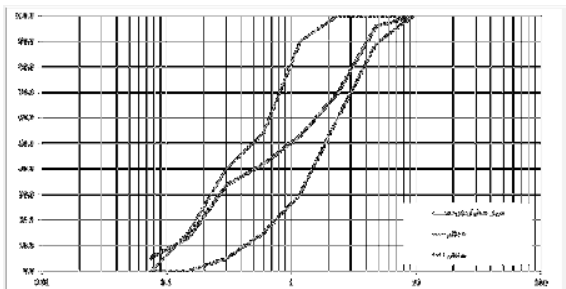


Fig. 1. particle size of conventional and fine sand according to standard limit

سیمان‌های آمیخته دوگانه متنوع، به طور متوسط به ترتیب ۵۰٪ و ۳۳٪ کاهش داد [14].

در مورد بتن‌های خودتراکم حاوی سیمان آمیخته چهارگانه^۱ (سه پوزولان در کنار سیمان) تحقیقات محدودتری صورت گرفته است. برای نمونه تحقیقی روی بتن‌های خودتراکم حاوی سیمان‌های آمیخته دوگانه، سه‌گانه و چهارگانه با استفاده از پوزولان‌های میکروسیلیس، سرباره و خاکستر بادی انجام گرفت. نتیجه آن شد که طرح‌های حاوی سیمان‌های آمیخته سه و چهارگانه مقاومت فشاری را تا حدودی نسبت به طرح حاوی سیمان دوگانه و یا کنترل کاهش دادند. اما طرح چهارگانه نفوذپذیری کلرایدی را به صورت قابل توجهی کاهش داد [15]. نتایج تحقیقات روی طرح‌های حاوی سیمان آمیخته سه‌گانه و چهارگانه حاوی به ترتیب متاکائولن و پودرسنگ آهک و نیز خاکسترپوسته‌برنج، متاکائولن و پودرسنگ آهک این نتیجه را تایید کرد [16]. در تحقیق دیگری روی همین پوزولان‌ها، مشخص شد که طرح‌های چهارگانه حاوی ۲۰٪ خاکستر بادی و ۱۰٪ میکروسیلیس و ۲۰٪ سرباره و یا ۳۰٪ خاکستر بادی، ۱۵٪ میکروسیلیس و ۳۰٪ سرباره، مقاومت فشاری تقریباً یکسانی با طرح کنترل داشتند. در طرح‌های حاوی درصد جایگزینی پوزولان تا ۵۰٪ و ۷۵٪، طرح‌های چهارگانه و سه‌گانه مقاومت فشاری بیشتری نسبت به طرح‌های دوگانه داشتند، هر چند در بیشتر موارد طرح کنترل بیشترین مقاومت فشاری را کسب کرد. همچنین ضریب جمع‌شدگی طرح‌های پوزولانی نسبت به طرح کنترل کمتر بود، و طرح‌های حاوی سیمان آمیخته سه‌گانه کمترین جمع‌شدگی را در کوتاه مدت و طرح‌های حاوی سیمان آمیخته دوگانه کمترین جمع‌شدگی را در بلندمدت داشتند [17]. در تحقیق دیگر روی میکروسیلیس، پودرسنگ آهک و ژئولیت، سیمان آمیخته چهارگانه به سبب ایجاد تراکم بهتر از سیمان آمیخته سه‌گانه دوام بهتری در بتن خودتراکم داشت. برای نمونه کمترین جذب آب مربوط به سیمان آمیخته چهارگانه بود [18].

در مجموع می‌توان نتیجه‌گرفت که سیمان آمیخته سه‌گانه و چهارگانه پوزولانی، جدای از آثار مثبت مهم زیست محیطی، شاخص‌های دوامی بتن خودتراکم را حفظ و در موارد بسیاری بهبود دادند، که موید رویکرد استفاده بیشتر از پوزولان‌ها می‌باشد. اما

مصرفی $490 \text{ m}^2/\text{kg}$ به دست آمد و چگونگی توزیع دانه‌بندی تراس و پومیس در شکل (۳) ارائه شده است.

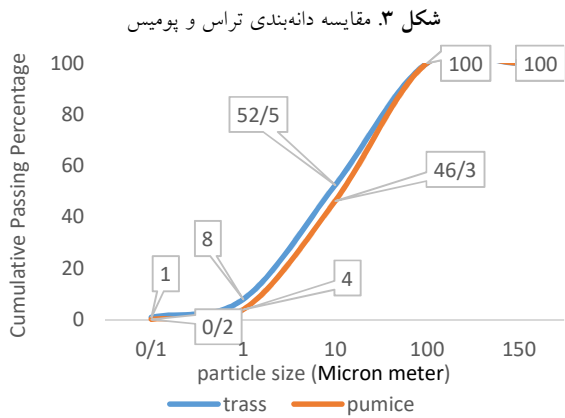


Fig. 3. particle size comparison of trass and pumice pozzolan

شکل ۲. مقایسه دانه‌بندی سنگدانه نخودی با محدوده مجاز استاندارد

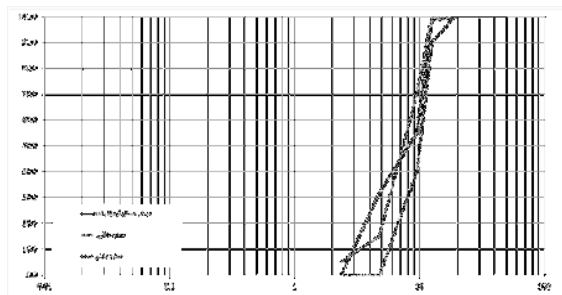


Fig.2. particle size of gravel according to standard limit
 آنالیزهای XRF به منظور شناسایی بهتر مصالح مورد استفاده انجام شد و درصد اکسیدهای مصالح مورد استفاده در جدول (۱) ارائه شده است. همچنین، به منظور قیاس عملکرد پوزولان‌ها، آزمون بلین و اندازه ذرات روی آن‌ها انجام شد و بلین میکروسلیس ازنا مصرفی $20000 \text{ m}^2/\text{kg}$ ، تراس $650 \text{ m}^2/\text{kg}$ و پومیس تفتان

جدول ۱. ساختار شیمیایی مواد سیمانی به کار رفته در طرح‌ها

Cementitious Materials	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃	Specific gravity (kg/m ³)	Blaine m ² /kg
Trass	74.85	11.71	2.04	3.82	1.4	0.22	2.11	2.94	88.6	2500	650
Pumice	59.44	15.9	4.74	10.64	2.19	1.26	3.35	1.8	80.08	2620	490
Silica fume	93.47	1.17	1.5	0.95	1	0.2	0.22	1.08	96.14	2350	20000
Cement	20.18	3.78	3.79	64.07	1.23	3.6	1.36	0.96	-	3150	317

