

بررسی آزمایشگاهی تأثیر جایگزینی سبک‌دانه پومیس به جای سنگ‌دانه بر عملکرد روسازی بتن متخلخل

مهسا دوست محمدی

فارغ التحصیل کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان.

سعید فرزین*

گروه مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان.

حجت کریمی

گروه مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان.

سید فرهاد موسوی

گروه مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان.

امید رضائی‌فر

گروه سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان.

چکیده

بتن متخلخل به ترکیبی از سیمان و آب و با دانه‌بندی، بدون ریزدانه یا با درصد ریزدانه کم، اطلاق می‌گردد که از نظر قدرت انتقال آب و قابلیت نفوذپذیری حائز اهمیت می‌باشد. این ماده می‌تواند به‌عنوان زهکش عمل نموده و آب باران را از خود عبور دهد و باعث تقویت آب‌های زیرزمینی شود. در مقاله حاضر، اثر جایگزینی افزودنی معدنی پومیس با سنگ‌دانه بتن متخلخل با مقادیر حجمی ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد، بر خصوصیات مقاومت فشاری، ضریب نفوذپذیری و درصد تخلخل بررسی گردید. تحلیل نتایج آزمایشگاهی با استفاده از نرم‌افزار SAS 9.4 در سطح اطمینان ۹۵٪ برای تمامی نمونه‌ها انجام شد. نتایج نشان می‌دهد که با جایگزینی افزودنی پومیس در ساختار بتن متخلخل و حذف متناظر سنگ‌دانه، مقاومت فشاری نمونه‌ها، به دلیل خلل و فرج موجود در ساختمان پومیس، کاهش و ضریب نفوذپذیری و درصد تخلخل افزایش می‌یابد. کاهش مقاومت فشاری با افزایش درصد پومیس برای تمامی نمونه‌ها نسبت به نمونه شاهد به ترتیب برابر ۶۰/۴۹، ۸۳/۸۶، ۸۵/۹۶ و ۸۶/۹۹ درصد می‌باشد. افزایش ضریب نفوذپذیری با افزایش درصد پومیس برای تمامی نمونه‌ها نسبت به نمونه شاهد به ترتیب ۱۰/۱۳، ۱۴/۹۶، ۱۸/۷ و ۲۴/۹۴ درصد می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: بتن متخلخل، پومیس، مقاومت فشاری، ضریب نفوذپذیری، درصد تخلخل، رواناب شهری.

* نویسنده مسئول: saeed.farzin@semnan.ac.ir

۱- مقدمه

امروزه، مباحث مربوط به پیشگیری از حوادث طبیعی بسیار مورد توجه است. یکی از انواع کارهایی که می‌توان برای جلوگیری از وقوع سیل و یا کاهش رواناب شهری انجام داد، استفاده از نوعی روسازی است که به دلیل تخلخل زیاد (درصد فضای خالی حدود ۱۸ تا ۲۲ درصد آسفالت رویه) به روسازی متخلخل و مخلوط آسفالتی آن به آسفالت متخلخل معروف شده است. کشورهای اروپایی، از جمله هلند، اسپانیا و بلژیک سهم بسزایی در گسترش روسازی متخلخل داشته‌اند [۱].

بتن متخلخل شامل سیمان، آب و سنگ‌دانه است که ریزدانه در این نوع بتن حذف می‌شود و یا درصد آن کاهش می‌یابد [۲]. بتن متخلخل معمولاً برای پیاده‌روها، جاده‌های با ترافیک کم و پارکینگ‌ها استفاده می‌شود. یکی از مهم‌ترین مزایای بتن متخلخل توانایی عبور آب است که موجب انتقال حجم زیادی از رواناب به داخل زمین و تقویت سفره‌های آب زیرزمینی می‌شود و مشکلات ناشی از جاری شدن رواناب را کاهش می‌دهد. از دیگر مزایای این بتن، بهبود ایمنی جاده‌ها، افزایش مقاومت در برابر لغزش، کاهش سروصدای وسایل نقلیه و تصفیه آب از طرق زدودن آلاینده‌ها را می‌توان نام برد [۳ و ۴]. همچنین، از مزایای اقتصادی آن می‌توان به کم شدن هزینه‌های فراوان به‌منظور هدایت آب باران اشاره داشت. در واقع، می‌توان گفت که با وجود بتن متخلخل (اسفنجی) نیازی به ساختن جوی‌های آب فراوان در سطح شهرها و کنار خیابان‌ها و کوچه‌ها و همچنین کانال‌های بزرگ آب نیست [۵]. شکل ۱ تصویری از کاربرد بتن متخلخل را نشان می‌دهد.



شکل ۱- کاربرد بتن متخلخل در پیاده رو

و سنگ‌دانه، سطح چسبندگی پایین به دلیل نبود ریزدانه یا ریزدانه کم و وجود حفرات زیاد [۴].

هوانگ و همکاران (۲۰۱۰)، در پژوهشی، از پلیمر لاتکس و ماسه برای بهبود خصوصیات مقاومتی بتن متخلخل استفاده کردند و روی حالت بهینه بین مقاومت فشاری و ضریب نفوذپذیری متمرکز شدند. نتایج نشان داد که ساخت بتن متخلخل با مقاومت بالا و نفوذپذیری مورد قبول امکان‌پذیر است [۲]. آلیت و همکاران (۲۰۱۱)، در تحقیقی، به بررسی ۵ نوع رویه بتنی متخلخل متفاوت در ۴۵ پارکینگ برای مدیریت رواناب شهری در شمال اسپانیا پرداختند. هدف این تحقیق دست یافتن به روسازی بتنی متخلخل مناسب برای ذخیره آب بود و در نهایت روسازی بتنی متخلخل بهینه برای آبیاری حداقل یک ماه فضای سبز معرفی گردید [۶]. کوسیچ و همکاران (۲۰۱۵)، تأثیر دانه‌بندی سنگ‌دانه را روی ۵ نوع مختلف نمونه بتن متخلخل بررسی کرده‌اند. نتایج نشان داد که با افزایش ریزدانه، مقاومت نمونه بتنی بیشتر می‌شود. به طوری که مقاومت فشاری برای طرح‌های اختلاط مختلف به ترتیب افزایش درصد ریزدانه برابر ۶۹/۵، ۲۶/۶، ۲۶/۵، ۲۱/۹ و ۲۰/۹ مگاپاسکال می‌باشد. همچنین مقاومت خمشی به ترتیب افزایش درصد ریزدانه برابر ۹/۷، ۴/۹، ۴، ۴ و ۲/۸ مگاپاسکال است [۷]. شیرگیر و همکاران (۱۳۹۰)، تأثیر نوع دانه‌بندی بر خواص فیزیکی و نفوذپذیری بتن متخلخل را بررسی کردند. نتایج حاصل، از پراکندگی قابل توجه در مقادیر مقاومتی بتن متخلخل با دانه‌بندی مختلف حکایت داشت. برای مثال، اختلاف بین کمینه و بیشینه مقاومت فشاری و مقاومت خمشی به ترتیب حدود ۳۳ و ۲۰ درصد بود [۸].

