

عملکرد بتن متخلخل حاوی افزودنی جهت کاهش سیلاب شهری

احسان تیموری*، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

سید فرهاد موسوی، استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

حجت کرمی، استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

سعید فرزین، استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

E-mail: Teymuri.e91@gmail.com

تاریخ دریافت: ۹۵/۰۱/۲۷ تاریخ پذیرش نهایی: ۹۵/۰۳/۰۲

چکیده

از جمله موارد دخالت بشر در محیط زیست، تغییرات قابل توجه در نفوذ ناپذیر نمودن بخش‌هایی از سطح زمین و به تبع آن تغییر در چرخه آب می‌باشد. بتن متخلخل نوع خاصی از بتن با تخلخل بالاست که با محیط‌زیست سازگار بوده و می‌توان از آن به عنوان یکی از روش‌های نفوذپذیر نمودن سطح زمین و کاهش حجم رواناب شهری استفاده نمود. در پژوهش آزمایشگاهی حاضر، به منظور بهبود عملکرد این نوع بتن، اثر اضافه کردن سبک‌دانه‌های پوکه معدنی و پرلیت (با اندازه ۰/۶ تا ۱/۲ میلی‌متر) و همچنین افزودن ۱۰٪ وزنی ریزدانه به نمونه‌ها مورد بررسی قرار گرفت. در این راستا، پارامترهای تأثیرگذار برای استفاده از بتن متخلخل در سیستم رواناب شهری نظیر مقاومت فشاری، ضریب نفوذپذیری و درصد تخلخل برای نمونه‌ها اندازه‌گیری شد. تحلیل نتایج آزمایشگاهی با استفاده از نرم‌افزار SAS 9.4 در سطح اطمینان ۹۵٪ برای تمامی نمونه‌ها انجام گردید. نتایج نشان داد که با افزودن ریزدانه به بتن متخلخل، مقاومت فشاری افزایش و ضریب نفوذپذیری و درصد تخلخل کاهش می‌یابد. افزودن سبک‌دانه پوکه معدنی نیز باعث افزایش مقاومت بتن متخلخل و کاهش ضریب نفوذپذیری و درصد تخلخل گردید. اما سبک‌دانه پرلیت، به دلیل وزن مخصوص کم، علاوه بر کاهش ضریب نفوذپذیری و درصد تخلخل، منجر به کاهش مقاومت فشاری در نمونه‌های بتن متخلخل نیز شد. به طور کلی، سبک‌دانه پوکه معدنی به دلیل داشتن وزن مخصوص بیشتر نسبت به پرلیت و همچنین داشتن فضای خالی بیشتر در ساختمان داخلی خود دارای عملکرد بهتری بود.

کلید واژگان: بتن متخلخل، پوکه معدنی، پرلیت، سیستم رواناب شهری

۱- مقدمه

روسازی استفاده می‌گردد. با توجه به لزوم استفاده از رواناب سطحی جهت تغذیه سفره های آب زیرزمینی شهری و حفظ تعادل زیست محیطی مناطق شهری، امروزه استفاده از تکنیک روسازی متخلخل در معابر شهری از اهمیت ویژه‌ای در کشورهای مختلف برخوردار می‌باشد. بتن متخلخل^۱، به مخلوطی از مصالح شامل سیمان پرتلند، درشت دانه، مقدار کم یا فاقد ریزدانه، مواد افزودنی و آب که دارای اسلامپ صفر و دانه‌بندی باز باشد، اطلاق می‌گردد. بتن متخلخل به دلیل مقدار کم ریزدانه، دارای ساختاری متشکل از حفره‌های بهم پیوسته می‌باشد^[۳]. نمونه‌ای از بتن متخلخل و کاربرد آن در شکل ۱ آورده شده است.

امروزه تمام کشورهای جهان آب را سرمایه ملی تلقی می‌کنند و از آنجا که تنها یک درصد از منابع آب جهان، شیرین و قابل استفاده می‌باشد، پیش‌بینی می‌گردد که در قرن آینده منابع آب شیرین حتی نسبت به چاه‌های نفت نیز ارزشمندتر خواهند بود و شاید بتوان آن را علت اصلی درگیری‌ها و جنگ‌های آینده به حساب آورد [۱]. با توجه به اینکه سیلاب‌های شهری حجم زیادی از آب شیرین را حمل می‌کنند و می‌توانند به عنوان یک منبع تأمین آب برای مصارف مختلف قلمداد شوند، در سال‌های اخیر توجه به مطالعه در زمینه احیا و استفاده از این منبع با ارزش فزونی یافته است [۲].

به منظور مدیریت هرچه بهتر رواناب‌های سطحی در شهرها از راهکارهای مختلفی نظیر ساخت نهرها و نفوذپذیر نمودن سطح



شکل ۱- الف- نمونه‌ای از بتن متخلخل ب- استفاده از بتن متخلخل در پیاده‌رو ج- استفاده از بتن متخلخل در پارکینگ‌ها

روسازی به منظور کاهش رواناب و افزایش نفوذپذیری و همچنین به عنوان زهکش در لایه‌های زیرسازی راه‌ها و سازه‌های هیدرولیکی می‌باشد [۶ و ۷].

آلودگی‌های موجود در رواناب شهری اثرات مضرری چون کاهش اکسیژن محلول، افزایش کدورت آب و سمیت بر کیفیت آب و اکوسیستم‌های خاکی و آبی دارد. آنچه در این میان بر دشواری کنترل این نوع آلودگی می‌افزاید غیر نقطه‌ای بودن این منبع آلودگی است. همچنین بار آلودگی در بخش اولیه رواناب‌های سطحی به مراتب بیشتر است که این مسئله اهمیت کنترل تند سیلاب اولیه را به منظور کنترل آلودگی روشن می‌سازد. در جدول ۱ مقایسه‌ای بین استاندارد ارائه شده توسط معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی ریاست جمهوری در خصوص ویژگی رواناب سطحی و نتایج به دست آمده از آزمایش روی رواناب سطحی کانال فیروزآباد، به منظور نشان دادن اهمیت آلودگی رواناب در بخش اولیه، ارائه شده است [۸ و ۹].

از مزایای بتن متخلخل در روسازی می‌توان به روسازی سازگار با محیط‌زیست، کاهش آلودگی صوتی (جذب انرژی صوتی)، بهبود شرایط ایمنی (ضریب اصطکاک) و ممانعت از پدیده آب سطحی (هیدروپلانینگ)، کاهش شیب حرارتی، کاهش خطر تورم در اثر یخبندان و جلوگیری از رواناب سطحی اشاره کرد [۴].