Table.1.XRF results of cementitious materials

نتایج آزمایش XRD نشان داد که پومیس تفتان به کار رفته از سه

شکل ۵. فازهای اصلی پوزولان تراس

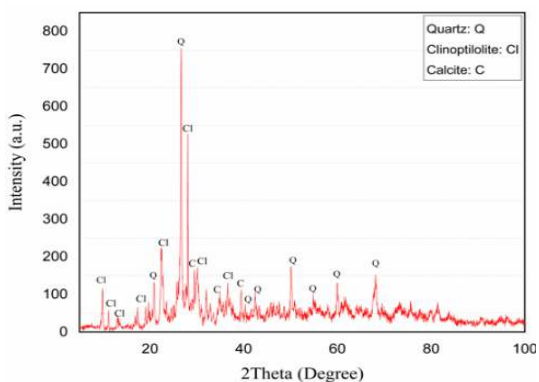


Fig. 5. Main phases of trass pozzolan

میکروسلیس طبق شکل XRD طبق شکل (۵) است. نمودار (۶) است که کاملاً آمورف و غیر قابل شناسایی فازی است.

شکل ۴. فازهای اصلی پوزولان پومیس

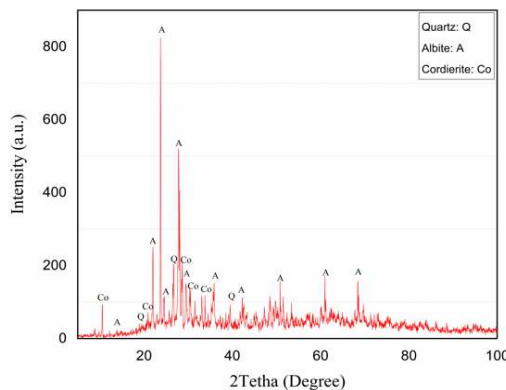


Fig. 4. Main phases of pumice pozzolan

فاز اصلی کوارتز، آلبیت، کردیریت تشکیل شده است که در شکل (۴) مشاهده می‌شود. فازهای اصلی تراس کوارتز، کلینوپتیلولیت و کلسیت می‌باشد که نتیجه تفسیر آزمایش آن

شده و به صورت خشک مخلوط شوند و سپس پودرسنگ آهک و میکروسیلیس به صورت ژل به همراه آب اختلاط اضافه شوند و آب باقی مانده به همراه فوق‌روان‌کننده اضافه شود. در جدول ۲ طرح اختلاط‌های نهایی ارائه شده است (مقدار سنگدانه تقریبی است). در نام‌گذاری طرح‌ها، حرف یا دو حرف اول هر یک از پوزولان‌ها در کنار درصد استفاده شده از آن قرار گرفته است.

۲-۲ شرایط عمل‌آوری

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

شکل ۶. فازهای اصلی پوزولان میکروسیلیس

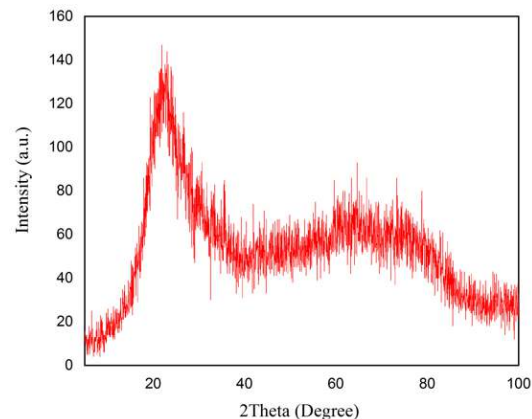


Fig. 6. XRD of silica fume

ساخت طرح‌ها

ترتیب مناسب‌تر اختلاط با سعی و خطا به این شکل تشخیص داده شد که ابتدا شن و ماسه و سپس سیمان و پوزولان‌ها اضافه

جدول ۲. طرح اختلاط‌های بتن خودتراکم حاوی سیمان آمیخته

Mix description	Cement (kg/m ³)	Silica Fume (kg/m ³)	Trass (kg/m ³)	Pumice (kg/m ³)	Aggregate (kg/m ³)	Coarse sand (kg/m ³)	Fine Sand (kg/m ³)	Lime stone (kg/m ³)	Water (kg/m ³)	Super plasticizer %	W/Cm
SF ¹ 10	350	35	0	0	700	800	200	140	150.15	2.5	0/39
SF10T ² 10	315	35	35	0	691.4	800	200	140	150.15	2.5	0/39
SF10T20	280	35	70	0	682.8	800	200	140	150.15	2.7	0/39
SF10P ³ 10	315	35	0	35	693	800	200	140	150.15	2.5	0/39
SF10P20	280	35	0	70	686	800	200	140	150.15	2.5	0/39
SF10T10P10	280	35	35	35	684.4	800	200	140	150.15	3.1	0/39
SF10T20P10	245	35	70	35	675.7	800	200	140	150.15	3.3	0/39
SF10T10P20	245	35	35	70	677.4	800	200	140	150.15	3.1	0/39
SF10T20P20	210	35	70	70	668.3	800	200	140	150.15	3.2	0/39

Table 2. SCC mixtures containing blended cement

هر طرح صورت گرفت. این آزمایش از طریق توزین نمونه‌ها بعد از قرار گرفتن در گرمخانه و نیز بعد از فرارگیری در آب به مدت نیم ساعت محاسبه شده است. آزمایش مقاومت فشاری بر اساس استاندارد BS 1881-116 [23] روی سه نمونه در هر طرح انجام شد. آزمایش پالس فراصوت بر اساس ASTM C597 [24] روی دو نمونه در هر طرح انجام گرفت. آزمایش عمق نفوذ آب بر اساس استاندارد EN 12390-08 [25] روی دو نمونه مکعبی ۱۵۰ میلی‌متری در هر طرح انجام گرفت. این نمونه‌ها در دستگاه به مدت سه روز در فشار ۵ بار قرار گرفتند و نتایج طبق استاندارد گزارش شد. در آزمایش تعیین مقاومت الکتریکی از ۲ نمونه عمل‌آوری شده اشباع با سطح خشک، بر