خدادوست گمچی و پاشایی گلمرز (۱۳۹۴)، در تحقیقی، نشان دادند که بتن متخلخل ساخته‌شده از سنگ‌دانه‌هایی با اندازه یکسان دارای نفوذپذیری بالایی می‌باشد ولی مقاومت آن کافی نیست. اضافه کردن مقدار کمی ماسه (تقریباً ۷٪ وزن کل سنگ‌دانه‌ها) به مخلوط، مقاومت بتن را افزایش داده و در عین حال نفوذپذیری آن حفظ می‌شود [۹].

پومیس، سیلیکات آلومینیومی با خاستگاه آذرین و ساختمانی حجره‌ای و متخلخل است. این سنگ اسفنجی سبک‌وزن در فوران‌های آتشفشانی انفجاری به‌وجود می‌آید و دارای شبکه‌ای از حباب‌های گازی در شیشه آتشفشانی و کانی‌ها است. به علت

مقاومت بتن متخلخل به دلیل وجود فضای خالی زیاد در ساختمان آن، از بتن معمولی کمتر است. دلایل کم بودن مقاومت بتن متخلخل عبارت‌اند از: کاهش تعداد نقاط اتصالی بین سنگ‌دانه‌ها به دلیل نبود ریزدانه، ضعف در مقاومت پیوندی بین خمیر چسباننده

حاوی زئولیت پرداختند. براساس نتایج حاصل با افزایش درصد جایگزینی زئولیت با سنگ‌دانه بتن متخلخل، درصد تخلخل و ضریب نفوذپذیری افزایش یافته است. با توجه به نتایج بیش‌ترین مقدار افزایش ضریب نفوذپذیری برابر ۲۴/۴ درصد نسبت به نمونه بدون زئولیت می‌باشد [۱۴]. الیزوندو و همکاران (۲۰۲۰) در پژوهشی، به انتخاب مواد افزودنی و الیاف برای بهبود خواص مکانیکی روسازی بتن متخلخل از طریق تحلیل تصمیم‌گیری چند معیاره پرداختند و به این نتیجه دست یافتند که ترکیبی از فوق‌روان‌کننده‌ها و مواد افزودنی حباب‌دار می‌تواند مقاومت کششی ۲/۵ مگا پاسکال را با ظرفیت نفوذ بیش از ۰/۴ سانتی‌متر بر ثانیه فراهم کند [۱۵].

مجددی و همکاران (۱۳۹۰)، به بررسی ظرفیت مقاومتی سبک‌دانه اسکریا به‌منظور استفاده در بتن سبک سازه‌ای پرداختند. در این مطالعه، ظرفیت مقاومتی یکی از سبک‌دانه‌های طبیعی معمول ایران (اسکریا)، بررسی و با نتایج تحقیقات قبلی در باره ظرفیت مقاومتی سبک‌دانه پومیس، مقایسه گردید [۱۶].

حیبی و همکاران (۱۳۹۱)، در تحقیقی، نشان دادند که با به کار بردن سبک‌دانه پوک در طرح اختلاط بتن سبک به‌عنوان سنگ‌دانه و ثابت نگه‌داشتن میزان سیمان و سایر مصالح مصرفی، ضمن کاهش وزن مخصوص بتن، در بیشتر موارد می‌توان به مقاومت فشاری مطلوبی دست یافت [۱۷]. تیموری و همکاران (۱۳۹۵) به بررسی اثر اضافه کردن افزودنی‌های متفاوت بر ویژگی بتن متخلخل قابل کاربرد در سیستم رواناب شهری پرداختند. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که اضافه شدن افزودنی‌ها، باعث کاهش مقاومت بتن متخلخل می‌شود. به‌طوری که این کاهش مقاومت برای افزودنی‌های زئولیت، پرلیت، پوک معدنی و پوک صنعتی بین بیشترین و کمترین درصد افزودنی به ترتیب برابر ۱۳، ۴۸/۴، ۱۰/۱ و ۱۲/۶ درصد می‌باشد [۱۸].

تیموری و همکاران (۱۳۹۷)، در پژوهشی، به بررسی عملکرد مقاومتی و نفوذپذیری بتن متخلخل حاوی افزودنی (لیکا و پرلیت) برای استفاده در سیستم رواناب شهری پرداختند. براساس نتایج به دست آمده در خصوص مقاومت فشاری، ضریب نفوذپذیری و درصد تخلخل، استفاده از بتن متخلخل به همراه افزودنی می‌تواند راهکاری برای استفاده مجدد از رواناب سطحی باشد [۱۹]. فرزین و همکاران (۱۳۹۸)، در پژوهشی، با جایگزینی سنگ‌دانه رسوبی

آن که در ترکیب پومیس مقدار زیادی گاز و بخار آب وجود دارد، معمولاً وزن مخصوص کمی دارد. پومیس به رنگ‌های سفید، خاکستری، صورتی، زرد کم‌رنگ یا قهوه‌ای دیده می‌شود. ویژگی‌هایی مانند وزن مخصوص ظاهری کم، ساختمان حجره‌ای، سبک وزنی، عایق صدا و گرما و قابلیت ساینده‌گی عالی سبب شده تا پومیس در کاربردهای صنعتی سودمند باشد. کاربرد عمده پومیس و خاکسترهای آتش‌فشانی در صنعت ساختمان به‌عنوان مصالح روکش سطح جاده، نمای ساختمان‌ها، تعمیر و نگهداری و ساخت جاده، شن‌ریزی راه‌آهن و اجزای سنگی بلوک ساختمانی است. پومیس در حال حاضر یکی از مواد مهمی است که جایگزین شن و ماسه در استخرهای تصفیه فاضلاب و پساب‌های سنگین شده است [۱۰].