مقاومت این نوع بتن از بتن معمولی کمتر است که دلیل اصلی آن وجود فضای خالی زیاد در ساختمان آن است. بنابراین، استفاده از این نوع بتن در روسازی با ترافیک متوسط و کم مناسب خواهد بود. چهار دلیل اصلی برای توجه به مقاومت کم بتن متخلخل وجود دارد که عبارتند از: کاهش تعداد نقاط اتصالی بین سنگدانه‌ها به دلیل نبود ریزدانه، ضعف در مقاومت پیوندی بین خمیر چسباننده و سنگدانه، سطح چسبندگی پایین به دلیل نبود ریزدانه یا ریزدانه کم و وجود حفرات زیاد [۵]. بتن متخلخل از نظر زیست محیطی مزایای فراوانی دارد که امروزه توجه خاصی به آن شده است. مورد استفاده این نوع بتن اکثراً در مناطق با بارندگی زیاد، فرودگاه‌ها، پارکینگ‌ها، پاسیوها، گذرگاه‌های عابر پیاده و جاده‌های با ترافیک سبک در قالب لایه

¹Porous Concrete

جدول ۱- مقایسه بین ویژگی رواناب سطحی کانال فیروز آباد و استاندارد ارائه شده توسط معاونت برنامه ریزی و نظارت راهبردی ریاست جمهوری

پارامتر	کانال فیروزآباد	ارائه شده توسط معاونت برنامه ریزی و نظارت راهبردی ریاست جمهوری
COD	۱۵۹±۵۹	۷۳-۴۰
BOD	۵۱/۵±۲۱	۱۰-۸
TSS	۳۰۱±۶۲	۱۰۰-۶۵
کلیفرم مدفوعی	۱/۷۸×۱۰ ^۵ ±۱/۲۲×۱۰ ^۵	۱۰۴-۱۰۳

سابرامانیام و همکاران (۲۰۰۸) از پوکه معدنی پوشیده شده توسط دی اکسید تیتانیوم برای حذف باکتری‌های موجود در آب رودخانه استفاده کردند. نتایج نشان داد که از بین بردن پاتوژن‌ها توسط نوع خاصی از راکتور که در آن سنگ پوکه معدنی توسط دی اکسید تیتانیوم پوشش داده شده روش مناسب و مفیدی برای تصفیه آب آشامیدنی و فاضلاب است [۲۰].

در گذشته، محققین با استفاده از افزودنی‌های مختلف سعی در کاهش آلودگی‌های موجود به روش‌های گوناگون داشته‌اند. افزودنی‌ها و جذب‌های معدنی با توجه به فراوانی و صرفه اقتصادی که دارند بسیار مورد توجه هستند. پوکه معدنی و پرلیت از جمله افزودنی‌های معدنی و بسیار ارزان قیمت هستند که به صورت گسترده برای حذف آلاینده‌های گوناگون به کار رفته‌اند. اما تا کنون کاربرد آن‌ها در بتن متخلخل بررسی نشده است. برای استفاده از بتن متخلخل در سیستم رواناب شهری بایستی ابتدا پارامترهای هیدرولیکی و فیزیکی آن را مورد بررسی قرار داد. از این رو، در این پژوهش، به بررسی اثر افزودنی‌های ذکر شده در بتن متخلخل بر پارامترهای مقاومت فشاری، ضریب نفوذپذیری و درصد تخلخل پرداخته شده است.

۲- مواد و روش‌ها

در این پژوهش، از سبک‌دانه‌های پوکه معدنی و پرلیت به عنوان افزودنی در بتن متخلخل، یکبار با دانه‌بندی سنگدانه به صورت یکنواخت، و بار دیگر با اضافه کردن ۱۰٪ وزنی ریزدانه (شن رد شده از الک شماره ۸) استفاده گردید. افزودنی‌های استفاده شده دارای اندازه ۰/۶ تا ۱/۲ میلی‌متر بودند و با درصد‌های وزنی ۵، ۱۰ و ۱۵ جایگزین سنگدانه شدند. افزودنی‌ها برحسب اندازه، درصد جذب آب، تخلخل و پارامترهایی از این قبیل، تأثیر متفاوتی در کاهش حجم رواناب دارند. همچنین، مقاومت فشاری بتن متخلخل حاوی افزودنی‌های گوناگون پارامتری تأثیرگذار بر انتخاب و استفاده در سیستم رواناب شهری می‌باشد. آزمایش‌ها به روش آماری فاکتوریل در سه تکرار برای هر نمونه انجام گرفت.

بتن متخلخل به عنوان مصالحی نو به منظور روسازی راه‌ها به کار گرفته می‌شود. مهمترین مزیت آن توانایی عبور آب از آن است که باعث برگشت آب به منابع زیرزمینی و همچنین جلوگیری از جاری شدن رواناب روی سطح جاده می‌گردد. محققین و بهره‌برداران با استفاده از این بتن‌های متخلخل پی به امکان پالایش فیزیکی رواناب‌ها نیز برده‌اند [۱۰]. طبق گزارش‌های محققین، انواع مختلفی از افزودنی‌ها، خاک‌پوش‌ها^۱ و افزودنی‌ها مانند: کربن فعال، خاک اره درخت افرا، خاکه پوست درخت اکالیپتوس، تفاله نیشکر و خاکستر وجود دارند که برای پاک‌سازی آب‌های آلوده مورد استفاده قرار گرفته‌اند. استفاده از مواد طبیعی که قابلیت جذب فلزات سنگین را دارند در دهه‌های اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته است. از جمله این مواد می‌توان به زئولیت‌های طبیعی، خاکستر، خاک اره، پوست درختان کاج و گردو، زردآلو، خرما و دانه‌های انگور، کاه برنج، پوست خرچنگ و زائادات برگ چای اشاره کرد [۱۱، ۱۲، ۱۳، ۱۴ و ۱۵].

