

بررسی آزمایشگاهی اثر اضافه کردن افزودنی‌های مختلف بر ویژگی‌های بتن متخلخل قابل کاربرد در سیستم رواناب 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
محسن جواهری طهرانی، دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

E-mail: fmousavi@profs.semnan.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۴/۱۲/۲۸ - پذیرش: ۱۳۹۵/۰۴/۱۹

چکیده

در دهه اخیر، کاربرد بتن متخلخل برای پوشش کف پیاده‌روها و روسازی جاده‌ها به عنوان رابطی برای جمع‌آوری رواناب‌های شهری مورد توجه قرار گرفته است. بتن متخلخل از نظر قابلیت نفوذپذیری و قدرت انتقال آب حائز اهمیت می‌باشد. در این پژوهش، در طرح اختلاط اولیه بتن متخلخل معمولی، مقدار سنگدانه و سیمان به ترتیب ۱۴۰۰ و ۳۳۰ کیلوگرم بر متر مکعب و نسبت آب به سیمان بین ۰/۳۵ تا ۰/۴۵ بود. در طرح اختلاط بتن متخلخل با افزودنی، افزودنی‌هایی که استفاده شدند عبارت بودند از: زئولیت، پرلیت، پوکه معدنی و پوکه صنعتی (لیکا)، به همراه سیمان تیپ ۲ و تیپ ۵. ویژگی‌های مقاومت فشاری و ضریب نفوذپذیری (هدایت هیدرولیکی) مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که اضافه شدن افزودنی‌ها، مقاومت بتن متخلخل را کاهش می‌دهد. به طوری که این کاهش مقاومت برای افزودنی‌های زئولیت، پرلیت، پوکه معدنی و پوکه صنعتی بین بیشترین و کمترین درصد افزودنی به ترتیب برابر ۱۳، ۴۸/۴، ۱۰/۱ و ۱۲/۶ درصد می‌باشد. ضریب نفوذپذیری در اکثر تیمارهای افزودنی، بجز پرلیت، نسبت به شاهد افزایش یافت. بیشترین افزایش ضریب نفوذپذیری (۷/۳ درصد) در تیمار افزودنی حاوی ۵٪ پوکه معدنی و بیشترین کاهش ضریب نفوذپذیری (۳/۷ درصد) در تیمار افزودنی ۱۰٪ پرلیت بوده است. در مجموع، در بین افزودنی‌های استفاده شده، تیمار با ۱۰٪ حجمی پرلیت، بیشترین میانگین مقاومت (۱۱/۹۵ مگاپاسکال) و تیمار با ۱۰٪ حجمی پوکه صنعتی، کمترین میانگین مقاومت (۳/۲ مگاپاسکال) را دارا می‌باشد، که نشان می‌دهد اضافه کردن پوکه صنعتی نسبت به سایر افزودنی‌ها با کاهش مقاومت بیشتری همراه بوده است. افزودنی پرلیت در رده‌ی بعدی قرار می‌گیرد.

واژه‌های کلیدی: نفوذپذیری بتن متخلخل، مقاومت فشاری، هدایت هیدرولیکی، پرلیت، پومیس

۱. مقدمه

با توجه به حساسیت روز افزون مسائل کیفی آب و مشکلات ناشی از آن، نقش حفاظت و کنترل کیفیت منابع آب از اهمیت به‌سزایی برخوردار است. امروزه، پالایش آلودگی از راه‌های طبیعی بسیار مورد توجه و علاقه است. در یکی دو دهه اخیر، استفاده از فناوری بتن متخلخل برای کنترل سیلاب‌ها و همچنین رواناب‌های آلوده به آلاینده‌های صنعتی در فضا سازی شهری مورد توجه و استقبال مسئولین قرار گرفته است.

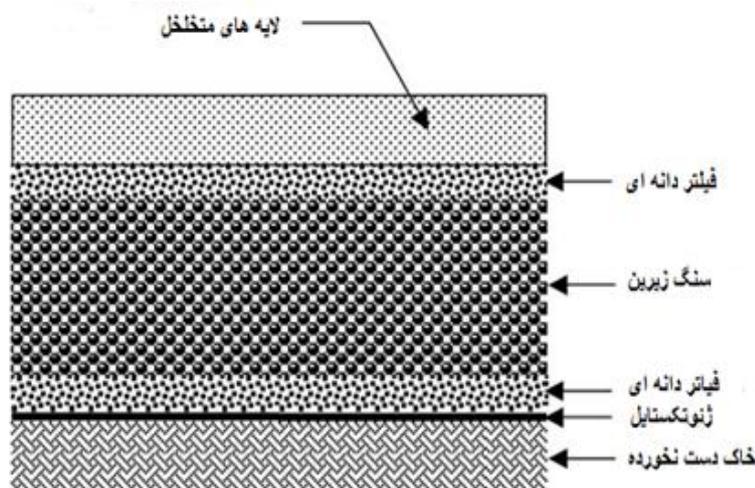
بتن متخلخل، به فراخور موقعیت مورد استفاده و صلاحیت مهندسی مربوطه، با ترکیب‌های متنوع و تخلخل‌های مختلف، جهت افزایش نفوذپذیری سطح معابر، پیاده‌روها و پارکینگ‌ها، برای کاهش هرزآب‌های بارندگی کاربرد یافته است (ترکیان و احمدی، ۱۳۸۵).