تامای و هریادی (۲۰۱۵)، به بررسی بهبود عملکرد بتن متخلخل با استفاده از پومیس پرداختند. در این مقاله، هدف اصلی استفاده از پومیس، بهبود کارایی بتن در ساختمان می‌باشد.

از آنجایی که در معرض بارگذاری‌های شدید و ضربه‌ای، المان‌های ساختمان ممکن است دچار شکست و خرابی شوند، در این پژوهش از پومیس به منظور جذب انرژی ضربه‌ای توسط بتن استفاده شده است و به این نتیجه رسیدند که بتن متخلخل حاوی پومیس با مقاومت فشاری و کششی مناسب و جذب انرژی زیاد، قادر به جلوگیری از شکست ساختمان می‌باشد. همچنین براساس نتایج استفاده از پومیس در ترکیب بتن متخلخل باعث افزایش تخلخل و کاهش مدول الاستیسیته می‌شود. علاوه بر این، باعث مقاومت کششی بیشتر بتن متخلخل نسبت به استاندارد ACI گشته است [۱۱].

پورحکیمی (۲۰۱۵) در مقاله‌ای، ۵ طرح اختلاط مختلف با نسبت‌های مصالح متفاوت را بررسی کرد و طرح اختلاط بهینه و مناسب برای استفاده در بتن سبک با مصالح لیکا و پومیس آذربایجان ارائه نمود [۱۲].

لی و همکاران (۲۰۱۷)، عملکرد روسازی بتن متخلخل را ارزیابی کردند و اقدام به ساخت بتن متخلخل با مقاومت زیاد کردند براساس نتایج حاصل مقدار مقاومت فشاری افزایش یافته و ضریب نفوذپذیری ۱۳/۰۲ میلی‌متر بر ثانیه می‌باشد که نشان دهنده عملکرد مطلوب این نوع بتن متخلخل می‌باشد [۱۳]. دوست‌محمدی و همکاران (۲۰۱۸)، در پژوهشی، به بررسی عملکرد بتن متخلخل

به جای سنگ دانه بتن متخلخل بر خصوصیات مقاومت فشاری، ضریب نفوذپذیری و درصد تخلخل، نسبت به بتن معمولی، پرداخته شده است.

۲- مواد و روش‌ها

۱-۲- مصالح مصرفی

در این تحقیق، از سیمان پرتلند تیپ ۵ کارخانه سیمان تهران استفاده شده است که نتایج آنالیز شیمیایی آن در جدول ۱ مشاهده می‌شود و همچنین برای ساخت نمونه شاهد از سیمان پرتلند تیپ ۲ استفاده شد. سنگ دانه مورد استفاده از معادن استان سمنان تهیه گردید که در شکل ۲- الف، نشان داده شده است. همچنین، افزودنی مورد استفاده در این مطالعه، سبک دانه پومیس می‌باشد که از معادن استان تبریز تهیه شده است. اندازه سنگ دانه‌ها و افزودنی مصرفی بین ۴/۷۵ تا ۹/۵ میلی‌متر می‌باشد. در شکل ۲- ب، تصویری از سبک دانه پومیس نشان داده شده است. همچنین، جدول ۲ مشخصات شیمیایی پومیس را نشان می‌دهد.

تراورتن در بتن متخلخل، به بهبود عملکرد روسازی بتن متخلخل پرداختند. براساس نتایج به دست آمده، به دلیل ساختار متخلخل تراورتن، با افزایش درصد جایگزینی تراورتن با سنگ دانه، درصد تخلخل و ضریب نفوذپذیری افزایش می‌یابد. بیشترین ضریب نفوذپذیری مربوط به نمونه‌های حاوی ۷۵ و ۱۰۰ درصد تراورتن می‌باشد که برابر با ۱/۹۶ میلی‌متر بر ثانیه است [۲۰].

استفاده از بتن متخلخل و نفوذپذیر، بجای روش‌های سنتی که باعث عدم نفوذ و مانع هدایت بخشی از رواناب‌اند، سبب نفوذ و تغذیه آب زیرزمینی می‌گردد و در مطالعات گذشته نتایج خوبی ارائه داده و حاکی از آن است که کاربرد بتن متخلخل مشکلات عبور و مرور را کاهش می‌دهد. افزودنی‌های معدنی با توجه به فراوانی و صرفه اقتصادی که دارند بسیار مورد توجه هستند. پومیس از جمله افزودنی‌های معدنی ارزان قیمت می‌باشد که قدرت جذب بالایی دارد. تا کنون کاربرد بتن متخلخل حاوی پومیس در سیستم رواناب شهری (روسازی بتن متخلخل) بررسی نشده است. از این رو، در این پژوهش، به بررسی اثر جایگزینی سبک دانه پومیس

جدول ۱- مشخصات شیمیایی سیمان پرتلند تیپ ۵

ترکیبات	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O
درصد وزنی	۲۰/۶۸	۴/۴۸	۴/۶۲	۶۲/۱۲	۳/۱۱	۱/۹۱	۰/۶۶	۰/۳۷



ب



الف

شکل ۲- الف) سنگ دانه و ب) سبک دانه پومیس

جدول ۲- مشخصات شیمیایی افزودنی پومیس

نوع افزودنی	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	P ₂ O ₅	K ₂ O
پومیس	۴۸/۳۷	۱۲/۴۹	۸/۰۷	۸/۴۳	۹/۵۸	۴/۶۳	۱/۷۹	۳/۲۷

۲-۲- طرح اختلاط

است که نفوذپذیری در یک جهت که همان جهت ریختن بتن در قالب است، اندازه‌گیری گردد. لذا نمونه باید از اطراف به گونه‌ای محصور شود که آب در حین آزمایش از یک سطح نمونه وارد و از سطح روبرو خارج گردد. برای این منظور، از فوم جهت آب‌بند کردن چهار وجه نمونه مکعبی استفاده گردید که در شکل ۴ نشان داده شده است. ضریب نفوذپذیری از رابطه (۱) و بر اساس قانون داری و فرض جریان لایه‌ای محاسبه شد. متوسط نتایج آزمایش روی سه نمونه مکعبی $100 \times 100 \times 100$ میلی‌متر، به‌عنوان ضریب نفوذپذیری گزارش شد.