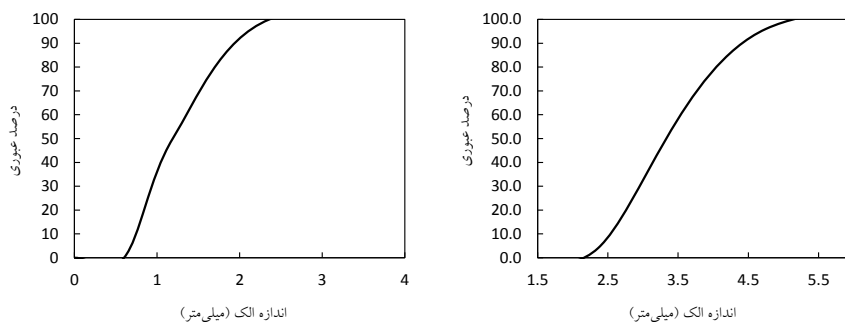
حسامی و احمدی (۱۳۹۴) در پژوهشی، از ماسه و خاکستر پوسته برنج به منظور تقویت خمیر سیمان برای روسازی بتنی متخلخل و همچنین از الیاف پلی‌فیلین سولفاید (PPS) به منظور بهبود خصوصیات مکانیکی آن استفاده کرد. نتایج نشان داد که ماسه به تنهایی تأثیر کمی بر خصوصیات مکانیکی بتن متخلخل داشته، اما ترکیب ماسه، خاکستر پوسته برنج و الیاف تأثیر قابل توجهی در این مورد داشته است [۱۶]. شیرگیر و همکاران (۱۳۹۰)، تأثیر نوع دانه‌بندی بر خواص فیزیکی و نفوذپذیری بتن متخلخل را بررسی کردند. نتایج حاصل از پراکندگی قابل توجه مقادیر مقاومت بتن متخلخل با دانه‌بندی مختلف حکایت داشت [۱۷].

بهمنی و همکاران (۱۳۹۲) به بررسی میزان حذف سورفکتانت آنیونی LABS با افزودنی‌های معدنی پرلیت و کربن فعال پرداختند. بهترین شرایط برای جذب سطحی ۲۰ میلی‌گرم بر لیتر سورفکتانت در زمان ۱۰ دقیقه، دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد و PH برابر ۷ برای ۰/۸ گرم کربن فعال به دست آمد. بازده حذف با استفاده از افزودنی معدنی پرلیت نیز در شرایط بهینه به دست آمد که راندمان حذف کمتری از کربن فعال داشت [۱۸]. آردالی و همکاران (۲۰۱۴) در پژوهشی، از پرلیت منبسط شده برای حذف مس از شیرابه زباله‌های صنعتی استفاده کردند. توانایی پرلیت در حذف مس به خوبی مشخص گردید [۱۹].

^۱Mulches

۱-۲ مشخصات مصالح مصرفی

سنگدانه و مواد افزودنی مورد نیاز از استان سمنان و سیمان مصرفی (تیپ ۵) از کارخانه سیمان تهران تهیه شدند. شکل ۲ دانه‌بندی سنگدانه و افزودنی به کار برده شده را نشان می‌دهد.



شکل ۲- دانه‌بندی افزودنی‌ها (سمت راست) و دانه‌بندی سنگدانه مصرفی (سمت چپ). ($d_{50}=7/1 \text{ mm}$)

در این حالت، آب از لا به لای سنگ به صورت کامل تخلیه شده و توده‌های سنگ به اندازه ۷ تا ۱۵ برابر افزایش حجم پیدا می‌کنند. مصالح جدید که از نظر شکل بزرگ و حجیم شده‌اند، سفید رنگ، در ابعاد و قطعات بزرگ و نامرتب بوده و سفیدی آن‌ها به دلیل بخارهای حاصل از تبخیر مایعات و آب داخل سنگ می‌باشد. وزن مخصوص سنگ پرلیت در حالت خام و منبسط نشده در حدود ۱۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب می‌باشد. ولی وزن مخصوص حالت منبسط شده آن به صورت سبک‌دانه پرلیتی بین ۳۰ تا ۲۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب می‌باشد [۲۲].

در شکل ۲، افزودنی‌های مصرفی و در جدول ۲ برخی مشخصات شیمیایی آن‌ها آورده شده است.

پوک‌ه معدنی قدیمی‌ترین سبک‌دانه‌ای است که مورد استفاده قرار گرفته است. این سنگ در اثر ورود مواد مذاب آتشفشانی به مخازن آب مانند دریاها و دریاچه‌ها و تخلیه گاز در هنگام انجام سریع ماگمای روان ایجاد می‌شود. از دیدگاه میکروسکوپی، پوک‌ه معدنی به رنگ خاکستری تیره که به قهوه‌ای می‌گراید و ظاهری شبیه به سنگ پا دارد، می‌باشد [۲۱].

برای به دست آوردن سبک‌دانه پرلیت از سنگ پرلیت، نخست سنگ پرلیت را در داخل کوره‌های دوار به دمای ۸۵۰ تا ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد می‌رسانند و سنگ به صورت شیشه‌ای نرم حاصل می‌شود.



شکل ۳- الف- پوک‌ه معدنی و ب- پرلیت

جدول ۲- برخی مشخصات اصلی شیمیایی افزودنی‌های مصرفی

درصد ترکیب							نوع افزودنی	
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	P ₂ O ₅	LOI	
۴۸/۳۷	۱۲/۴۹	۸/۰۷	۸/۴۳	۹/۵۸	۴/۳۶	۱/۷۹	۰/۶	پوکه معدنی
۶۹/۵	۱۲/۸	۰/۹۴	۰/۸	۰/۵	۳	۰/۰۴	۵/۱	پرلیت

۲-۲- طرح اختلاط بتن

برای ساخت نمونه‌های بتن متخلخل معمولی، طرح اختلاط اولیه ای با توجه به استاندارد ACI 211/3R در نظر گرفته شد [۲۳] که در آن مقدار سنگدانه و سیمان به ترتیب ۱۴۰۰ و ۳۳۰ کیلوگرم بر متر مکعب و نسبت آب به سیمان (W/C) برای تمامی نمونه‌ها ثابت و برابر ۰/۳۸ بود. علاوه بر این، با اضافه کردن ۱۰٪ وزنی فیلر به طرح اختلاط اولیه، مقایسه‌ای از نظر پارامترهای مقاومت فشاری، ضریب نفوذپذیری و درصد تخلخل با نمونه‌های بدون فیلر انجام شد.

برای ساخت نمونه‌های بتن متخلخل، افزودنی ریزدانه با درصدهای ۵، ۱۰ و ۱۵ جایگزین درصدی از سنگدانه شد. تیمارهای آزمایش، کد هر تیمار، درصد ریزدانه و درصد افزودنی‌ها در جدول ۳ ارائه شده است. برای هر تیمار، ۳ تکرار در نظر گرفته شده است. به دلیل سهولت در انجام آزمایش‌های مربوط به تخلخل و ضریب نفوذپذیری از نمونه‌های مکعبی با ابعاد ۱۰۰×۱۰۰×۱۰۰ میلی‌متر و برای دقیق بودن آزمایش مقاومت فشاری از نمونه‌های مکعبی با ابعاد ۱۵۰×۱۵۰×۱۵۰ میلی‌متر استفاده شد.