مزایای بتن متخلخل در روسازی راه شامل موارد زیر است: ۱- سازگار با محیط زیست، ۲- کاهش آلودگی صوتی (جذب انرژی صوتی)، ۳- بهبود شرایط ایمنی (ضریب اصطکاک) و ممانعت از پدیده آب سطحی (هیدروپلانینگ)، ۴- کاهش شیب حرارتی، ۵-

کاهش خطر تورم در اثر یخبندان و ۶- جلوگیری از رواناب سطحی (فرگوسن، ۲۰۰۵).

چهار دلیل اصلی برای توجیه مقاومت کم بتن متخلخل وجود دارد که عبارتند از: ۱- کاهش تعداد نقاط اتصالی بین سنگدانه‌ها به دلیل نبود ریزدانه، ۲- ضعف در مقاومت پیوندی بین خمیر چسباننده و سنگدانه، ۳- سطح چسبندگی کم به دلیل نبود ریزدانه یا ریزدانه کم و ۴- وجود حفرات زیاد. 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 (تنیس و همکاران، ۲۰۰۴).

مزایای استفاده از سنگفرش بتنی متخلخل عبارتند از: تصفیه آب از طریق زدودن آلاینده‌ها، نیاز کمتر به مهار رواناب باران و صرف هزینه کمتر، بهبود دائمی جاده جهت مقاومت لغزشی بهتر و تغذیه آبخوان‌های محلی. لایه‌بندی یک سیستم بتن متخلخل در شکل ۱ نشان داده شده است. شکل ۲ نیز تصاویری از نمونه‌های به کار برده شده بتن متخلخل در سطح شهر می‌باشند (سقائیان نژاد، ۱۳۹۱).



شکل ۱. بخش‌های مختلف یک سیستم بتن متخلخل^۱ (سقائیان نژاد، ۱۳۹۱)

^۱ Porous concrete



شکل ۲. نمونه‌هایی از کاربرد بتن متخلخل در پارکینگ و پیاده‌رو (سقائیان نژاد، ۱۳۹۱)

طبق گزارش‌های محققین (رستمیان و همکاران، ۲۰۱۵؛ عابدی کوپایی و موسوی، ۱۳۸۲؛ مستأجران و همکاران، ۱۳۸۵؛ دمیرباس، ۲۰۰۸؛ استرین و پنت، ۲۰۰۵)، انواع مختلفی از افزودنی‌ها، خاک‌پوش‌ها^۲ (مالچ‌ها) و جاذب‌ها مانند: کربن فعال، خاک اره درخت افرا، خاکه پوست درخت اکالیپتوس، تفاله نیشکر و خاکستر وجود دارند که برای پاک سازی 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.

پرلیت نوعی سنگ آتشفشانی با ترکیب اسیدی تا حد متوسط است که در محیط آب و یا مرطوب تشکیل می‌شود. میزان آب همراه با پرلیت در حدود ۲ تا ۵ درصد است. صفحات پرلیتی را می‌توان به کمک پرلیت و یک ماده چسبنانده نظیر گچ تهیه نمود. این صفحات وزن کمی دارند و به عنوان عایق‌های خوب حرارتی و صوتی به کار می‌روند (شرکت پرلیت تابنده طوس، ۱۳۸۹).

محققین و بهره‌برداران با استفاده از این بتن‌های متخلخل، پی به امکان پالایش فیزیکی رواناب‌ها نیز برده‌اند. از جمله پارامترهای فیزیکی، می‌توان به کدورت رواناب اشاره کرد که به طور مؤثری قابل کنترل با بتن متخلخل می‌باشد (جوانی، ۱۳۹۲). البته در صورت استفاده از افزودنی‌ها^۱ در ساخت بتن متخلخل، بحث‌هایی نیز در رابطه با کاهش غلظت فلزات سنگین به میان آمده است (زارع، ۱۳۸۳؛ سقائیان نژاد، ۱۳۹۱). فناوری بتن متخلخل به طور گسترده در کشورهای با بارندگی زیاد مورد توجه و استفاده قرار گرفته است.