در این تحقیق طبق استاندارد [۲۱] ACI 211/3R مقدار سنگ‌دانه و عیار سیمان به ترتیب برابر با ۱۳۳۰ و ۳۴۰ کیلوگرم بر متر مکعب و نسبت آب به سیمان برابر ۰/۳۸ در نظر گرفته شد. برای ساخت نمونه‌های بتن متخلخل که فاقد ریزدانه می‌باشند، افزودنی پومیس با مقادیر حجمی ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد جایگزین سنگ‌دانه گردید. در جدول ۳ طرح اختلاط نمونه‌های بتن متخلخل مشاهده می‌شود.

جدول ۳- طرح اختلاط بتن متخلخل

نام نمونه	علامت اختصاری	درصد حجمی افزودنی
شاهد (صفر)	Pu-0	۰
پومیس ۲۵	Pu-25	۲۵
پومیس ۵۰	Pu-50	۵۰
پومیس ۷۵	Pu-75	۷۵
پومیس ۱۰۰	Pu-100	۱۰۰

۳-۲- روش ساخت نمونه‌های بتن متخلخل

در این پژوهش، به‌منظور انجام آزمایش‌های مربوط به تخلخل، ضریب نفوذپذیری و رواناب از نمونه‌های مکعبی با ابعاد $100 \times 100 \times 100$ میلی‌متر و برای دقیق بودن آزمایش مقاومت فشاری از نمونه‌های مکعبی با ابعاد $150 \times 150 \times 150$ میلی‌متر استفاده شد. برای هر طرح اختلاط و هر آزمایش ۳ نمونه ساخته شده است. بدین منظور در ابتدا سطح داخلی قالب‌ها به‌وسیله روغن چرب گردید تا بتن سخت شده به راحتی از قالب جدا گردد. مقادیر مصالح مصرفی در بتن مطابق طرح‌های اختلاط وزن گردید و سپس مصالح مصرفی در دستگاه بتنیتر مخلوط شدند. پس از اختلاط، بتن به داخل قالب‌ها ریخته شد و در ۳ لایه با کوبه استاندارد، هر لایه با ۲۵ ضربه، متراکم گردید. همچنین، سطح قالب به کمک ماله بنایی صاف گردید. پس از ۲۴ ساعت، نمونه‌ها از داخل قالب بیرون آورده شده و برای عمل‌آوری به حوضچه آب منتقل گردیدند. دوره عمل‌آوری نمونه‌های بتنی در آب به دلیل استفاده از سیمان تیب ۵، ۴۲ روز می‌باشد. در شکل ۳، تصویری از نمونه‌های ساخته شده نشان داده شده است.



شکل ۳- نمونه‌های بتن متخلخل ساخته شده



شکل ۴- تصویری از آب‌بند کردن ۴ وجه نمونه

ضریب نفوذپذیری از رابطه (۱) و بر اساس قانون داری و فرض جریان لایه‌ای محاسبه شد. متوسط نتایج آزمایش روی سه نمونه مکعبی $100 \times 100 \times 100$ میلی‌متر، به‌عنوان ضریب نفوذپذیری گزارش شد.

$$K = \frac{aL}{At} \ln \left(\frac{h_1}{h_2} \right) \quad (1)$$

که در این رابطه، K نفوذپذیری برحسب میلی‌متر بر ثانیه، a سطح مقطع محفظه شیشه‌ای برحسب میلی‌متر مربع، A سطح مقطع

۴-۲- آزمایش نفوذپذیری

برای انجام آزمایش نفوذپذیری، دستگاهی به روش بار افتان در آزمایشگاه تکنولوژی بتن دانشگاه سمنان ساخته شد. قصد بر آن

شد. ابتدا نمونه به مدت ۳۰ دقیقه در داخل ظرف آب قرار گرفت و به بدنه ظرف آب ۱۰ ضربه زده شد و وزن غوطه‌وری (W_1) به دست آمد و در نهایت با استفاده از رابطه (۲) تخلخل نمونه محاسبه گردید.

$$A_t = \left(1 - \left(\frac{W_2 - W_1}{\rho_w V} \right) \right) \times 100 \quad (2)$$

در این رابطه A_t تخلخل کل برحسب درصد، V حجم نمونه (سانتی متر مکعب)، ρ_w دانسیته آب در دمای 21°C (گرم بر سانتی متر مکعب)، W_2 وزن نمونه خشک (گرم) و W_1 وزن نمونه در آب می‌باشد.

۳- نتایج و بحث

طرح آزمایش‌ها به صورت بلوک کاملاً تصادفی انجام شده و کلیه تجزیه و تحلیل‌ها به کمک نرم‌افزار SAS 9.4 انجام شده است. در این نرم‌افزار، تجزیه واریانس و مقایسه میانگین پارامترها به روش آزمون حداقل تفاوت معنی‌دار (LSD^1) انجام شده است. این روش یکی از پرکاربردترین آزمون‌ها می‌باشد [۲۴]. در جداول ۴ تا ۷ نتایج تجزیه واریانس به ترتیب برای پارامترهای مقاومت فشاری، ضریب نفوذپذیری، درصد تخلخل و چگالی به روش LSD در سطح اطمینان ۹۵٪ آورده شده است. در این جداول، مقدار F برای تیمارها و بلوک در سطح ۱٪ معنی‌دار شده که نشان می‌دهد تفاوت معنی‌داری بین تیمارها وجود دارد. ضریب همبستگی برای تمامی پارامترها بیش از ۰/۹۹ است که نشان می‌دهد رابطه خطی بین تیمارها وجود دارد. لازم به ذکر است که تمامی مقادیر حاصل از آزمایش‌ها، که در جداول و نمودارهای این پژوهش نشان داده شده است، میانگین مقادیر ۳ تکرار برای هر طرح اختلاط می‌باشد.