۳ - آزمایش‌های بتن

آزمایش جریان اسلامپ به منظور سنجش میزان روانی بتن طبق آزمایش ASTM C1611 [19] انجام شده است. آزمایش حلقه J تحت استاندارد ASTM C1621 [20] و برای تعیین میزان قابلیت عبور بتن صورت پذیرفت. آزمایش فعالیت پوزولانی بر اساس ASTM C311 [21] روی ۶ نمونه در هر طرح انجام گرفت. این آزمایش از طریق سنجش میزان مقاومت فشاری کسب شده توسط ملات حاوی پوزولان در سنین ۷ و ۲۸ روز در مقایسه با ملات بدون پوزولان حاصل شد. آزمایش جذب آب حجمی بتن تحت استاندارد BS 1881-122 [22] روی سه نمونه استوانه‌ای با قطر ۷۵ و ارتفاع ۱۵۰ میلی‌متر در

تراس دو برابر پومیس به کار رفته SF10T20P10 جریان اسلامپ بهتری، ۶۹۰ و ۶۸۰ میلی متر نسبت به ۶۵۰ میلی متر (به مقدار ۶٪ و ۴٪)، افزایش دارد که به نظر می‌رسد به خاطر تاثیر مطلوب‌تر پومیس نسبت به تراس بر کارایی بتن باشد. نتایج نشان دادند که در مجموع سیمان آمیخته چهارگانه برای عملکرد مناسب میزان استفاده از فوق‌روان‌کننده را نسبت به سیمان آمیخته سه‌گانه و دوگانه، مقداری، در بیشترین حالت ۲۸/۵٪، افزایش دادند.

جدول ۳. نتایج آزمایش‌های کارایی

Mix description	Slump flow (mm)	J ring (mm)
SF10	690	4
SF10 T10	655	5
SF10T20	680	6
SF10P10	685	4
SF10P20	689	2
SF10T10P10	680	4
SF10T20P10	650	7
SF10T10P20	710	5
SF10T20P20	690	5

Table 3. rheological tests results

۴-۲. آزمایش فعالیت پوزولانی

فعالیت پوزولانی تراس، پومیس و میکروسیلیس در شکل (۷) با ملات سیمانی قیاس شده‌اند. بنابر نتایج مندرج، چه در سن ۷ روزه و چه در ۲۸ روز، فعالیت پوزولانی تراس و پومیس نسبت به هیدراسیون سیمان کندتر بود. اما میکروسیلیس سرعت فعالیت پوزولانی بیشتری نسبت به هیدراسیون سیمان داشت. فعالیت پوزولانی پومیس بین سن ۷ روز تا ۲۸ روز ۲٪ رشد داشت، اما تراس در این زمان ۷٪ رشد فعالیت پوزولانی داشت. در مجموع تراس با ۷۸٪ و ۸۵٪، کمترین و میکروسیلیس با ۱۲۶٪ و ۱۰۷٪، بیشترین سرعت فعالیت پوزولانی ۷ و ۲۸ روزه را داشتند. پومیس در هر دو سن رشدی بالاتر از تراس داشت، ۸۹٪ نسبت به ۷۸٪ در ۷ روز و ۹۱٪ نسبت به ۸۵٪ در ۲۸ روز، که این موضوع در کنار ریزدانی بالاتر تراس، برتری پومیس در نرخ هیدراسیون ۷ و ۲۸ روزه نسبت به تراس را نشان داد.

اساس استاندارد AASHTO TP 95-11 [26] در هر طرح استفاده شد. آزمایش نفوذ یون کلراید تسریع شده (RCPT)، بر اساس استاندارد ASTM C1202 [27] انجام شده است.

۳. تحلیل نتایج آزمایش‌ها

۴-۱. آزمایش‌های بتن تازه

نتایج آزمایش‌های بتن تازه طرح‌های مختلف در جدول (۳) ارائه شده است. نتایج همه طرح‌ها در محدوده جریان اسلامپ بین ۶۵۰ تا ۸۰۰ میلی متر و حلقه J بین ۰ تا ۱۰ میلی متر که توسط استاندارد افنارک یا ACI 237 برای تولید بتن خودتراکم تعیین شده قرار داشتند [5, 28]. تراس همانطور که در طرح‌های سه‌گانه SF10T10 و SF10T20 مشاهده می‌شود، و نیز با مقایسه میزان فوق‌روان‌کننده مصرفی دو طرح (۱۰ و ۱۰/۵ کیلوگرم)، میزان جریان اسلامپ را به ۶۵۵ و ۶۸۰ میلی متر کاهش داد و در اثر افزایش لزجت، حلقه J را به ۵ و ۶ میلی متر رساند. همینطور بیشترین مقدار فوق‌روان‌کننده مصرفی بین طرح‌های سه‌گانه و چهارگانه در طرح‌های SF10T20 و SF10T20P10 حاوی ۲۰٪ تراس، با مقدار فوق‌روان‌کننده مصرفی ۱۰/۵ کیلوگرم (۲/۷٪) و ۱۲/۸۵ کیلوگرم (۳/۳٪) مشاهده شد. جریان اسلامپ این دو طرح ۶۸۰ و ۶۵۰ میلی متر بود و بالاترین میزان حلقه J برابر ۶ و ۷ میلی متر، در آن‌ها مشاهده شد. این مسئله می‌تواند به دلیل ریزدانی بالای تراس مورد استفاده بوده که در نمودار دانه‌بندی پوزولان‌ها مورد اشاره قرار گرفت و این موضوع، جذب آب را افزایش و جریان اسلامپ را کاهش داده است. همچنین مشاهده شد که سیمان آمیخته سه‌گانه حاوی میکروسیلیس و پومیس اثر منفی کمی بر جریان اسلامپ و حلقه J داشته است و حتی در جایگزینی ۲۰٪ از آن با سیمان، تاثیر مثبتی بر کارایی گذاشته است. تاثیر اندک منفی پومیس بر کارایی مورد تایید تحقیقات پیشین است [12, 9]. برای نمونه در SF10P10 و SF10P20 با افزایش ۱۰٪ پومیس، بدون افزایش در فوق‌روان‌کننده، جریان اسلامپ ۴ میلی متر (۰/۶٪) افزایش یافت و حلقه J نیز ۲ میلی متر کاهش یافت. همچنین از نتایج، این برداشت حاصل می‌شود که طرح SF10T10P10 و SF10T20P20 که نیمی از پوزولان اضافه شده به آن‌ها تراس و نیمی پومیس است نسبت به طرحی که

مسئله امکان دارد در سنین بالاتر تا حدودی جبران شود، ضمن اینکه بعضی سیمان آمیخته چهارگانه در سن ۲۸ روز هم نسبت به بعضی سیمان آمیخته سه گانه برتر بودند.