جدول ۳- طرح اختلاط استفاده شده در بتن متخلخل

نام نمونه	علامت اختصاری	درصد ریزدانه	درصد وزنی
شاهد ۰	C-0	۰	۰
پوکه معدنی ۵-۰	Pu5-0*	۰	۵
پوکه معدنی ۱۰-۰	Pu10-0	۰	۱۰
پوکه معدنی ۱۵-۰	Pu15-0	۰	۱۵
پرلیت ۵-۰	Pe5-0	۰	۵
پرلیت ۱۰-۰	Pe10-0	۰	۱۰
پرلیت ۱۵-۰	Pe15-0	۰	۱۵
شاهد ۱۰	C-10	۱۰	۰
پوکه معدنی ۵-۱۰	Pu5-10	۱۰	۵
پوکه معدنی ۱۰-۱۰	Pu10-10	۱۰	۱۰
پوکه معدنی ۱۵-۱۰	Pu15-10	۱۰	۱۵
پرلیت ۵-۱۰	Pe5-10	۱۰	۵
پرلیت ۱۰-۱۰	Pe10-10	۱۰	۱۰
پرلیت ۱۵-۱۰	Pe15-10	۱۰	۱۵

* عدد بعد از خط تیره نشان دهنده درصد ریزدانه و عدد چسبیده به حرف لاتین درصد افزودنی می‌باشد

۲-۳- آزمایش نفوذپذیری

برای انجام آزمایش نفوذپذیری (هدایت هیدرولیکی)، دستگاهی به روش بار افتان در آزمایشگاه سازه دانشگاه سمنان ساخته شد (شکل ۴) که نمونه‌های مکعبی بتن متخلخل ساخته شده در آن جای گیرند و آب‌بندی لازم نیز امکان‌پذیر باشد. شبیه این آزمایش در [ACI 522R] ذکر شده، ولی به جزئیات آن پرداخته نشده است. میزان نفوذپذیری طبق رابطه (۱) محاسبه شد:

در این رابطه، K نفوذپذیری (میلی‌متر بر ثانیه)، a سطح مقطع محفظه شیشه‌ای (میلی‌متر مربع)، L طول نمونه (میلی‌متر)، A سطح مقطع نمونه بتن (میلی‌متر مربع)، t زمان افت بار از h₁ به h₂ (ثانیه)، h₁ ارتفاع اولیه ستون آب (میلی‌متر) و h₂ ارتفاع نهایی ستون آب (میلی‌متر) می‌باشد.

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

۲-۴- آزمایش تخلخل

برای انجام آزمایش تخلخل، از روش پیشنهادی ASTM [C1754] استفاده شد که با استفاده از رابطه (۲) درصد تخلخل نمونه‌ها محاسبه شد:

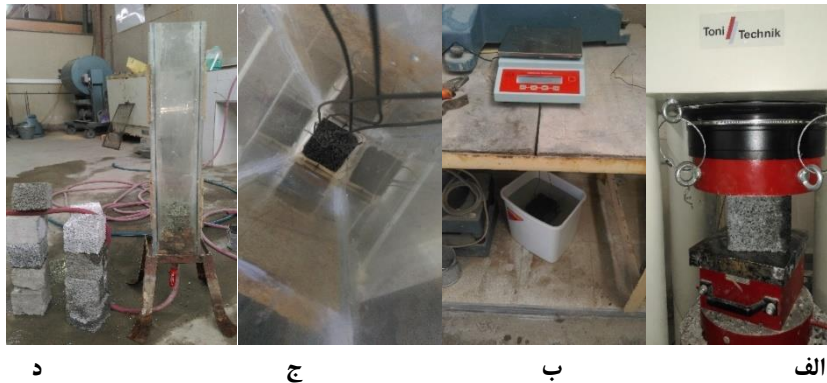
$$A_t = \left(1 - \frac{W_2 - W_1}{\rho_w \times V}\right) \times 100 \quad (2)$$

در این رابطه، A_t حجم حفرات بتن متخلخل بر حسب درصد، W_2 وزن نمونه بعد از خشک شدن در آون (گرم)، W_1 وزن غوطه‌وری نمونه که با استفاده از ترازوی ارشمیدس به دست می‌آید (گرم)، V حجم کل نمونه (سانتی متر مکعب) و ρ_w چگالی آب (گرم بر سانتی متر مکعب) است. شکل ۴ ترازوی ارشمیدس استفاده شده در آزمایش‌ها را نشان می‌دهد.

۲-۵- آزمایش مقاومت فشاری

طبق استاندارد [BS 1881]، برای آزمایش مقاومت فشاری بایستی از نمونه‌های مکعبی با ابعاد $150 \times 150 \times 150$ میلی‌متر استفاده شود. نمونه‌ها پس از اختلاط در قالب مورد نظر ریخته‌شده، در سه لایه با کوبه مخصوص کوبیده و پس از ۴۲ روز عمل‌آوری در آب، توسط جک مخصوص بارگذاری شده است. شکل ۴ نمایانگر دستگاه مقاومت فشاری استفاده شده می‌باشد.

طرح آزمایش‌ها به صورت بلوک کاملاً تصادفی انجام پذیرفته و کلیه تجزیه و تحلیل‌ها به کمک نرم‌افزار SAS9.4 انجام گرفته است. تمامی تحلیل نتایج برای سطح اطمینان ۹۵٪ انجام شده است.



شکل ۴- الف) دستگاه ضریب آبگیری، ب) نمونه قرار داده شده در دستگاه، ج) ترازوی ارشمیدس و د) دستگاه تست مقاومت فشاری

۳- نتایج و بحث

۳-۱- اثر افزودنی‌ها بر مقاومت فشاری

در جدول ۴، نتایج تجزیه واریانس مقاومت فشاری نمونه‌های بتن متخلخل حاوی افزودنی آورده شده است. در این جدول، مقدار F برای تیمار و بلوک در سطح ۱٪ معنی‌دار شده که نشان می‌دهد تفاوت معنی‌داری بین تیمارها وجود دارد.