در جدول ۸، مقایسه میانگین پارامترهای مقاومت فشاری، ضریب نفوذپذیری، درصد تخلخل و چگالی به روش LSD در سطح ۵٪ آورده شده است. با توجه به این جدول مشاهده می‌شود که از لحاظ میانگین مقاومت فشاری، نمونه‌های Pu-0 و Pu-25 دارای اختلاف معنی‌داری با یکدیگر و با کل نمونه‌ها هستند که در نمونه Pu-25 به دلیل جایگزینی ۲۵ درصدی پومیس بجای سنگ‌دانه، و

نمونه برحسب میلی‌متر مربع، t زمان افت هد آب از h_1 تا h_2 بر حسب ثانیه، h_1 ارتفاع اولیه ستون آب برحسب میلی‌متر و h_2 ارتفاع نهایی ستون آب برحسب میلی‌متر می‌باشد.

۲-۵- آزمایش مقاومت فشاری

مقاومت فشاری از خواص مهم بتن محسوب می‌شود. این پارامتر، نقش مهمی در کنترل کیفیت بتن و اصلاح روش‌های تهیه آن دارد. طبق استاندارد BS 1881 [۲۲]، برای آزمایش مقاومت فشاری بایستی از نمونه‌های مکعبی با ابعاد $150 \times 150 \times 150$ میلی-متر استفاده شود. پس از عمل‌آوری ۴۲ روزه نمونه‌ها، آن‌ها را به مدت ۲۴ ساعت در معرض هوای آزاد قرار داده تا خشک شوند و پس از آن با استفاده از جک بارگذاری موجود در آزمایشگاه تکنولوژی بتن دانشگاه سمنان، مقاومت فشاری نمونه‌ها اندازه‌گیری شد. شکل ۵، نمایانگر دستگاه اندازه‌گیری مقاومت فشاری می‌باشد.



شکل ۵- دستگاه اندازه‌گیری مقاومت فشاری

۲-۶- آزمایش تخلخل

برای اندازه‌گیری درصد تخلخل از استاندارد ASTM c1745/1754M-12 [۲۳] استفاده شده است. بدین منظور ابتدا نمونه به مدت ۲۴ ساعت در گرمخانه با دمای 105°C درجه سلسیوس قرار داده شد. سپس با توزین آن، وزن خشک (W_2) به دست آمد. برای به دست آوردن وزن غوطه‌وری از ترازوی ارشمیدس استفاده

¹ Least Significant Difference

کم بودن وزن مخصوص پومیس، میانگین مقاومت فشاری نمونه است. در حالی که میانگین مقاومت فشاری سایر نمونه‌ها با هم نسبت به نمونه شاهد کاهش یافته و برابر با ۷/۳۲ مگا پاسکال شده تفاوت معنی‌داری ندارند و نزدیک به هم هستند.

جدول ۴- نتایج تجزیه واریانس مقاومت فشاری

منبع تغییرات	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	مقدار F	P	ضریب تغییرات	R ²
تیمار	۴	۵۶۸/۲۰۲۳	۱۴۲/۰۵۰۵	۱۱۲۵/۴۷	<۰/۰۰۰۱	-	-
بلوک	۲	۰/۰۳۰۸	۰/۰۱۵۴	۰/۱۲	۰/۸۸۶۵	-	-
خطا	۸	۱/۰۰۹۷	۰/۱۲۶۲	-	-	۵/۲۴۴۵	۰/۹۹۸۲
کل	۱۴	۵۶۹/۲۴۲۹	-	-	-	-	-

جدول ۵- نتایج تجزیه واریانس ضریب نفوذپذیری

منبع تغییرات	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	مقدار F	P	ضریب تغییرات	R ²
تیمار	۴	۰/۳۳۰۶	۰/۰۸۲۶	۵۴۴/۵۹	<۰/۰۰۰۱	-	-
بلوک	۲	۰/۰۰۰۶	۰/۰۰۰۳	۲/۲۳	۰/۱۷۰۴	-	-
خطا	۸	۰/۰۰۱۲	۰/۰۰۰۱	-	-	۰/۷۹۱۴	۰/۹۹۶۳
کل	۱۴	۰/۳۳۲۵	-	-	-	-	-

جدول ۶- نتایج تجزیه واریانس درصد تخلخل

منبع تغییرات	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	مقدار F	P	ضریب تغییرات	R ²
تیمار	۴	۱۲۳۶/۵۶۶۲	۳۰۹/۱۴۱۵	۵۱۲/۵۶	<۰/۰۰۰۱	-	-
بلوک	۲	۲/۲۲۲۴	۱/۱۱۱۲	۱/۸۴	۰/۲۱۹۷	-	-
خطا	۸	۴/۸۲۵۰	۰/۶۰۳۱	-	-	۲/۱۰۹۲	۰/۹۹۶۱
کل	۱۴	۱۲۴۳/۶۱۳۷	-	-	-	-	-

جدول ۷- نتایج تجزیه واریانس چگالی

منبع تغییرات	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	مقدار F	P	ضریب تغییرات	R ²
تیمار	۴	۱/۱۵۸۳	۰/۲۸۹۵	۹۴۹/۴۸**	<۰/۰۰۰۱	-	-
بلوک	۲	۰/۰۰۰۳	۰/۰۰۰۱	۰/۵۹**	۰/۵۷۶۷	-	-
خطا	۸	۰/۰۰۲۴	۰/۰۰۰۳	-	-	۱/۲۸۷۹	۰/۹۹۷۸
کل	۱۴	۱/۱۶۱۱	-	-	-	-	-

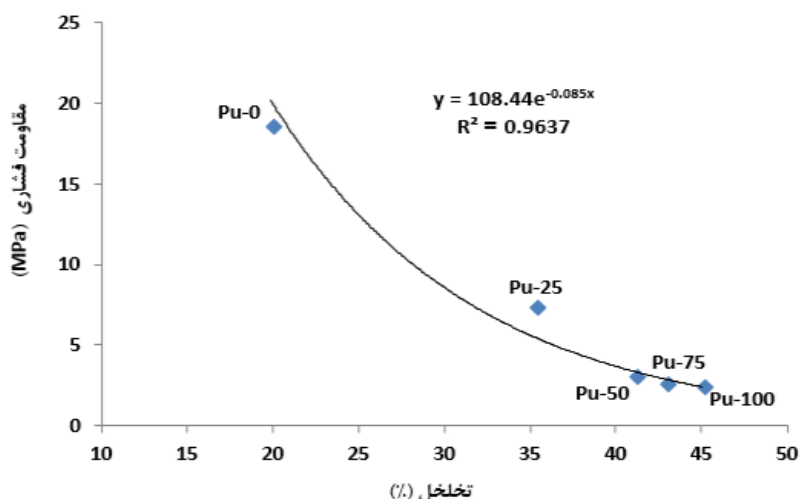
با توجه به جدول ۸، میانگین ضریب نفوذپذیری نمونه‌های حاوی افزایش خلل و فرج، میانگین ضریب نفوذپذیری نیز افزایش یافته درصد‌های متفاوت پومیس اختلاف معنی‌داری با یکدیگر دارند. نمونه شاهد دارای میانگین ضریب نفوذپذیری ۱/۳۳ میلی‌متر بر ثانیه است که با افزایش درصد جایگزینی پومیس با سنگ‌دانه، به دلیل افزایش خلل و فرج بتن متخلخل دارای اختلاف معنی‌داری با