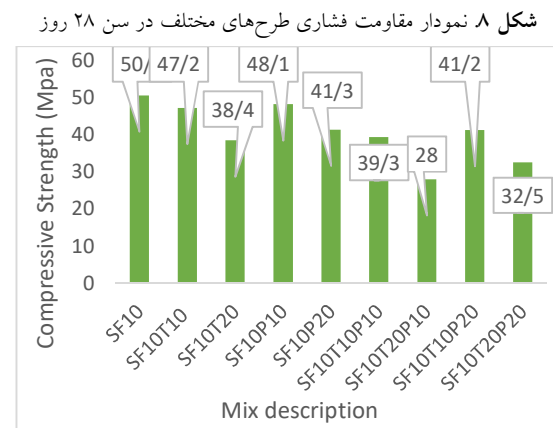


Fig. 8. 28-day Compressive strength

۴-۴. آزمایش فراصوت

همان گونه که نتایج در نمودار شکل (۹) نشان داده شده است، می‌توان نتیجه گرفت که همه طرح‌ها سرعت پالس بسیار خوبی، بالاتر از ۴۰۰۰ متر بر ثانیه، داشتند. این موضوع نشان از تراکم بالا و در نتیجه کاهش فضاهاى مویینه خالی می‌باشد. اما در مقایسه بین طرح‌های مختلف، SF10 با ۴۷۱۶ متر بر ثانیه بیشترین سرعت پالس را داشت و SF10T20P10 با ۴۲۷۳ متر بر ثانیه کمترین سرعت پالس را نشان داد. اختلاف این دو ۹٪ بود. این نتایج با نتایج مقاومت فشاری و آزمایش فعالیت پوزولانی هماهنگی داشت. همچنین طرح‌های ترکیبی سه‌گانه و چهارگانه پوزولانی روندی کاهشی البته با برتری نسبی و جزئی طرح‌های حاوی ترکیب‌های سه‌گانه نسبت به طرح‌های حاوی سیمان آمیخته چهارگانه ثبت کردند. در مقایسه ترکیب‌های سه‌گانه، تغییر محسوسی مشاهده نشد (اختلاف کمتر از ۲٪) و تراس و پومیس در درصدهای جایگزینی مختلف، دارای نتایج تقریباً مشابهی بودند. اما در ترکیب‌های چهارگانه، مشابه آنچه که از آزمایش مقاومت فشاری به دست آمد، SF10T20P10 و SF10T10P20 تفاوت قابل توجهی، حدود ۶٪، داشتند. SF10T10P20 مقداری نزدیک به SF10T10 بین ترکیب‌های سه‌گانه، به ترتیب ۴۵۴۵ نسبت به ۴۵۷۳ متر بر ثانیه، داشت. در مقایسه طرح‌ها، سرعت فراصوت طرح‌های

شکل ۷. نمودار درصد واکنش پوزولانی

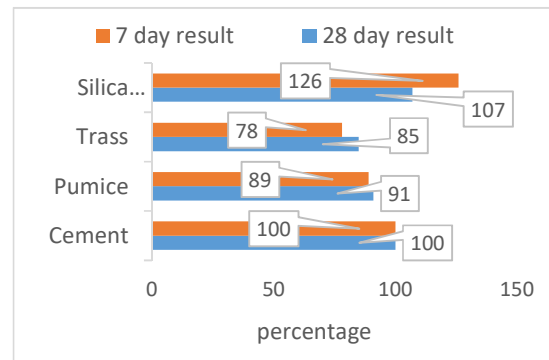


Fig. 7. Pozzolanic reactions comparison

۳-۴. آزمایش مقاومت فشاری

نتایج آزمایش مقاومت فشاری ۲۸ روزه طبق شکل (۸) است. نتایج نشان می‌دهد SF10 با سیمان آمیخته دوگانه پوزولانی، با ۵۰/۵ مگاپاسکال بیشترین مقاومت فشاری و SF10T20P10 با ترکیب چهارگانه، با ۲۸ مگاپاسکال کمترین مقاومت را به ثبت رساند. در بین طرح‌ها کمترین مقاومت فشاری مربوط به طرح‌های حاوی ۲۰٪ تراس یعنی SF10T20 و SF10T20P10 بود. به نظر می‌رسد این مسئله به سبب کندی فعالیت پوزولانی تراس بوده که با نتایج آزمایش واکنش پوزولانی هماهنگی دارد. بیشترین مقاومت فشاری بین طرح‌های سه‌گانه مربوط به طرح‌های SF10T10 و SF10P10 با حدود ۷٪ کاهش در مقاومت فشاری بود. در بین سیمان آمیخته چهارگانه، بیشترین مقاومت فشاری مربوط به SF10T10P10 و SF10T20P10 با حدود ۲۰٪ کاهش در مقاومت نسبت به طرح شاهد بود. طرح SF10T10P10 مقاومت بیشتری نسبت به SF10T20، ۴۱/۲ نسبت به ۳۸/۴ مگاپاسکال، با دو پوزولان داشت. 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 واکنش پوزولانی تراس در جایگزینی با درصدهای بالاتر ترکیبی چهارگانه تشدید شده است و منتج به کمترین مقاومت فشاری بین طرح‌ها، ۴۱/۳ نسبت به ۲۸ مگاپاسکال، شده است. در دید کلی سیمان‌های آمیخته چهارگانه در مجموع عملکرد ضعیف‌تر اما قابل قبولی نسبت به سیمان آمیخته سه‌گانه داشتند. این ضعف مقاومتی را می‌توان به فعالیت کندتر پوزولان‌ها متمایل کرد. این

از طریق ایجاد ژل سیلیکاتی یا عملکرد فیلری باشد [30-32]. در بین ترکیب‌های سه‌گانه پوزولانی، تفاوت تاثیر استفاده از تراس در درصدهای ۱۰ و ۲۰ برابر ۰/۰۵٪ بود. اما در مورد سیمان آمیخته مشابه، با پومیس ۱۰٪ سه‌گانه، نتایج اختلاف ۰/۳۳٪ نسبت به ۲۰٪ استفاده از آن داشته‌اند. با مقایسه سیمان آمیخته چهارگانه SF10T10P10 تا SF10T20P20 این نتیجه حاصل شد که ۲۰٪ پومیس با اختلاف ۰/۱۴٪ تاثیر چندانی نداشته است. تغییر جذب آب ناشی از درصدهای جایگزینی تراس نیز در سیمان آمیخته چهارگانه به صورت بسیار جزئی، ۰/۱٪ بود. با توجه به نتایج این آزمایش، SF10T20P20 بهترین طرح پیشنهادی به سبب ۵۰٪ پوزولان مصرفی و نیز بهترین عملکرد از منظر جذب آب حجمی شناخته شد. در مجموع نتایج سیمان آمیخته دوگانه، سه‌گانه و چهارگانه به طور کلی مشابه بوده و همه آن‌ها جذب آب حجمی بسیار مطلوبی را نشان دادند.