در کشور ایران هم با توجه به اقلیم خشک تا نیمه‌خشک آن، که دارای بارندگی کم اما با شدت زیاد می‌باشد و موجب به وجود آمدن حجم زیادی از رواناب در مدت بسیار کوتاه می‌گردد، استفاده از این فناوری می‌تواند در دستور کار مدیران شهری قرار گیرد. البته نگهداری از این نوع تأسیسات نیاز به مدیریت کامل و جامعی دارد. مهمترین مزیت بتن متخلخل توانایی عبور آب از آن است که باعث برگشت آب به منابع زیرزمینی و همچنین جلوگیری از جاری شدن رواناب روی سطح معابر می‌گردد (هریسبرگ، ۱۹۹۸؛ تنیس و همکاران، ۲۰۰۴).

²- Mulches

¹- Additives

توجه به سختی ۵/۵ - ۵ در اشل موس نسبتاً زیاد است و به آسانی در بین انگشتان یا با فشار خرد نمی‌شود. ظرفیت تبادل یونی (CEC)^۱ از مهمترین ویژگی‌های ارزشمند ژئولیت است که باید این مقدار حدود ۵۴/۲ میلی اکوی والان بر گرم باشد (پاشا و همکاران، ۲۰۰۷).

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 پلی-فیلین سولفاید (PPS) به منظور بهبود خصوصیات مکانیکی بتن متخلخل استفاده کردند. 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 بر خصوصیات مکانیکی بتن متخلخل داشته است.

دیرکز و همکاران (۲۰۰۶)، کارایی ۹ فیلتر مختلف را در تصفیه یک سیلاب مصنوعی با یکدیگر مقایسه کردند. در این فیلترها، از ماسه‌های با دانه‌بندی مختلف، و همچنین اکسید و هیدروکسید آهن استفاده شده بود. همه فیلترها ابتدا برای فشارهای هیدرولیکی متفاوت مورد آزمایش قرار گرفتند و سرعت جریان در هر فیلتر نسبت به افزایش فشار هیدرولیکی آن با همدیگر مقایسه شد. سپس کارایی فیلترها در حذف آلودگی‌های مختلف نسبت به زمان و در یک دوره ۸ ماهه مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت. هت و همکاران (۲۰۰۶)، اثر گرفتگی حفرات فیلتر بر کارایی حذف آلودگی را در محیط فیلترهای زیستی مرسوم سیلاب بررسی کردند. این آزمایش روی رواناب مصنوعی شهر ملبورن استرالیا انجام شده است. در این تحقیق، مشاهده شد که هر دو نمونه فیلترهای شنی و چندلایه‌ای کارایی زیادی در حذف مواد معلق و ذرات همراه با آلودگی دارند. نتایج این تحقیق نشان داد که

پوکه معدنی دانه‌های سبک حاصل از فعالیت‌های آتشفشانی است. مزیت عمده پوکه معدنی نسبت به مصالح ساختمانی مشابه از قبیل شن و ماسه، وزن مخصوص بسیار کم، دارا بودن درجه سختی و تخلخل زیاد می‌باشد. رنگ این ماده معدنی سفید یا خاکستری مایل به سفید یا زرد است. پوکه معدنی دارای دانه‌بندی-های متفاوت از ذرات غباری تا قطعات بزرگ با قطر بیش از ۱۰۰ میلی‌متر است. سابقه مصرف پوکه معدنی به مهندسين رومی برمی‌گردد. در گذشته، از این ماده معدنی در ساختمان‌های باستانی استفاده می‌کردند. در حال حاضر، علاوه بر مصرف داخل ایران، به کشورهای حاشیه خلیج فارس نیز صادر می‌گردد. نکته قابل توجه اینکه بتن ساخته شده از پوکه معدنی علاوه بر سبکی، در مقابل عوامل مختلف محیطی نیز دارای استحکام و مقاومت فوق العاده‌ای می‌باشد.

کانی ژئولیت در طبیعت ممکن است دارای منشأ ماگمایی به همراه سنگ‌های آذرین بوده و یا به صورت کانی ثانویه در اثر فرایند دگرسانی تشکیل گردد. به طور کلی، تنوع ژئولیت موجود در سنگ‌های رسوبی بیش از انواع ژئولیت شناخته شده در سنگ‌های آذرین با منشأ ماگمایی است و بعلاوه مقدار سیلیسیم نیز در ژئولیت‌های موجود در سنگ‌های رسوبی افزون‌تر بوده و دارای ترکیب قلیایی می‌باشد. ناخالصی‌های همراه ژئولیت (کلینوپتیلولیت) در ایران غالباً شامل گچ ($CaSO_4$)، آهک ($CaCO_3$)، خاک رس (کائولن، مونت-موریلونیت یا بتونیت)، موردنیت، سولفات سدیم، نمک، فلدسپار و همچنین سیلیس آزاد به صورت کوارتز یا کریستوبالیت است که باید مورد توجه قرار گیرند. ژئولیت به رنگ سفید، زرد و سبز می‌باشد. بهترین انواع آن در شرق سمنان پراکنده‌اند. از آنجایی - که ژئولیت به شدت آب را جذب می‌کند لذا دانه‌های آن به رطوبت حساسند. ژئولیت سبک و سطح آن صاف و بدون خاکه است. مقاومت مکانیکی ژئولیت با