یکدیگر می‌باشند. با افزایش درصد جایگزینی افزودنی پومیس، به دلیل افزایش فضای خالی نمونه، میانگین درصد تخلخل افزایش یافته است. نمونه Pu-100 دارای بیشترین میانگین درصد تخلخل (۴۴/۸۱ درصد) است. میانگین چگالی نمونه‌های بتن متخلخل نیز دارای اختلاف معنی‌داری با یکدیگر می‌باشند. با افزایش درصد جایگزینی پومیس، به دلیل وزن مخصوص کم سبک‌دانه آن، چگالی نمونه‌های بتن متخلخل نسبت به نمونه شاهد کاهش یافته است. بیشترین کاهش چگالی برابر ۴۱/۰۱ درصد می‌باشد. در شکل ۶ نمودار مقاومت فشاری نمونه‌های بتن متخلخل برحسب درصد تخلخل آورده شده است. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، با افزایش تخلخل نمونه‌های بتن متخلخل، مقاومت فشاری

جدول ۸- مقایسه میانگین پارامترهای مقاومت فشاری، ضریب نفوذپذیری، درصد تخلخل و چگالی در تیمارهای مختلف به روش

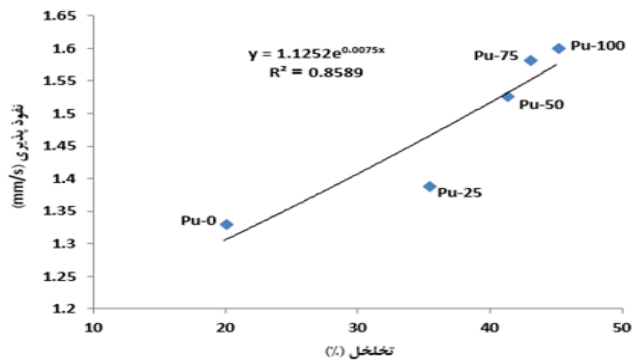
LSD در سطح ۵٪

تیمار	میانگین مقاومت فشاری (مگاپاسکال)	میانگین ضریب نفوذپذیری (میلی‌متر بر ثانیه)	میانگین درصد تخلخل (%)	چگالی (گرم بر سانتی‌متر مکعب)
Pu-0	۱۸/۵۳ ^a	۱/۳۳۰ ^e	۱۹/۸۴ ^c	۱/۷۹ ^a
Pu-25	۷/۳۲ ^b	۱/۴۸۰ ^d	۳۵/۲۱ ^d	۱/۵۳ ^b
Pu-50	۲/۹۹ ^c	۱/۵۶۴ ^c	۴۱/۲۳ ^c	۱/۲۶ ^c
Pu-75	۲/۶۰ ^c	۱/۶۳۶ ^b	۴۲/۹۸ ^b	۱/۱۶ ^d
Pu-100	۲/۴۱ ^c	۱/۷۷۲ ^a	۴۴/۸۱ ^a	۱/۰۲ ^e

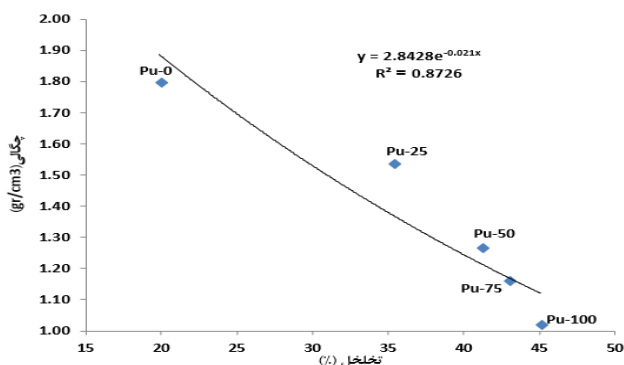


شکل ۶- نمودار مقاومت فشاری برحسب تخلخل

همان‌طور که ملاحظه می‌شود، تخلخل نمونه‌های حاوی پومیس بیشتر از ۳۵٪ می‌باشد و تمامی مقاومت‌های مربوطه کمتر از ۸ مگاپاسکال است که با نتایج تحقیق ایوکی و همکاران (۲۰۰۹) مطابقت دارد. ایشان در تحقیق خود برای نمونه‌های دارای تخلخل



شکل ۷- نمودار نفوذپذیری برحسب تخلخل



شکل ۸- نمودار چگالی برحسب تخلخل

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش، به دلیل صرفه اقتصادی و قدرت جذب بالای افزودنی پومیس، از آن برای ساخت بتن متخلخل استفاده شده تا علاوه بر کاهش حجم رواناب شهری، باعث تقویت سفره‌های آب زیرزمینی نیز شود. نتایج به‌دست آمده عبارت‌اند از:

- با جایگزینی افزودنی پومیس در ساختار بتن متخلخل و حذف متناظر سنگ‌دانه، مقاومت فشاری نمونه‌ها، به دلیل خلل و فرج موجود در ساختمان پومیس، کاهش می‌یابد.

- با افزایش درصد جایگزینی پومیس در نمونه‌های بتن متخلخل، به دلیل افزایش درصد تخلخل، ضریب نفوذپذیری نیز افزایش می‌یابد.

- با جایگزینی بیش از ۲۵٪ پومیس، نمونه‌ها از نظر مقاومتی و تخلخل دارای مقادیر نزدیک به هم می‌شوند. به گونه‌ای که بیشترین اختلاف مقاومتی و تخلخل بین نمونه‌های Pu-0، Pu-50 و Pu-75 و Pu-100 به ترتیب برابر ۱۹/۴ و ۷/۹۸ درصد می‌باشد.