شکل ۱۰. میزان جذب آب حجمی بتن

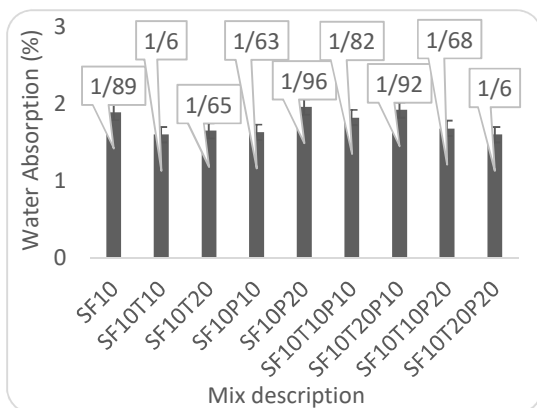


Fig. 10. Water absorption of mixtures

۴-۶. آزمایش عمق نفوذ آب

نتایج عمق نفوذ آب در شکل (۱۱) نمایش داده شده است. این نتایج نشان داد که همه سیمان‌های آمیخته عمق نفوذ مطلوبی در محدوده کمتر از ۲۰ میلی‌متر داشتند که گواه رفتار دوامی مطلوب آن‌ها از منظر نفوذناپذیری بود. کمترین عمق نفوذ مربوط به SF10P20 و SF10P10 به عنوان سیمان آمیخته سه‌گانه حاوی پومیس با عمق نفوذ به ترتیب ۷ و ۵ میلی‌متر بوده و بیشترین عمق نفوذ در ترکیب چهارگانه SF10T20P10 با مقدار ۱۹ میلی‌متر مشاهده شد. اختلاف جزئی ۱۴ میلی‌متری

چهارگانه نسبت به سیمان آمیخته سه‌گانه به صورت کلی کمتر بود. این موضوع احتمالاً به دلیل ژل سیلیکاتی کمتر تولید شده به سبب استفاده بیشتر از پوزولان‌های تراس و پومیس می‌باشد [30-32]. ضمن اینکه نتایج، با موارد به دست آمده از آزمایش مقاومت فشاری همخوانی و مطابقت داشت.

شکل ۹. نمودار سرعت پالس عبوری

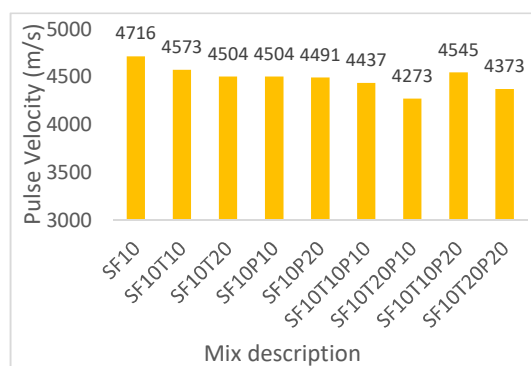


Fig. 9. pulse velocity of mixtures

۴-۵. آزمایش جذب آب حجمی بتن

نتایج این آزمایش در شکل (۱۰) قابل مشاهده و مقایسه است. با توجه به نتایج، همه ترکیب‌ها، جذب آب را کنترل کرده و جذب آب حجمی کمتر از ۲٪ داشتند. این میزان جذب آب به آن معناست که تمام طرح‌های حاضر، توانایی حفظ دوام حتی در شرایط ۴ مندرج در میحث ۹ مقررات ملی ساختمان را دارند [29]. با توجه به قرابت نتایج از یک سو و حاشیه خطای نشان داده شده در بین نمونه‌های مورد آزمایش هر ترکیب از سویی دیگر، ناچیز بودن تفاوت میان ترکیب‌ها بیش از پیش مورد توجه قرار گرفت. کمترین جذب آب حجمی مربوط به SF10T10 از بین سیمان آمیخته سه‌گانه و SF10T20P20 در بین سیمان آمیخته چهارگانه با مقدار مشترک ۱/۶٪ بودند. همچنین بیشترین جذب آب حجمی مربوط به SF10P20 در بین سیمان آمیخته سه‌گانه و SF10T20P10 در بین سیمان آمیخته چهارگانه به ترتیب با جذب آب ۱/۹۶٪ و ۱/۹۲٪ بود. اختلاف کم (۰/۳۶٪) بین بیشترین و کمترین جذب آب حجمی، می‌تواند نقش موثر میکروسیلیس در کاهش منافذ بتن را نشان دهد. استفاده از تراس در دو درصد ۱۰ و ۲۰ در کنار ۱۰ درصد میکروسیلیس و سیمان در سن ۲۸ روز منجر به کاهش جذب آب حجمی شده است. این موضوع می‌تواند به دلیل کاهش نفوذپذیری بتن

نمونه شاهد تغییر ملموسی نداشت و به صورت بسیار جزئی افزایش یافت. در بین طرح‌های مختلف طرح‌های SF10T20P10 و SF10T20P20 با مقاومت الکتریکی ۷۲ و ۷۰ کیلو اهم بر سانتی‌متر بیشترین مقاومت الکتریکی و طرح SF10 با مقاومت الکتریکی ۴۶ kΩ-cm کمترین مقاومت الکتریکی را داشتند اختلاف کمترین و بیشترین مقدار مقاومت الکتریکی به دست آمده ۲۴ kΩ-cm بود. این اختلاف نشان از تاثیر مثبت سیمان آمیخته پوزولانی بر مقاومت الکتریکی داشت. با اضافه کردن تراس در درصد‌های ۱۰ و ۲۰، نتایج در ترکیب‌های سه‌گانه با ۶۲ kΩ-cm نسبت به ۵۵ (۱۲٪) و ۷۲ kΩ-cm نسبت به ۴۹ (حدود ۴۷٪) در سیمان آمیخته چهارگانه، بهبود یافت. اما نتایج استفاده پومیس در ترکیب‌های سه‌گانه در ۱۰٪ جایگزینی با ۶۳ kΩ-cm، ۲۱ درصد بهتر از ۲۰٪ جایگزینی با ۵۲ kΩ-cm بود. ولی در سیمان آمیخته چهارگانه خلاف این روند با ۵۷ kΩ-cm نسبت به ۴۹ kΩ-cm، با اختلاف ۲۱٪، صادق بود. در مقایسه کلی می‌توان گفت که عملکرد سیمان آمیخته چهارگانه در مقاومت الکتریکی به طور کلی اندکی بهتر از سیمان آمیخته دوگانه و سه‌گانه بود.