1- Cation exchange capacity

آن‌ها نسبت به فیلترهای شنی افقی آسان‌تر خواهد بود. چوی و همکاران (۲۰۱۰)، در تحقیقی نشان دادند که در صورت استفاده از بتن متخلخل به عنوان بیوفیلتر، BOD موجود در جریان خروجی به طور میانگین از ۱۰/۴ در جریان ورودی به ۲/۷ میلی‌گرم بر لیتر رسید. به این ترتیب، بازده حذف BOD به طور متوسط ۷۴٪ بود. آزمایش BOD به میزان وسیع جهت تعیین قدرت آلودگی فاضلاب‌های خانگی و صنعتی برحسب اکسیژن مورد نیاز آن‌ها در صورت تخلیه به بسترهای آبی طبیعی که در آن‌ها شرایط هوایی حاکم است به کار می‌رود. کل میزان نیتروژن در جریان ورودی فاضلاب به طور میانگین ۹/۰۵ میلی‌گرم بر لیتر بود. در حالی که این میزان در جریان خروجی به ۴/۷۱ رسید؛ در نتیجه، درصد حذف نیتروژن کل، ۴۷٪ بود. کل فسفر موجود در جریان ورودی ۱/۵ میلی‌گرم بر لیتر بود که در خروجی میزان آن به ۰/۵۹ میلی‌گرم بر لیتر رسید؛ به این ترتیب، ۶۰٪ حذف فسفر کل داشته است. در صورت استفاده از حالت دسته‌ای، میزان حذف BOD، کل نیتروژن و کل فسفر به ترتیب برابر ۹، ۶۹ و ۲۷ درصد است و در روش رآکتور ترکیبی میزان حذف موارد ذکر شده برابر ۷۴، ۴۷ و ۶۰ درصد است. با توجه به این ارقام، استفاده از بتن متخلخل می‌تواند بسیار مفید باشد.

با توجه به کارهای انجام شده در گذشته توسط محققین، استفاده از افزودنی‌های مختلف می‌تواند در افزایش کارایی بتن متخلخل در سیستم‌های رواناب شهری مورد توجه قرار گیرد. افزودنی‌ها و جاذب‌های معدنی با توجه به فراوانی و صرفه اقتصادی که دارند بسیار مورد توجه هستند. از این رو، در این پژوهش، به بررسی اثر بتن متخلخل حاوی افزودنی‌های زئولیت، پرلیت، پوکه معدنی و پوکه صنعتی (لیکا) بر پارامترهای

برای افزایش طول عمر مفید فیلترهای حذف آلودگی سیلاب (عملکرد مناسب تصفیه و ظرفیت هیدرولیکی فیلتر) باید تا حد امکان از گرفتگی حفرات فیلتر جلوگیری کرد. کوزلیسکی (۱۹۹۲)، پژوهشی تحت عنوان بسترهای نفوذپذیر و کمک به حل مشکل زهکشی پیاده‌روها را انجام داده است. ماینینجر (۱۹۹۸)، مقاله‌ای تحت عنوان بتن نفوذپذیر بدون ریزدانه برای سنگفرش منتشر کرده است.

پالیولیس (۲۰۱۶)، از زئولیت طبیعی و اصلاح شده برای جذب فرمالدئید موجود در فاضلاب استفاده کرد. تأثیر زمان در جذب فرمالدئید برای زمان‌های مختلف مورد آزمایش قرار گرفت و اثر مثبت زئولیت اصلاح شده در بازه ۵/۴ تا ۲۴ درصد با میانگین ۹/۲ درصد برای حذف فرمالدئید به دست آمد.

آردالی و همکاران (۲۰۱۴)، در پژوهشی، از پرلیت منبسط شده برای حذف مس از شیرابه زباله‌های صنعتی استفاده کردند و به خوبی توانایی پرلیت در حذف مس مشخص گردید.

تقی‌زاده و همکاران (۲۰۰۷)، نشان دادند که می‌توان از بتن متخلخل به عنوان فیلتر تصفیه آب استفاده کرد. همچنین گزارش کردند که تصفیه کند افقی با بتن متخلخل به دلیل رشد توده‌های بیولوژیک برای از بین بردن باکتری‌ها مناسب است. به طوری که استفاده از بتن متخلخل باعث کاهش ۹۰-۱۰۰ درصدی باکتری‌های کلیفرم شد. سطح مورد نیاز برای دو فیلتر با سطح عمودی ۲/۶ متر مربع ۷۰٪ کمتر از فضای مورد نیاز مربوط به فیلترهای کند است. افزایش سرعت تصفیه باعث کاهش زمان بهره‌برداری می‌شود. ضخامت متوسط این فیلتر ۹ سانتی‌متر و نوع مصالح مصرفی آن ۹۰٪ شبیه به مصالح مورد نیاز فیلترهای کند می‌باشد. برای اقتصادی بودن طرح نیز می‌توان از سیمان و شن موجود در منطقه استفاده کرد، این نوع فیلتر برای جوامع کوچک مناسب است. بعلاوه، تعمیر و شستشوی

1- Biochemical Oxygen Demand

انجام گرفت. برای انجام این پژوهش، مراحل زیر انجام شد.