جدول ۴- نتایج تجزیه واریانس مقاومت فشاری تیمارهای مختلف نمونه‌های بتن متخلخل

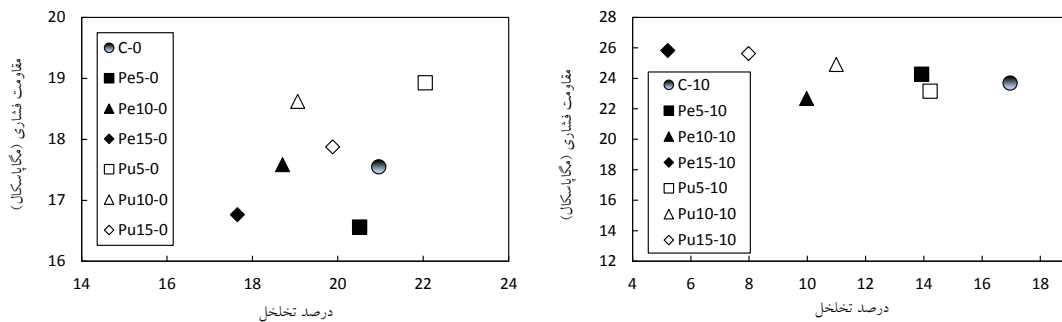
منبع تغییرات	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	مقدار F	P	ضریب تغییرات	R^2
تیمار	۱۳	۴۸۶/۸۶۹	۳۸/۳۷۴	۱۵/۱۵	<۰/۰۰۰۱		
بلوک	۲	۵/۴۰۷	۲/۷۰۳	۱/۰۷	۰/۳۵۸۴	۷/۵۷۷	۰/۸۸۴
خطا	۲۶	۶۵/۸۴۱	۲/۵۳۲	-	-		
کل	۴۱	۵۵۸/۱۱۷	-	-	-		

در شکل ۵، مقاومت فشاری بر حسب درصد تخلخل برای نمونه‌های بدون ریزدانه و حاوی ریزدانه برای افزودنی‌های پوکه معدنی و پرلیت آورده شده است.

بیشترین مقاومت فشاری در نمونه‌های بدون ریزدانه و حاوی ۱۰٪ ریزدانه به ترتیب مربوط به Pu5-0 و Pe15-10 می‌باشد که نسبت به نمونه مرجع ۷/۳۹ و ۸/۲۸ درصد افزایش دارند. دلیل بیشتر شدن Pe15-0 نسبت به Pu15-0 را می‌توان ناشی از تخلخل کمتر این نمونه دانست. به دلیل اضافه شدن ریزدانه به بتن متخلخل، خلل و فرج بتن کمتر شده و انتظار داریم که با افزودن افزودنی تغییرات معقولی را دنبال کنیم. در نمونه‌های حاوی ۱۰٪ وزنی فیلر مشاهده می‌شود که با افزایش درصد افزودنی، تخلخل نمونه‌ها کاهش و مقاومت فشاری افزایش پیدا کرده است. تنها در نمونه Pe10-10 شاهد کاهش مقاومت فشاری هستیم که دلیل آن را می‌توان خطای آزمایشگاهی دانست. نتایج نشان می‌دهد که پوکة معدنی به طور کلی از مقاومت فشاری و درصد تخلخل بیشتری نسبت به پرلیت برخوردار است. در شکل ۶ ساختمان داخلی بتن متخلخل و نحوه قرارگیری افزودنی‌های پرلیت و پوکة معدنی در بین خلل و فرج نمونه مکعبی نشان داده شده است.

همانگونه که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، برای تیمارهای بدون ریزدانه، مقاومت فشاری نمونه‌های دارای افزودنی پوکة معدنی با اینکه دارای تخلخل بیشتری نسبت به نمونه‌های دارای افزودنی پرلیت هستند، اما به دلیل داشتن وزن مخصوص بیشتر (۱/۰۲۱ گرم بر سانتی‌متر مکعب) دارای مقاومت فشاری بیشتری می‌باشند. این روند در نمونه‌های حاوی ۱۰٪ ریزدانه نیز مشاهده می‌شود. اما نمونه Pe5-10 نسبت به نمونه Pu5-10 دارای مقاومت فشاری بیشتری می‌باشد، ولی اختلاف چندانی با یکدیگر ندارند.

در نمونه‌های بدون ریزدانه مشاهده شد که افزودن پرلیت به نمونه‌ها با کاهش مقاومت فشاری نسبت به نمونه مرجع همراه بوده است. بیشترین کاهش مقاومت فشاری مربوط به نمونه P5-0 می‌باشد که نسبت به نمونه مرجع ۵/۶۴٪ کاهش داشت. دلیل این امر، وزن مخصوص کم افزودنی پرلیت (۰/۲۵۱ گرم بر سانتی‌متر مکعب) یا عدم پوشش مناسب خلل و فرج بتن می‌باشد. نمونه‌های پوکة معدنی به خوبی خلل و فرج بتن را پر کرده و دارای مقاومت فشاری بالاتری نسبت به نمونه مرجع می‌باشند.



شکل ۵- مقاومت فشاری برحسب درصد تخلخل برای نمونه‌های بدون ریزدانه (سمت راست) و مقاومت فشاری برحسب درصد تخلخل برای نمونه‌های حاوی ۱۰٪ وزنی ریزدانه (سمت چپ)



شکل ۶- مقطع بتن متخلخل به همراه افزودنی: پرلیت (سمت راست) و پوکة معدنی (سمت چپ)

۳-۲ اثر افزودنی‌ها بر ضریب نفوذپذیری و درصد تخلخل

در جداول ۵ و ۶، به ترتیب نتایج تجزیه واریانس ضریب نفوذپذیری و درصد تخلخل نمونه‌های بتن متخلخل حاوی افزودنی آورده شده است. در این جداول، مقدار F برای تیمار و بلوک در سطح ۱٪ معنی‌دار شده که نشان می‌دهد تفاوت معنی‌داری بین تیمارها وجود دارد.

جدول ۵- نتایج تجزیه واریانس ضریب نفوذپذیری تیمارهای مختلف نمونه‌های بتن متخلخل

منبع تغییرات	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	مقدار F	P	ضریب تغییرات	R ²
تیمار	۱۳	۰/۶۴	۰/۰۴۹	۱۴۱/۱۸	<۰/۰۰۰۱		
بلوک	۲	۰/۰۰۰۵۲	۰/۰۰۰۲۶	۰/۷۸	۰/۴۷۸۹	۱/۳۷۹	۰/۹۸۶
خطا	۲۶	۰/۰۰۹	۰/۰۰۰۳۴	-	-		
کل	۴۱	۰/۶۴۹	-	-	-		

جدول ۶- نتایج تجزیه واریانس درصد تخلخل تیمارهای مختلف نمونه‌های بتن متخلخل

منبع تغییرات	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	مقدار F	P	ضریب تغییرات	R ²
تیمار	۱۳	۱۰۹۲/۳۱۸	۸۴/۰۲۴	۴۷/۵۷	<۰/۰۰۰۱		
بلوک	۲	۱/۴۳۸	۰/۷۱۹	۰/۴۱	۰/۶۶۹۷	۸/۵۳۲	۰/۹۶
خطا	۲۶	۴۵/۹۲۱	۱/۷۶۶	-	-		
کل	۴۱	۱۱۳۹/۶۷۸	-	-	-		

در شکل ۷، ضریب نفوذپذیری بر حسب تخلخل، برای نمونه‌های بدون ریزدانه و حاوی ریزدانه برای افزودنی‌های پوکه معدنی و پرلیت، آورده شده است.