- کاهش مقاومت فشاری با افزایش درصد پومیس برای تمامی نمونه‌ها نسبت به نمونه Pu-0 به ترتیب برابر ۶۰/۴۹، ۸۳/۸۶ و ۸۵/۹۶ و ۸۶/۹۹ درصد می‌باشد.

بیش از ۳۰٪ به مقاومت کمتر از ۱۰ مگاپاسکال رسیدند [۲۵]. همچنین هریادی و تامای (۲۰۱۵) در تحقیق خود برای نمونه‌های با درصد تخلخل بیش از ۳۲ به مقاومت ۱۰ مگاپاسکال رسیدند [۱۱]. از معادله‌ای که از این نمودار بدست آمده با ضریب تبیین ۰/۹۶، می‌توان برای نمونه‌های بتن متخلخل با درصد جایگزینی پومیس و تخلخل متفاوت، مقاومت فشاری را به‌دست آورد.

نفوذپذیری و درصد تخلخل پارامترهایی وابسته به یکدیگر هستند. نفوذپذیری بتن متخلخل بیانی از چگونگی ارتباط میان منافذ موجود در این نوع بتن و تخلخل حجم کل منافذ می‌باشد. به همین دلیل ارتباط بین منافذ نقش تعیین‌کننده‌ای در نفوذپذیری دارد. در شکل ۷ نمودار نفوذپذیری براساس درصد تخلخل ترسیم شده است. همان‌طور که در نمودار نشان داده شده است، با افزایش درصد جایگزینی پومیس، تخلخل نفوذپذیری نمونه‌ها افزایش پیدا کرده است. افزایش ضریب نفوذپذیری با افزایش درصد پومیس برای تمامی نمونه‌ها نسبت به نمونه Pu-0 به ترتیب برابر ۱۰/۱۳، ۱۴/۹۶، ۱۸/۷ و ۲۴/۹۴ درصد می‌باشد که تأییدی بر ساختار متخلخل پومیس است. همچنین، افزایش درصد تخلخل با افزایش درصد پومیس برای تمامی نمونه‌ها نسبت به نمونه Pu-0 به ترتیب برابر ۴۳/۶۵، ۵۱/۸۷، ۵۳/۸۳ و ۵۵/۷۲ درصد می‌باشد. تغییرات تخلخل نسبت به نفوذپذیری چشم‌گیرتر است به این دلیل که در بتن متخلخل منافذی وجود دارند که مستقل و بدون ارتباط با یکدیگر هستند و باعث افزایش تخلخل می‌شوند، ولی اثری در نفوذپذیری ندارند. از معادله‌ای که از این نمودار بدست آمده با ضریب تبیین برابر ۰/۸۵، می‌توان برای نمونه‌های بتن متخلخل با درصد جایگزینی پومیس و تخلخل متفاوت، نفوذپذیری را بدست آورد.

در شکل ۸، نمودار چگالی برحسب تخلخل ترسیم شده است. با توجه به این نمودار، با افزایش درصد جایگزینی پومیس، تخلخل افزایش و چگالی کاهش پیدا کرده است. دلیل کاهش چگالی، وزن مخصوص کم پومیس می‌باشد. کاهش چگالی با افزایش درصد پومیس برای تمامی نمونه‌ها نسبت به نمونه Pu-0 به ترتیب برابر ۱۴/۵۲، ۲۹/۶۰، ۳۵/۱۹ و ۴۳/۰۱ درصد می‌باشد. با استفاده از معادله بدست آمده از این نمودار با ضریب تبیین برابر ۰/۸۷، می‌توان برای نمونه‌های بتن متخلخل با درصد جایگزینی پومیس و تخلخل متفاوت، چگالی را محاسبه نمود.

- به دلیل ساختار متخلخل پومیس، ضریب نفوذپذیری با افزایش درصد جایگزینی پومیس برای تمامی نمونه‌ها نسبت به نمونه شاهد به ترتیب ۱۰/۱۳، ۱۴/۹۶، ۱۸/۷ و ۲۴/۹۴ درصد افزایش می‌یابد.

- افزایش میزان تخلخل با افزایش درصد پومیس برای تمامی نمونه‌ها نسبت به نمونه Pu-0 به ترتیب برابر ۴۳/۶۵، ۵۱/۸۷، ۵۳/۸۳ و ۵۵/۷۲ درصد می‌باشد.

- به دلیل وزن مخصوص کم سبک‌دانه پومیس، چگالی نمونه‌ها با افزایش درصد پومیس کاهش می‌یابد که این مقدار کاهش برای تمامی نمونه‌ها نسبت به نمونه Pu-0 به ترتیب برابر ۱۴/۵۲، ۲۹/۶۰، ۳۵/۱۹ و ۴۳/۰۱ درصد می‌باشد.

[10] www.Kaniarsabokdane.ir.

[11] Hariyadi, Tamai H, "Enhancing the performance of porous concrete by utilizing the pumice aggregate", *Procedia Engineering*, 125, 732-738, 2015.

[۱۲] عبدالرحیم پور حکیمی ن، "بررسی آزمایشگاهی پنج طرح اختلاط بتن سبک برای تعیین طرح اختلاط بهینه و ارائه برای استفاده در مهندسی عمران و مصالح پیش ساخته به وسیله لیکا و پامیس منطقه آذربایجان"، کنفرانس بین المللی معماری، شهرسازی، عمران، هنر، محیط زیست، افق‌های آینده و نگاه به گذشته، ۲۰۱۵.

[13] Li J, Zhang Y, Liu G, Peng X, "Preparation and performance evaluation of an innovative pervious concrete pavement", *Construction and Building Materials*, 138, 479-485, 2017.

[14] Doostmohamadi M, Karami H, Farzin S, Mousavi SF, "Improving the performance of porous concrete composites using zeolite as a coarse grain", *Mechanics of Advanced Composite Structures* (5), 157-163, 2018.

[15] Elizondo-Martínez EJ, Andrés-Valeri VC, Rodríguez-Hernández J, Sangiorgi C, "Selection of additives and fibers for improving the mechanical and safety properties of porous concrete pavements through multi-criteria decision-making analysis", *Sustainability*, 12(6), 2020.