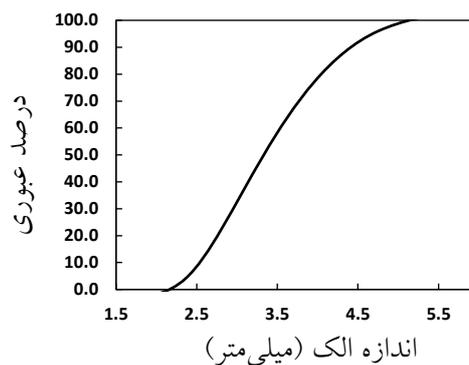
مقاومت فشاری و ضریب نفوذپذیری، نسبت به بتن متخلخل معمولی، پرداخته شده است.

۲-۱. تهیه مصالح مورد نیاز

سنگدانه و مواد افزودنی موردنیاز از استان سمنان تهیه شدند. شکل ۳، دانه‌بندی سنگدانه را نشان می‌دهد. در جدول ۱ برخی مشخصات شیمیایی افزودنی‌های مصرفی آورده شده است.

۲. مواد و روش‌ها

در این پژوهش از جاذب‌های متفاوتی استفاده شده که هر کدام می‌تواند تأثیر متفاوتی بر رفع آلودگی داشته باشد و بسته به درصد جذب آب و مقاومت افزودنی، می‌توان آن‌ها را با یکدیگر مقایسه کرد. آزمایش‌ها به روش آماری فاکتوریل در سه تکرار برای هر نمونه



شکل ۳. دانه‌بندی سنگدانه ($d_{90} = 7/1 \text{ mm}$)

جدول ۱. 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	
۶۵/۱۵	۱۱/۸۳	۱/۲	۲/۵۱	۰/۶۴	۱/۹۶	۰/۲۷	۱۲/۸۱	ژئولیت
۶۹/۵	۱۲/۸	۰/۹۴	۰/۸	۰/۵	۳	۰/۰۴	۵/۱	پرلیت
۴۸/۳۷	۱۲/۴۹	۸/۰۷	۸/۴۳	۹/۵۸	۴/۳۶	۱/۷۹	۰/۶	پوکه معدنی
۶۶/۰۵	۱۶/۷۵	۷/۱	۲/۴۶	۱/۹۹	۰/۶۹	۰/۲۱	۲۰/۸۱	پوکه صنعتی

طرح اختلاط در نمونه بتن کنترل استفاده شد و برای ساخت بتن متخلخل حاوی افزودنی (بتن متخلخل جاذب) درصدی از سنگدانه با افزودنی جایگزین شد. تیمارهای آزمایش، کد هر تیمار و مقدار سنگدانه و سیمان در جدول ۲ ارائه شده است. برای هر تیمار، ۳ تکرار در نظر گرفته شده است.

۲-۲. طرح اختلاط بتن

برای ساخت نمونه‌های بتن متخلخل معمولی، طرح اختلاط اولیه‌ای با توجه به استاندارد ACI211/3R در نظر گرفته شد که در آن مقدار سنگدانه و سیمان به ترتیب ۱۴۰۰ و ۳۳۰ کیلوگرم بر متر مکعب و نسبت آب به سیمان (W/C) بین ۰/۳۵ تا ۰/۴۵ می‌باشد. این

جدول ۲. طرح اختلاط استفاده شده برای بتن به همراه افزودنی‌های مختلف

کد آزمایش	نام نمونه	مقدار سنگدانه (kg/m ³)	مقدار سیمان (kg/m ³)	W/C	حجم افزودنی (ml)
Sh5	شاهد تیپ ۵	۱۴۰۰	۳۳۰	۰/۳۶۶	۰
Sh2	شاهد تیپ ۲	۱۴۰۰	۳۳۰	۰/۳۶۶	۰
Z10	زئولیت ۱۰*	۱۴۰۰	۳۳۰	۰/۴۱	۳۰۰
Z20	زئولیت ۲۰	۱۴۰۰	۳۳۰	۰/۴۴	۶۰۰
Z30	زئولیت ۳۰	۱۴۰۰	۳۳۰	۰/۴۵	۹۰۰
P10	پرلیت ۱۰	۱۴۰۰	۳۳۰	۰/۳۶	۳۰۰
P20	پرلیت ۲۰	۱۴۰۰	۳۳۰	۰/۳۸	۶۰۰
P30	پرلیت ۳۰	۱۴۰۰	۳۳۰	۰/۴۱	۹۰۰
Pkm5	پوکه معدنی ۵	۱۴۰۰	۳۳۰	۰/۳۶	۱۵۰
Pkm10	پوکه معدنی ۱۰	۱۴۰۰	۳۳۰	۰/۳۸	۳۰۰
Pkm15	پوکه معدنی ۱۵	۱۴۰۰	۳۳۰	۰/۴۱	۴۵۰
Pks5	پوکه صنعتی ۵	۱۴۰۰	۳۳۰	۰/۳۶	۱۵۰
Pks10	پوکه صنعتی ۱۰	۱۴۰۰	۳۳۰	۰/۳۸	۳۰۰
Pks15	پوکه صنعتی ۱۵	۱۴۰۰	۳۳۰	۰/۴۱	۴۵۰