شکل ۱۲. نمودار آزمایش مقاومت الکتریکی

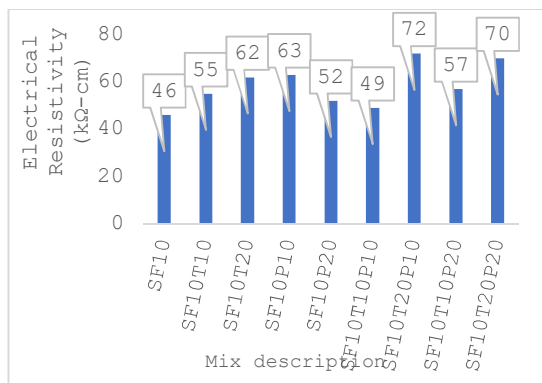


Fig.12. Water penetration of mixtures

۴-۸. آزمایش تسریع شده نفوذ یون کلراید RCPT: نتایج آزمایش نفوذ کلراید در شکل (۱۳) نمایش داده شده است. طرح شاهد SF10، با بیشترین نفوذپذیری کلرایدی، ۱۲۱۰ کولن، طبق جدول (۱) موجود در استاندارد ASTM C1202 [27]، در رده‌ی نفوذ کلراید تسریع شده کم (بین ۱۰۰۰ تا ۲۰۰۰ کولن) و بقیه طرح‌ها در رده‌ی نفوذ پذیری کلرایدی خیلی کم (بین ۱۰۰ تا ۱۰۰۰) قرار گرفتند. کمترین نفوذ کلرایدی، ۳۴۷

بیشترین و کمترین مقدار عمق نفوذ، نشان از عملکرد مناسب تمامی سیمان آمیخته داشت. به نظر می‌آید رفتار مطلوب پومیس در کاهش عمق نفوذ نسبت به تراس به سبب سرعت بیشتر آن در تشکیل ژل سیلیکاتی بوده است [30-32]. از این منظر، نتایج این آزمایش با نتایج آزمایش واکنش پوزولانی مطابقت کامل دارد. در هر دو ترکیب سه و چهارگانه حاوی تراس، عمق نفوذ با افزایش مقدار تراس رشد داشته است. بهترین طرح در بین سیمان‌های آمیخته چهارگانه، طرح SF10T10P20 و SF10T20P20 است زیرا که علی‌رغم جایگزینی ۴۰٪ تا ۵۰٪ از سیمان با پوزولان، نتایج برابر با طرح کنترل (SF10) بود یا حتی اندکی بهبود پیدا کرده است. برای مقایسه، سیمان آمیخته سه‌گانه به طور کلی و با احتساب درصد خطای کمتر از ۳٪ و واریانس بسیار جزئی (کمتر از ۲٪ برای همه طرح‌ها) اندکی بهتر از سیمان آمیخته چهارگانه عمل کردند. همچنین، عملکرد سیمان آمیخته چهارگانه به طور کلی به خوبی نمونه کنترل SF10 بود.

شکل ۱۱. نمودار عمق نفوذ آب

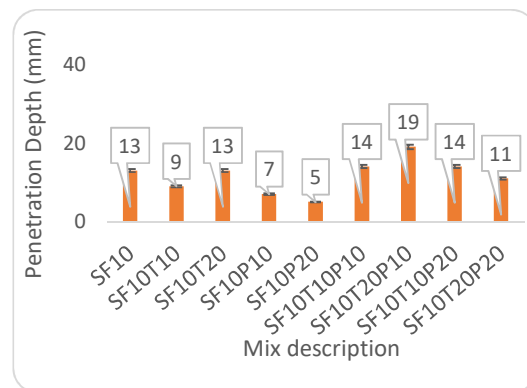


Fig. 11. water penetration of mixtures

۴-۷. آزمایش تعیین مقاومت الکتریکی

نتایج آزمایش مقاومت الکتریکی در شکل (۱۲) نمایش داده شده است. نتایج نشان دادند که همه‌ی طرح‌های حاضر مقاومت الکتریکی بالایی داشتند و طبق جدول (۱) استاندارد AASHTO TP 95-11 [26]، همگی در رده‌ی نفوذ الکتریکی بسیار کم بین ۳۷ تا ۲۵۴ kΩ-cm قرار گرفتند. همچنین با افزایش کمیت یا تعداد پوزولان مصرفی بین طرح‌های حاوی سیمان آمیخته دوگانه، سه‌گانه و چهارگانه، میزان مقاومت الکتریکی نسبت به

در سیمان آمیخته چهارگانه این برتری، با اختلاف ۳ کولن، محسوس نبود. بهترین عملکرد مربوط به طرح‌های حاوی سیمان آمیخته چهارگانه SF10T20P10، SF10T10P20 و SF10T20P20 با ۳۸۷، ۳۹۹ و ۳۴۷ کولن در عین جایگزینی ۴۰٪ تا ۵۰٪ پوزولان با سیمان بود. در جمع‌بندی کلی می‌توان گفت، این آزمایش نشان‌دهنده برتری قابل توجه طرح‌های حاوی سیمان آمیخته چهارگانه پوزولانی نسبت به سیمان آمیخته سه‌گانه (به طور متوسط ۶۴٪) و دوگانه (به طور متوسط ۱۸۶٪) بود.