با توجه به شکل ۷ می‌توان گفت که با اضافه کردن افزودنی به بتن متخلخل، برای تمامی نمونه‌ها، ضریب نفوذپذیری و درصد تخلخل نسبت به نمونه مرجع کاهش یافته است. برای نمونه‌های بدون ریزدانه، روند خاصی در ضریب نفوذپذیری و درصد تخلخل نمونه‌ها مشاهده نشد. اما نمونه‌ها با یکدیگر از نظر ضریب نفوذپذیری اختلاف کمی دارند. به طوری که بیشترین اختلاف برای نمونه‌های دارای افزودنی پوکه معدنی و پرلیت به ترتیب ۴/۶۷ و ۵/۶۷ درصد می‌باشد.

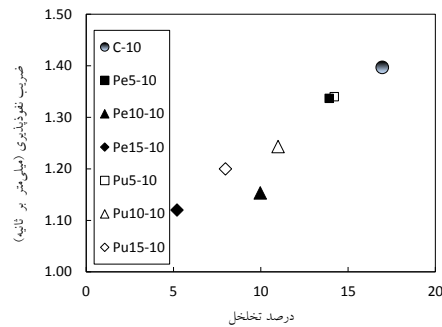
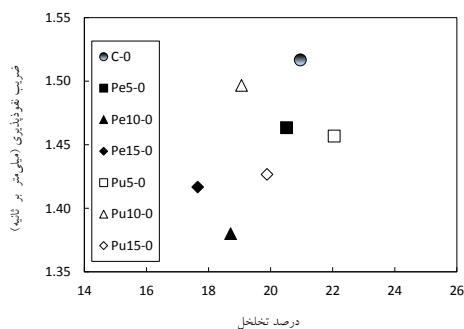
بیشترین ضریب نفوذپذیری در نمونه‌های بدون ریزدانه و دارای ریزدانه به ترتیب مربوط به (۱/۴۹۷ میلی‌متر بر ثانیه) و (Pu5-0) و (۱/۳۴ میلی‌متر بر ثانیه) می‌باشد. کمترین ضریب نفوذپذیری در نمونه‌های بدون ریزدانه و دارای ریزدانه به ترتیب مربوط به (۱/۳۸ میلی‌متر بر ثانیه) و (Pe15-10) (۱/۱۲ میلی‌متر بر ثانیه) می‌باشد. در نمونه‌های دارای ریزدانه مشاهده می‌شود که با افزایش درصد افزودنی، ضریب نفوذپذیری کاهش می‌یابد.

در شکل ۷ مشاهده می‌شود که برای هر دو نمونه با و بدون ریزدانه، ضریب نفوذپذیری و درصد تخلخل نمونه‌های دارای افزودنی پوکه معدنی نسبت به نمونه‌های دارای افزودنی پرلیت بیشتر است که این امر به دلیل تخلخل بالای پوکه معدنی در ساختمان داخلی اش می‌باشد. درصد تخلخل در نمونه‌های بدون ریزدانه در بازه ۱۵ تا ۲۵ درصد و برای نمونه‌های حاوی ۱۰٪ ریزدانه در حدود ۱۱/۵ درصد می‌باشد.

در شکل ۷، ضریب نفوذپذیری بر حسب تخلخل، برای نمونه‌های بدون ریزدانه و حاوی ریزدانه برای افزودنی‌های پوکه معدنی و پرلیت، آورده شده است.

با توجه به شکل ۷ می‌توان گفت که با اضافه کردن افزودنی به بتن متخلخل، برای تمامی نمونه‌ها، ضریب نفوذپذیری و درصد تخلخل نسبت به نمونه مرجع کاهش یافته است. برای نمونه‌های بدون ریزدانه، روند خاصی در ضریب نفوذپذیری و درصد تخلخل نمونه‌ها مشاهده نشد. اما نمونه‌ها با یکدیگر از نظر ضریب نفوذپذیری اختلاف کمی دارند. به طوری که بیشترین اختلاف برای نمونه‌های دارای افزودنی پوکه معدنی و پرلیت به ترتیب ۴/۶۷ و ۵/۶۷ درصد می‌باشد.

بیشترین ضریب نفوذپذیری در نمونه‌های بدون ریزدانه و دارای ریزدانه به ترتیب مربوط به (۱/۴۹۷ میلی‌متر بر ثانیه) و (Pu5-0)



شکل ۷- سمت راست: ضریب نفوذپذیری بر حسب درصد تخلخل برای نمونه‌های بدون ریزدانه. سمت چپ: ضریب نفوذپذیری بر حسب درصد تخلخل برای نمونه‌های حاوی ۱۰٪ وزنی ریزدانه

در خصوص پارامتر ضریب نفوذپذیری مشاهده می‌شود که درصد افزودنی در نمونه‌های بدون ریزدانه و حاوی ریزدانه در تغییرات ضریب نفوذپذیری مؤثر بوده است. همچنین برای نمونه‌های حاوی ۱۰٪ ریزدانه ملاحظه می‌شود که علاوه بر درصد افزودنی، نوع افزودنی به کار برده شده نیز در تغییرات ضریب نفوذپذیری مؤثر می‌باشد. این تفاوت به خوبی نقش پرکنندگی افزودنی ریزدانه را بیان می‌کند.

به دلیل وابسته بودن بیشتر تخلخل با ضریب نفوذپذیری نسبت به مقاومت فشاری، ملاحظه می‌شود که تغییرات درصد تخلخل و معنی‌داری بین نمونه‌ها با درصد و نوع افزودنی، بسیار شبیه به ضریب نفوذپذیری است. برای نمونه‌های حاوی ۱۰٪ وزنی ریزدانه مشاهده می‌شود که در درصد افزودنی یکسان نمونه‌ها، درصد تخلخل نزدیکتری با یکدیگر دارند، نسبت به نمونه با افزودنی یکسان و درصد افزودنی مختلف.

در جدول ۷، نتایج میانگین تست‌های مقاومت فشاری، ضریب نفوذپذیری و درصد تخلخل آورده شده است. با توجه به این جدول مشاهده می‌شود که بین نمونه‌های بدون ریزدانه و حاوی ۱۰٪ وزنی ریزدانه در تمامی خواص فیزیکی اختلاف معنی‌داری وجود دارد. در خصوص پارامتر مقاومت فشاری ملاحظه می‌شود که تفاوت معنی‌داری بین نمونه‌های بدون ریزدانه وجود ندارد و این نشان می‌دهد که میزان درصد افزودنی و نوع افزودنی اضافه شده به بتن متخلخل تأثیر چندانی بر مقاومت فشاری نداشته است. اما در نمونه‌های حاوی ۱۰٪ وزنی ریزدانه ملاحظه می‌شود که افزودنی پرلیت دارای تفاوت معنی‌داری با افزودنی پوکه معدنی می‌باشد و همچنین درصدهای مختلف افزودنی در مقاومت فشاری نمونه‌ها تأثیر گذار است.