عدد بعد از افزودنی، نشانگر درصد اضافه شدن آن به بتن است.

۳-۲. ساخت نمونه‌ها

برای ساخت نمونه‌ها، ابتدا طرح اختلاط مورد نظر آماده و سپس برای مخلوط شدن در دستگاه ساخت بتن ریخته شد. پس از اینکه مواد به طور کامل مخلوط شدند، آن‌ها را در قالب‌های مورد نظر ریخته، که قبلاً دیواره آن‌ها با استفاده از روغن چرب شده بود، و در سه لایه با کوبه استاندارد و هر لایه با ۲۵ ضربه، کوبیده شدند. در نمونه Sh2 (به عنوان شاهد سیمان تیپ ۲)، از سیمان تیپ ۲ کارخانه شاهرود و در نمونه‌های دیگر از سیمان تیپ ۵ کارخانه سیمان تهران استفاده شده است.

۴-۲. آزمایش نفوذپذیری

برای انجام آزمایش نفوذپذیری (هدایت هیدرولیکی)، دستگاهی به روش بار افتان در آزمایشگاه سازه دانشگاه سمنان ساخته شد 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 می‌شود:

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

در این رابطه، K نفوذپذیری (میلی متر بر ثانیه)، a سطح مقطع محفظه شیشه‌ای (میلی متر مربع)، L طول نمونه (میلی متر)، A سطح مقطع نمونه بتن (میلی متر مربع)، t زمان افت بار آب از h_1 به h_2 (ثانیه)، h_1 ارتفاع اولیه ستون آب (میلی متر) و h_2 ارتفاع نهایی ستون آب (میلی متر) می‌باشد. آزمایش ضریب نفوذپذیری برای کلیه تیمارها در یک نوبت و در سه تکرار انجام شده است.

۵-۲. آزمایش مقاومت فشاری

های مکعبی با ابعاد $10 \times 10 \times 10$ سانتی‌متر را می‌دهد. در شکل ۴، دستگاه ضریب نفوذپذیری و نمونه‌های ساخته شده آورده شده است.

برای آزمایش مقاومت فشاری، از دستگاه مکانیکی موجود در آزمایشگاه سازه دانشگاه سمنان استفاده شد که مطابق با استاندارد ASTM C39 می‌باشد. به دلیل نوع دانه‌بندی خاص، آیین‌نامه اجازه استفاده از نمونه-



شکل ۴. دستگاه ضریب نفوذپذیری (سمت راست) و نمونه‌های بتن متخلخل ساخته شده جهت انجام آزمایش مقاومت فشاری (سمت چپ)

۳. نتایج و بحث

۳-۱. مقاومت فشاری

در جدول ۳، نتایج تجزیه واریانس مقاومت فشاری نمونه‌های بتن متخلخل، که افزودنی‌های مختلف به آن اضافه شده، و به روش LSD در سطح ۰.۵٪ انجام گرفته، 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.

۲-۶. تحلیل آماری

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

جدول ۳. نتایج تجزیه واریانس مقاومت فشاری تیمارهای مختلف نمونه‌های بتن متخلخل

R^2	ضریب تغییرات	P	مقدار F	میانگین مربعات	مجموع مربعات	درجه آزادی	منبع تغییرات
		< 0.0001	10.25^{**}	۳۰/۳۴۲	۳۹۴/۴۵۴	۱۳	تیمار
		۰/۹۸۷۳	0.01^{**}	۰/۰۳۷۸	۰/۰۷۵۷	۲	بلوک
۰/۸۳۷	۲۳/۲۴۸	-	-	۲/۹۶۰	۷۶/۹۸۲	۲۶	خطا
		-	-	-	۴۷۱/۵۱۲	۴۱	کل

** معنی‌دار در سطح ۱٪

میانگین مقاومت نمونه‌ی شاهد (Sh5) برابر ۱۵/۲۲ مگاپاسکال بود. در مجموع، در بین افزودنی‌های استفاده شده، تیمار با ۱۰٪ حجمی پرلیت، بیشترین میانگین مقاومت (۱۱/۹۵ مگاپاسکال) و تیمار با ۱۰٪ حجمی پوکه صنعتی، کمترین میانگین مقاومت (۳/۲ مگاپاسکال) را دارا می‌باشند. به نظر می‌رسد که اضافه کردن پوکه صنعتی نسبت به سایر افزودنی‌ها با کاهش مقاومت بیشتری همراه بوده است، چون مقاومت نمونه‌های با ۵ و ۱۵ درصد پوکه صنعتی نیز بسیار کمتر از تیمار شاهد می‌باشد.