کولن، مربوط به طرح چهارگانه حاوی بیشترین پوزولان، SF10T20P20 بود. این نتایج نشان داد که با افزایش مقدار پوزولان پومیس یا تراس مصرفی در سیمان آمیخته سه و چهارگانه میزان نفوذ کلراید به صورت محسوسی کاهش پیدا کرد. این کاهش در بین سیمان آمیخته چهارگانه نسبت به سیمان آمیخته دوگانه و سه‌گانه، در بیشترین حالت با اختلاف ۸۶۳ کولن قابل توجه بود. تراس در کاهش میزان نفوذ کلراید بهتر از پومیس عمل کرد. در درصدها و سیمان آمیخته متناظر سه‌گانه این برتری، ۶۲ (۷/۵٪) و ۲۳ (۴/۴٪) کولن مشاهده شد. اما

شکل ۱۳. مقایسه عملکرد سیمان آمیخته در مقدار نفوذ کلراید

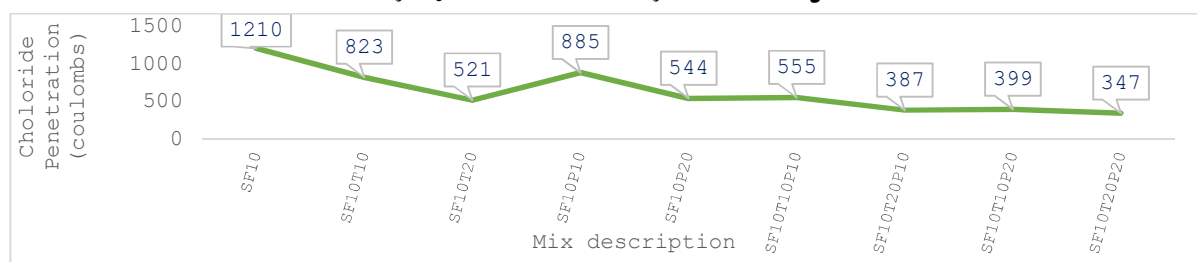


Fig.13. Chloride resistivity comparison of different blends

۵. نتایج

در عین اینکه سیمان‌های آمیخته چهارگانه عملکردی تقریباً برابر با سیمان آمیخته دوگانه داشتند.

- همه سیمان‌های آمیخته پوزولانی مورد آزمایش، مقاومت الکتریکی را تقریباً ثابت (در محدوده‌ی ۴۶ تا ۷۲ kΩ-cm) نگه داشتند، اما همه نفوذ کلراید را به شکل قابل توجهی (از ۱۲۱۰ به ۳۴۷ کولن) کاهش دادند. در این بین تراس عملکرد بهتری در کاهش نفوذ کلراید نسبت به پومیس داشت. عملکرد سیمان آمیخته چهارگانه به طور متوسط ۷٪ و ۳۴٪ در مقاومت الکتریکی و به ترتیب ۴۰٪ و ۶۶٪ در نفوذ کلراید، بهتر از سیمان آمیخته سه‌گانه و دوگانه بود.

در جمع‌بندی نهایی می‌توان گفت، سیمان آمیخته سه‌گانه و چهارگانه با استفاده از سه پوزولان میکروسیلیس، تراس و پومیس، نه تنها باعث کاهش مصرف سیمان از ۲۰٪ تا ۵۰٪ و در نتیجه کمک به محیط‌زیست می‌شوند، بلکه می‌توانند دوام

از طریق هماهنگی نتایج آزمایش‌های مورد بررسی در این آزمایش به این نتایج می‌توان اشاره کرد:

- سیمان آمیخته چهارگانه در مجموع موجب کاهش بیشتر مقاومت فشاری به طور متوسط ۳۱٪ در برابر ۱۴٪ و نیز سرعت فراصوت به طور متوسط ۷٪ در برابر ۵٪ نسبت به سیمان آمیخته سه‌گانه و دوگانه شدند. محدوده مقاومت فشاری همه طرح‌ها بین ۲۸ تا ۵۰ مگاپاسکال بود.
- در جذب آب حجمی به طور کلی سیمان آمیخته چندگانه نتایجی مشابه با یکدیگر داشتند (بین ۱/۶ تا ۱/۹۶٪) و جذب آب حجمی همگی طرح‌ها زیر ۲٪ بود. دلیل این مشابهت می‌تواند به دلیل نقش مهم میکروسیلیس و دیگر ریزدانه‌ها بوده باشد.
- پومیس تاثیر مثبت بیشتری نسبت به تراس در میزان عمق نفوذ طرح‌های مختلف داشت. عمق نفوذ آب همگی طرح‌ها کمتر از ۲۰ میلی‌متر بود. در مجموع سیمان آمیخته سه‌گانه اندکی عملکرد بهتری در کاهش عمق نفوذ داشتند،

بتن را حفظ و بهبود بخشند، در عین اینکه مقاومت فشاری مناسبی را نیز تامین نمایند.

مراجع

- Workability retention and compressive strength of self-compacting concrete incorporating pumice powder and silica fume. *Constr Build Mater.* 2017;134:116–22.
- [10] 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.
- [11] Ramezani pour A, Building and housing research center of Tehran: 1998. durability of concrete and role of pozzolanic cement. (Ramezani pour A, Peydayesh M), library and center of scientific documents of Amirkabir.in persion. <http://www.lib.ir/book/60176510/>
- [12] 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;7[6]:340–56. Available from: <https://doi.org/10.1080/21650373.2018.1511486>
- [13] Ramezani pour A, Samadian M, Mahdikhani M. Engineering properties and durability of selfconsolidating concretes [SCC] containing volcanic pumice ASH. *ASIAN J Civ Eng [BUILDING Hous.* 2012 13[4]. Available from: <https://www.sid.ir/en/journal/ViewPaper.aspx?id=247041>
- [14] Madani H, Norouzifar MN, Rostami J. The synergistic effect of pumice and silica fume on the durability and mechanical characteristics of eco-friendly concrete. *Constr Build Mater.* 2018 :174:356–68. Available from: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061818308687?casa_token=O29RHJeBWkMAAAAA:5blO5I_7CqfjYOV TZW_eJFVQIQ_wUoGIXTvdsAea1J1rZEC7wFvte6GiRodpgzPtcQB_LCo
- [15] Nehdi M, Pardhan M, Koshowski S. Durability of self-consolidating concrete incorporating high-volume replacement composite cements. *Cem Concr Res.* 2004 Nov 1;34(11):2103–12.
- [16] Fonseca T V., dos Anjos MAS, Ferreira RLS, Branco FG, Pereira L. Evaluation of self-compacting concretes produced with ternary and quaternary blends of different SCM and hydrated-lime. *Constr Build Mater.* 2022 Feb 21;320:126235.
- [17] Guo Z, Jiang T, Zhang J, Kong X, Chen C, Ali M, Saidur R, Energy MH-R and S, 2011 undefined. A review on emission analysis in cement industries. Elsevier. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032111000566>
- [2] Standard specification for coal fly ash and raw or... - Google Scholar Available from: https://scholar.google.com/scholar?hl=en&as_sdt=0%2C5&q=Standard+specification+for+coal+fly+ash+and+raw+or+calcined+natural+pozzolana+for+use+in+concrete&btnG=
- [3] Ma A, Abba SI, Nuruddeen MM. Self-Compacting Concrete – A Review. 2017.
- [4] 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=f14FKxWkKQCv4qx3zgd93VCUKs>
- [5] 237 ACIC. 237R-07: Self-Consolidating Concrete. Tech Doc.
- [6] Ramezani pour A, Zolfagharnasab A, Bahmanzadeh F, Pourebrahimi M. Assesment of trass pozzolan performance in mechanical and durability behaviour of SCC. Tabriz, Tenth international congress of civil engineering. Faculty of civil engineering. 2015. P8 in persion.
- [7] 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=KTQBPRkrmgAAAAA:14_HGj9krQUewoK6lo wrL-QPfDPCA9Sevil0bimTnrS6gxxF4V3FC0Fn oDlt0ZhjE6dMbe75_cl
- [8] Tarighat A, Kooshky jahromi A, Amirkabir, 2021, Effect of natural taftan pumice powder on mechanical and durability characteristics. iranjournals.nlai.ir in persion. <https://iranjournals.nlai.ir/handle/123456789/803238>
- [9] Bani Ardalan R, Joshaghani A, Hooton RD.

- Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration. Am Soc Test Mater. 2012;[C]:1-8.
- [28] EFNARC. The European Guidelines for Self-Compacting Concrete. Eur Guidel Self Compact Concr. 2005; Available from: <http://www.efnarc.org/pdf/SCCGuidelinesMay2005.pdf>.
- [29] Chapter 9 National Building Regulations, fifth generation, year 2019, 650 pages, in persion.
- [30] Ebrahimi K, Daiezadeh MJ, Zakertabrizi M, Zahmatkesh F, Habibnejad Korayem A. A review of the impact of micro- and nanoparticles on freeze-thaw durability of hardened concrete: Mechanism perspective. Constr Build Mater. 2018;186:1105-13. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.08.029>
- [31] Hay R, Li J, Celik K. Influencing factors on micromechanical properties of calcium (aluminosilicate) hydrate C-(A-)S-H under nanoindentation experiment. Cem Concr Res [Internet]. 2020;134(April):106088. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106088>
- [32] Kupwade-Patil K, Al-Aibani AF, Abdulsalam MF, Mao C, Bumajdad A, Palkovic SD, et al. Microstructure of cement paste with natural pozzolanic volcanic ash and Portland cement at different stages of curing. Constr Build Mater [Internet]. 2016;113:423-41. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.084>
- Lehman DE. Mechanical and durability properties of sustainable self-compacting concrete with recycled concrete aggregate and fly ash, slag and silica fume. Constr Build Mater. 2020 Jan 20;231:117115.
- [18] Alaghebandian N, Mirvalad S, Javid AAS. Durability of self-consolidating concrete and mortar mixtures containing ternary and quaternary cement blends exposed to simulated marine environment. Constr Build Mater. 2020 Oct 30;259:119767
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] BS:1881-1983: Part 122. Testing concrete-Method for determination of water absorption. Br Stand. 2009;3[2014]:420-57.
- [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] C597 - 02 Standard Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete.
- [25] Standard B. En 12390-8 Depth of penetration of water under pressure. 2009;8:10.
- [26] AASHTO TP 95-11. Standard Test Method for Surface Resistivity Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration. Aashto. 2011. p. 1-6.
- [27] ASTM C1202. Standard Test Method for

Investigation on mechanical and durability aspects of SCC containing pozzolanic blends

Ali Maleki,¹ *Amir Mohammad Ramezani pour², Iradj Mahmoudzadeh kani³

1. PhD Candidate, school of Civil Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran
2. Associate professor, school of Civil Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran
3. Professor, school of Civil Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

Abstract

Cement production is responsible for consuming 13% of energy along with producing 7% of CO₂ worldwide. Using supplementary cementitious materials (SCMs) such as pozzolans could be helpful in this regards, while it could potentially improve the properties of concrete. The results of previous investigations have illustrated the fact that pozzolans partially replacing cement as binaries (one pozzolan along with cement), resulted in the improvement of concrete's durability parameters in many cases. On the other hand, one of the main uses of pozzolans is in self-consolidating concrete (SCC), a special concrete that has gain attention and popularity in recent years due to its specific properties. Recent studies on SCC containing ternary (two pozzolans along with cement) blends revealed impressive improvements in the mechanical and specially durability properties, outperforming both binaries and non-pozzolanic mixes. This was attributed to the fact that using pozzolans resulted in great decrease in permeability caused by their filler effect along with transformation of CH to CSH or CASH. Also their high blain causes significant improvement in the pore structure of concrete. In this context, capillary pores increase in number, each with much lower volume and diameter compared to non-pozzolanic samples. Another consequence of using these materials is less porosity of the interfacial transition zone (ITZ). Overall, the numerous beneficial effects of using pozzolans in concrete is well-established, and this could promote the use of more pozzolans in concrete .

Nevertheless, there has few investigations concerning the effects of ternary mixes on the durability of SCC, and studying the properties of quadratics mixes (three pozzolans along with cement) has been rarely done. On this basis, the purpose of this research was to study the effects of using binary, ternary and quadratic blends on durability characteristics of SCC. In this regards, two natural pozzolan, namely trass and pumice, were used as cement replacements at 0, 10 and 20% levels in mixes containing 10% silica fume. Various tests on the fresh properties of SCC including slump flow as flow ability and J ring as filling ability test were performed. As for hardened concrete, the 28 day compressive strength, velocity of ultrasonic pulses in concrete, water absorption, depth of penetration of water under pressure, Surface Resistivity toward Chloride Ion Penetration and rapid chloride penetration (RCPT) tests were considered.

The results showed that binaries, only in compressive strength and to some extent in pulse velocity performed better compared to ternaries and quadratics. Also, it was concluded that ternaries slightly outperformed quadratics in terms of compressive strength, pulse velocity, and water penetration tests, whereas quadratics generally had slight superiority over ternaries in terms of electrical resistivity and rapid chloride penetration. Overall, choosing the best performance for each test result, using ternaries and quadratics decreased compressive strength, pulse velocity, water absorption, water penetration and rapid chloride penetration by 5%, 3%, 15%, 61%, 71% respectively, while increased electrical resistivity by 55% compared to binary mixture. In addition, all mixtures had desirable, water absorption below 2% and binaries, ternaries and quadratics had similar results with no significant differences.

Keywords: SCC, binary blend, ternary blend, quadratic blend, durability