جدول ۷- مقایسه میانگین خواص فیزیکی در تیمارهای مختلف

تیمار	میانگین مقاومت فشاری (مگاپاسکال)	میانگین ضریب نفوذپذیری (میلی متر بر ثانیه)	میانگین درصد تخلخل
C-0	۱۷/۵۴۷ ^c	۱/۵۱۶ ^a	۲۰/۹۵۷ ^{ab}
Pu5-0	۱۸/۹۲۷ ^c	۱/۴۵۶ ^{bc}	۲۲/۰۴۷ ^a
Pu10-0	۱۸/۶۲۳ ^c	۱/۵ ^a	۱۹/۰۶ ^{bed}
Pu15-0	۱۷/۸۷۷ ^c	۱/۴۲۶ ^{cd}	۱۹/۸۸ ^{abc}
Pe5-0	۱۶/۵۶ ^c	۱/۴۶۳ ^b	۲۰/۵۱۳ ^{abc}
Pe10-0	۱۷/۵۸۳ ^c	۱/۳۸ ^e	۱۸/۷۰۷ ^{cd}
Pe15-0	۱۶/۷۶۳ ^c	۱/۴۱۶ ^d	۱۷/۶۴۷ ^d
C-10	۲۳/۶۸۳ ^{ab}	۱/۳۹۶ ^{de}	۱۶/۹۶۳ ^d
Pu5-10	۲۳/۱۵۷ ^{ab}	۱/۳۴ ^f	۱۴/۲۱۳ ^e
Pu10-10	۲۴/۹۱ ^{ab}	۱/۲۴۳ ^g	۱۰/۹۹ ^f
Pu15-10	۲۵/۶۲۷ ^a	۱/۲ ^h	۷/۹۸ ^g
Pe5-10	۲۴/۲۷ ^{ab}	۱/۳۳۶ ^f	۱۳/۹۲۳ ^e
Pe10-10	۲۲/۶۸ ^b	۱/۱۵۳ ⁱ	۹/۹۷۳ ^{fg}
Pe15-10	۲۵/۸۲۳ ^a	۱/۱۲۱ ^j	۵/۲۰۷ ^h

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش، از سبک‌دانه‌های پوکه معدنی و پرلیت که دارای صرفه اقتصادی هستند و توانایی جذب آلاینده‌ها را دارند در بتن متخلخل، به منظور کاربرد در سیستم معابر شهری، پیاده‌روها، پارکینگ‌ها، کاهش و به تأخیر انداختن جریان رواناب شهری بهره گرفته شد. اهم نتایج به دست آمده عبارت‌اند از:

- استفاده از بتن متخلخل می‌تواند به عنوان گامی نو در کاهش حجم رواناب شهری و تغذیه سفره‌های آب زیرزمینی مطرح شود.
- با توجه به خواص فیزیکی به دست آمده برای نمونه‌های بتنی متخلخل می‌توان بسته به نوع کاربرد از بتن متخلخل بدون ریزدانه و حاوی ریزدانه بهره جست.

- افزودنی پوکه معدنی از نظر خواص فیزیکی نسبت به افزودنی پرلیت عملکرد بهتری داشت و می‌توان از آن در معابر شهری و پارکینگ‌ها استفاده کرد.

- در نمونه‌های بدون ریزدانه مشاهده شد که افزودن پرلیت به نمونه‌ها با کاهش مقاومت فشاری نسبت به نمونه مرجع همراه بوده است و بیشترین کاهش مقاومت فشاری مربوط به نمونه P5-0 می‌باشد که نسبت به نمونه مرجع ۵/۶۴٪ کاهش داشت. دلیل این امر وزن مخصوص کم افزودنی پرلیت (۰/۲۵۱ گرم بر سانتی‌متر مکعب) یا عدم پوشش مناسب خلل و فرج بتن می‌باشد.

- بیشترین مقاومت فشاری در نمونه‌های بدون ریزدانه و حاوی ۱۰٪ ریزدانه به ترتیب در Pu5-0 و Pe15-0 بود که نسبت به نمونه مرجع ۷/۲۹ و ۸/۲۸ درصد افزایش مقاومت فشاری داشتند. دلیل بیشتر شدن Pe15-0 نسبت به Pu15-0 را می‌توان ناشی از تخلخل کمتر این نمونه دانست.

- در نمونه‌های حاوی ۱۰٪ وزنی فیلر مشاهده می‌شود که با افزایش درصد افزودنی، تخلخل نمونه‌ها کاهش و مقاومت فشاری افزایش پیدا کرده است. تنها در نمونه Pe10-10 شاهد کاهش مقاومت فشاری هستیم که دلیل آن را می‌توان خطای آزمایشگاهی دانست.

- با اضافه کردن افزودنی به بتن متخلخل، برای تمامی نمونه‌ها، ضریب نفوذپذیری نسبت به نمونه مرجع کاهش یافت.

- بیشترین ضریب نفوذپذیری در نمونه‌های بدون ریزدانه و دارای ریزدانه به ترتیب مربوط به Pu10-0 (۱/۴۹۷ میلی‌متر بر ثانیه) و Pu5-10 (۱/۳۴ میلی‌متر بر ثانیه) می‌باشد.

- کمترین ضریب نفوذپذیری در نمونه‌های بدون ریزدانه و دارای ریزدانه به ترتیب مربوط به Pe10-0 (۱/۳۸ میلی‌متر بر ثانیه) و Pe15-10 (۱/۱۲ میلی‌متر بر ثانیه) می‌باشد.

- از لحاظ آماری نیز تفاوت معنی‌داری در خصوص پارامترهای فیزیکی بین نمونه‌های بدون ریزدانه و نمونه‌های حاوی ریزدانه مشاهده شد. در این بین،

مقدار ضریب نفوذپذیری و درصد تخلخل وابستگی بیشتری به نوع و درصد افزودنی از خود نشان دادند.

۵- مراجع

[۱]. چالکش امیری، م. ۱۳۸۷. اصول تصفیه آب و پساب‌های صنعتی. فصل اول، چاپ سوم، انتشارات دانشگاه پیام نور.

[۲]. پروین نیا، م. ۱۳۸۷. تصفیه‌پذیری و احیای سیلاب‌های شهری با استفاده از لایه‌های نفوذپذیر فعال. پایان‌نامه دکتری مهندسی عمران، بخش آب و محیط زیست، دانشگاه شیراز.