همچنین از جدول ۴ مشخص است که سه نمونه‌ی Sh5، P10 و Pks10 از لحاظ مقاومت فشاری (به ترتیب ۱۵/۲۲، ۱۱/۹۵ و ۳/۲ مگاپاسکال) دارای تفاوت معنی‌داری با یکدیگر و با کل نمونه‌ها هستند و مابقی نمونه‌ها در سطح احتمال ۵٪ حداقل با یک نمونه دیگر تفاوت معنی‌داری ندارند.

نتایج میانگین تست‌های مقاومت فشاری نمونه‌ها در جدول ۴ آورده شده است. همانگونه که در این جدول مشاهده می‌شود، برای تمام افزودنی‌ها، به طور کلی، با افزایش درصد افزودنی، میزان مقاومت فشاری نسبت به تیمار شاهد کاهش پیدا می‌کند؛ گرچه ممکن است نوساناتی هم در بین تیمارهای هر افزودنی دیده شود. کاهش مقاومت فشاری بین بیشترین و کمترین درصد افزودنی برای ژئولیت، پرلیت، پوکه معدنی و پوکه صنعتی به ترتیب برابر با ۱۳، ۴/۸، ۱۰/۱ و ۱۲/۶ درصد می‌باشد. در این میان، تیمار پوکه صنعتی بیشترین میزان کاهش مقاومت را دارد. این موضوع با وزن مخصوص کم پوکه صنعتی (۴۳۵ کیلوگرم بر متر مکعب) قابل توجیه می‌باشد. با توجه به روند کاهش مقاومت فشاری نمونه‌های بتن متخلخلی که افزودنی پوکه صنعتی به آنها اضافه شده، قابل پیش‌بینی است که در صورت استفاده از بیشتر از ۱۵٪ افزودنی، مقاومت فشاری شدیداً کاهش خواهد کرد و کارایی اینگونه بتن متخلخل بسیار تنزل خواهد نمود.

جدول ۴. مقایسه میانگین مقاومت فشاری در تیمارهای مختلف به روش LSD در سطح ۵٪

تیمار	میانگین مقاومت فشاری (N/mm ²) (α=۰.۰۵)
Sh5	۱۵/۲۲ ^a
Sh2	۹/۹۱ ^{bc}
Z30	۶/۶۱ ^{def}
Z20	۵/۷۳ ^{d-g}
Z10	۸/۵۸ ^{cd}
P30	۴/۵۸ ^{fg}
P20	۵/۹۲ ^{d-g}
P10	۱۱/۹۵ ^b
Pkm15	۵/۵۵ ^{efg}
Pkm10	۷/۷ ^{cde}
Pkm5	۷/۰۹ ^{c-f}
Pks15	۴/۸۲ ^{efg}
Pks10	۳/۲ ^g
Pks5	۶/۷۴ ^{def}

در ستون مقاومت فشاری، اعداد میانگین، متوسط سه تکرار می‌باشند. بین میانگین‌هایی که حداقل دارای یک حرف مشترک هستند اختلاف معنی‌داری وجود ندارد.

متخلخل، که افزودنی‌های مختلف به آن‌ها اضافه شده، و به روش LSD در سطح ۰.۰۵٪ انجام گرفته، آورده شده است. در این جدول، مقدار F برای تیمار و بلوک در سطح ۰.۱٪ معنی‌دار شده که نشان می‌دهد تفاوت معنی‌داری بین تیمارها وجود دارد.