[۱۶] مجدی ع، شکرچی زاده م، جعفری ا، علی لیرن، ناصری ع، "بررسی ظرفیت مقاومتی سبک‌دانه اسکرپا به منظور کاربرد در بتن سبک‌دانه سازه‌ای"، اولین کنفرانس ملی بتن سبک، ص ۲۶۳-۲۷۳، ۱۳۹۰.

[۱۷] حبیبی ع، وزیری ا، محمدی ا، "رابطه مقاومت فشاری با مقاومت کششی و وزن مخصوص بتن سبک ساخته شده با پوکه معدنی منطقه کردستان"، تحقیقات بتن، ۵(۲)، ص ۳۳-۴۴، ۱۳۹۱.

[۱۸] تیموری ا، موسوی س ف، کرمی ح، فرزین س، جواهری طهرانی م، "بررسی آزمایشگاهی اثر اضافه کردن افزودنی‌های مختلف بر ویژگی بتن متخلخل قابل کاربرد در سیستم رواناب شهری"، مهندسی زیرساخت‌های حمل و نقل، ۲(۲)، ص ۵۱-۶۵، ۱۳۹۵.

۵- مراجع

[1] Yang J, Jiang G, "Experimental study on properties of pervious concrete pavement materials", *Cement and Concrete Research*, 33(3), 381-386, 2003.

[2] Huang B, Wu H, Shu X, Burdette EG, "Laboratory evaluation of permeability and strength of polymer-modified pervious concrete", *Construction and Building Materials*, 24(5), 818-823, 2010.

[3] ACI 522R-10, "Pervious concrete", American Concrete Institute Committee, Farmington Hills, 2010.

[4] Tennis PD, Leming ML, Akers DJ, "Pervious concrete pavements", Skokie, IL, Portland Cement Association, 2004.

[۵] رستمی گله‌دار م، بهرامی چگینی ا، "بررسی خواص مکانیکی و تأثیرات سنگ‌دانه‌های متداول در ساخت بتن متخلخل"، فصلنامه علمی تخصصی مهندسی سازه، ص ۱۷-۲۴، ۱۳۹۴.

[6] Gomez-Ullate E, Castillo-Lopez E, Castro-Fresno D, Bayon JR, "Analysis and contrast of different pervious pavements for management of storm-water in a parking area in Northern Spain", *Water Resources Management*, 25(6), 1525-1535, 2011.

[7] Ćosić K, Korat L, Ducman V, Netinger I, "Influence of aggregate type and size on properties of pervious concrete", *Construction and Building Materials*, 78, 69-76, 2015.

[۸] شیرگیر ب، حسنی ا، علیزاده گودرزی ه، "تأثیر نوع دانه‌بندی بر خواص فیزیکی و نفوذپذیری بتن متخلخل در روسازی"، مجله علمی- پژوهشی عمران مدرس، جلد ۱۱، شماره ۱، ص ۴۹-۶۰، ۱۳۹۰.

[۱۹] تیموری ا، کرمی ح، موسوی س.ف، فرزین س، "بررسی عملکرد مقاومتی و نفوذپذیری بتن متخلخل حاوی پرلیت و لیکا برای استفاده در سیستم رواناب شهری"، نشریه مهندسی عمران فردوسی، ۳۱ (۳)، ص ۸۳-۹۲، ۱۳۹۷.

[۲۰] فرزین س، دوست‌محمدی م، کرمی ح، موسوی س.ف، رضائی‌فر ا، "بهبود عملکرد روسازی بتن نفوذپذیر با جایگزینی سنگ دانه رسوبی تراورتن"، نشریه مهندسی سازه و ساخت، ۶ (۳)، ص ۵-۱۶، ۱۳۹۸.

[21] ACI Committee 211, "Guide for Selecting Proportions for No-slump Concrete", ACI 211.3R Report, 2006.

[22] British Standard, Testing Concrete, "Method for Making Test Cubes from Fresh Concrete", BS 1881, Part 108, 1983.

[23] ASTM C1754/C1754M-12, "Standard Test Method for Density and Void Content of Hardened Pervious Concrete", ASTM International, USA, 2012.

[۲۴] فاضلی رستم‌پور م، "تجزیه و تحلیل آماری با استفاده از SAS"، مرکز نشر سپهر، ۱۳۸۹.

[25] Aoki Y, Sri Ravindrarajah R, Khabbaz H, "Environmentally friendly sustainable pervious concrete", In Australian Conference on the Mechanics of Structures and Materials, Taylor & Francis Group, 2009.

Experimental investigation of the effect of substitution of aggregate by lightweight pumice on the performance of porous concrete pavement

Mahsa Doostmohamadi

MSc. graduated student, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran.

Saeed Farzin *

Water Engineering and Hydraulic Structures Department, Civil Engineering Faculty, Semnan university, Semnan.

Hojat Karami

Water Engineering and Hydraulic Structures Department, Civil Engineering Faculty, Semnan university, Semnan.

Sayed-Farhad Mousavi

Water Engineering and Hydraulic Structures Department, Civil Engineering Faculty, Semnan university, Semnan.

Omid Rezaifar

Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran.

Abstract

Porous concrete refers to a combination of cement and water, without fine grains or with a small amount of fine grains, which is important in terms of water transferability and permeability. This material can act as a drain, which carries rainwater, and enhances groundwater. In the present article, the effect of replacement of aggregate by pumice mineral additive of porous concrete with volumetric amounts of 25, 50, 75 and 100% was studied on compressive strength, permeability coefficient and porosity percentage. Laboratory analysis was performed using SAS 9.4 software at 95% confidence level for all samples. The results show that with the replacement of the pumice additive in the structure of the porous concrete and the corresponding removal of the aggregates, the compressive strength of the samples is reduced due to the porosity of the pumice structure and the permeability coefficient and porosity increase. The reduction of compressive strength with increasing pumice percentage for all samples was 60.49, 83.86, 85.96 and 86.98%, respectively. Increasing the permeability coefficient with increasing pumice percentage for all samples was 10.13, 14.96, 18.7 and 24.94%, respectively.

Keywords: Porous concrete, Pumice, Compressive strength, Permeability, Porosity, Urban runoff.

* Corresponding Author: saeed.farzin@semnan.ac.ir