[3]. ACI Committee 522. "Pervious Concrete", ACI 522R-06 Report, 2006.

[4]. Ferguson, Bruce K. "Porous Pavement". Taylor and Francis Group, 2005.

[5]. Tennis, Paul. "Pervious Concrete Pavement", Portland Cement Assoc, 2004.

[6]. Harrisburg, P. A. "The Pennsylvania Handbook of Best Management Practice for Developing Areas, Pennsylvania of Conservation Districts". Pennsylvania Department of Environmental Protection, 1998.

[7]. Tennis, Paul D., M. L. Leming and D. J. Akers. "Pervious Concrete Pavements", Portland Cement Association, ISBN 0-89312-242-4, 2004.

[۸]. معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رییس جمهور. ۱۳۸۹. ضوابط زیست محیطی استفاده مجدد از آب‌های برگشتی و پساب‌ها. نشریه ۵۳۵.

[۹]. یزدانبخش، ا.، اسلامی، ا. و رضایی، س. بررسی کیفیت روان آب سطحی کانال فیروزآباد شهر تهران برای مصارف آبیاری. ۱۳۹۴. دومین همایش ملی راهکارهای پیش‌روی بحران آب در ایران و خاورمیانه، شیراز.

[۱۰]. جوانی، ح. ۱۳۹۲. بررسی میزان کاهش آلاینده‌های موجود در فاضلاب تصفیه شده در سامانه تغذیه مصنوعی. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، مهندسی آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران.

[11]. Rostamian, R., Heidarpour, M., Mousavi, S. F. and Afyuni, M. "Preparation, characterization and sodium sorption capability of rice husk carbonaceous adsorbents". Fresenius Environ. Bull, Vol. 24, No. 5, 2015, pp. 1649-1658.

[۱۲]. عابدی کوپایی، ج. و موسوی، س. ف. ۱۳۸۲. جذب سرب از پساب صنعتی توسط خاکستر پوسته شلتوک، آب و فاضلاب، شماره ۴۸، ص ۱۷-۲۳.

[۱۳]. مستأجران، ا.، یحیی آبادی، س. و امتیازی، گ. ۱۳۸۵. کاهش آلودگی پساب صنعتی توسط جلبک سبز و جلبک‌های سبز-آبی. آب و فاضلاب، شماره ۵۷، ص ۳۷-۴۷.

[14]. Demirbas, A. "Heavy metal removal adsorption into agro-based materials". J. Hazard. Mater, Vol. 157, 2008, pp. 220-229.

- [15]. Strain, V. and Pant, K. K. "Removal of chromium from industrial waste by using eucalyptus bark". *Bioresour. Technol*, Vol. 97, 2005, pp. 15-20.
- [۱۶]. حسامی، س. و احمدی، س. ارزیابی روسازی بتنی متخلخل سازگار با محیط‌زیست با استفاده از خاکستر پوسته برنج. ۱۳۹۴. مهندسی زیرساخت‌های حمل و نقل، سال اول، شماره دوم، ص ۶۳-۷۶.
- [۱۷]. شیرگیر، ب.، حسنی، ا. و علیزاده گودرزی، ه. تأثیر نوع دانه‌بندی بر خواص فیزیکی و نفوذپذیری بتن متخلخل در روسازی. ۱۳۹۰. مجله علمی- پژوهشی عمران مدرس، جلد ۱۱، شماره ۱، ص ۴۹-۶۰.
- [۱۸]. بهمنی، م.، راه نوردکیسمی، ز.، علیا، م.ا. و کاسه‌گری، ح. ۱۳۹۲. بررسی میزان حذف سورفاکتانت آنیونی LABS با افزودنی‌های معدنیپرلیت و کربن فعال. نشریه پژوهش‌های کاربردی در شیمی، سال هفتم، شماره ۲، ص ۶۷-۷۳.
- [19]. Ardali, Y., Turan, N. G. and Temel, F. A., "Cu (II) removal from industrial waste leachate by adsorption using expanded perlite", *J. Inst. Nat. Appl. Sci.*, Vol. 19, 2014, No (1-2), pp. 54-61.
- [20]. Subrahmanyam, M., Boule, P., Kumari, V. D., Kumar, D. N., Sancelme, M. and Rachel, A. "Pumice stone supported titanium dioxide for removal of pathogen in drinking water and recalcitrant in wastewater". *Solar Energy*, Vol. 82, 2008, pp. 1099-1106.
- [21]. Roghee Satah, J. O. "Evaluation of Lightweight Concrete Mixtures for Bridge Deck and Prestressed Bridge Girder Applications", Thesis for The Degree Master of Science, Department of Civil Engineering, Kansas State University, 2006.
- [22]. STM-C332, "Standard Specification for Lightweight Aggregate for Insulating Concrete", American Society of Testing Material, 1999.
- [23]. ACI Committee 211.. "Guide for Selecting Proportions for No-slump Concrete". ACI 211.3R Report, 2006.
- [24]. ASTM C1754/C1754M-12. "Standard Test Method for Density and Void Content of Hardened Pervious Concrete". ASTM

Performance of Porous Concrete Containing Additive in Reduction of Urban Runoff

E. Teymouri*

MSc. Student, Faculty of Civil Engineering, Semnan University

S.F.Mousavi

Professor, Faculty of Civil Engineering, Semnan University

H. Karami

Assistant Professor, Faculty of Civil Engineering, Semnan University

S.Farzin, S

Assistant Professor, Faculty of Civil Engineering, Semnan University

*E-mail: Teymuri.e91@gmail.com

Abstract

One of the cases of human intervention in environment is vast variations in making parts of the land surface impervious, followed by changes in the hydrologic cycle. Porous concrete is an especial type of highly pervious concrete, compatible with the environment, and could be used a method to increase surface infiltrate and reduce urban runoff. In the present experimental research, to improve the performance of this type of concrete, effect of adding lightweight pumice and perlite (0.6-1.2 mm), and adding 10% fine grains to the samples, was investigated. In this respect, the effective parameters for using porous concrete in urban runoff system, such as compression strength, hydraulic conductivity and porosity of the samples were measured. Analysis of experimental results was performed by using SAS 9.4 software at 95% confidence level. Results showed that adding fine grains to porous concrete increases compression strength and reduces hydraulic conductivity and porosity. Addition of lightweight pumice increases compression strength and reduces hydraulic conductivity and porosity of porous concrete. But, lightweight perlite reduced all three parameters of hydraulic conductivity, porosity and compression strength. In general, lightweight pumice, which has higher density and more pore space in its structure with respect to perlite, had better performance.

Keywords: Porous concrete, Pumice, Perlite, Urban runoff system.