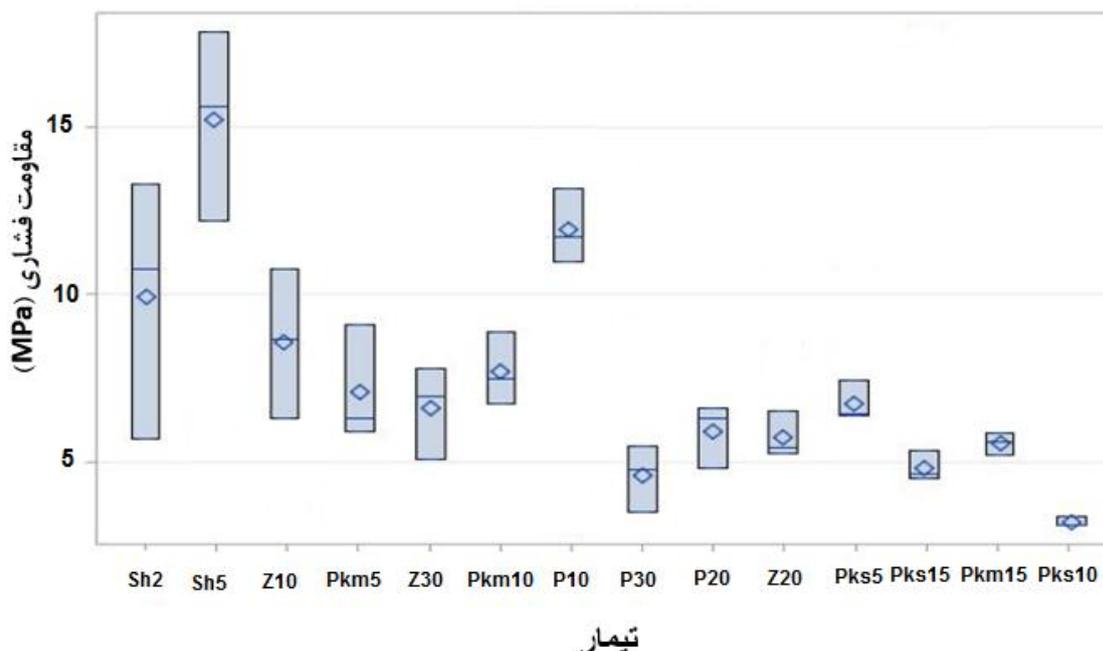
همانگونه که در جدول ۶ مشاهده می‌شود، میانگین ضریب نفوذپذیری نمونه‌های بتن متخلخل در تیمارها چندان تفاوتی با هم ندارند. دلیل این عدم تفاوت، انتخاب دانه‌بندی یکسان برای افزودنی و سنگدانه می‌باشد. اما مشاهده می‌شود که اضافه کردن افزودنی‌های ژئولیت، پوکه معدنی و پوکه صنعتی هرچند باعث افزایش ضریب نفوذپذیری شده‌اند، اما پرلیت باعث کاهش ضریب نفوذپذیری شده است. این کاهش با جذب آب زیاد توسط پرلیت قابل توجیه است. نتایج تحلیل آماری در سطوح ۰.۰۵٪ نیز گویای این مطلب می‌باشد.

میزان پراکندگی تکرارهای مقاومت فشاری هر کدام از طرح‌های اختلاط بتن متخلخل حول میانگین در شکل ۵ آورده شده است. این شکل، خروجی نرم‌افزار SAS9.4 می‌باشد (البته، تیمارها از بیشترین تغییرات تا کمترین تغییرات به طور دستی مرتب شده‌اند). این شکل نشان می‌دهد که کمترین پراکندگی مربوط به نمونه با ۱۰٪ پوکه صنعتی (Pks10) و بیشترین پراکندگی مربوط به نمونه شاهد با سیمان تیپ ۲ (Sh2) می‌باشد.

با اضافه کردن افزودنی به بتن متخلخل، مقاومت فشاری نمونه‌ها کاهش یافته است. این کاهش مقاومت فشاری به دلیل نوع افزودنی‌های جایگزین شده با بخشی از سنگدانه و وزن مخصوص کم آن‌ها می‌باشد.

۲-۳. نتایج ضریب نفوذپذیری

در جدول ۵، نتایج تجزیه واریانس ضریب نفوذپذیری (هدایت هیدرولیکی) نمونه‌های بتن



شکل ۵. میزان پراکندگی حول میانگین برای فاکتور مقاومت فشاری در تیمارهای مختلف بتن متخلخل

جدول ۵. نتایج تجزیه واریانس ضریب نفوذپذیری

منبع تغییرات	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	مقدار F	P	ضریب تغییرات	R ²
تیمار	۱۳	۰/۱۵۸	۰/۰۱۲۲	۱۹/۷۰**	<۰/۰۰۰۱		
بلوک	۲	۰/۰۰۰۲۶	۰/۰۰۰۱۳	۰/۲۲**	۰/۸۰۷۱	۰/۲۱	۰/۹۰۷
خطا	۲۶	۰/۰۱۶۱	۰/۰۰۰۶۱	-	-		
کل	۴۱	۰/۱۷۵	-	-	-		

** معنی دار در سطح ۱٪

جدول ۶. مقایسه میانگین ضریب نفوذپذیری در تیمارهای مختلف به روش LSD در سطح ۵٪

تیمار	میانگین ضریب نفوذپذیری ($\alpha=0.05$) (mm/s)
Sh5	۲/۰۰۳ ^{gh}
Sh2	۲/۰۱۷ ^{fg}
Z30	۲/۰۷۷ ^{cde}
Z20	۲/۱۰۶ ^{bc}
Z10	۲/۰۵۶ ^{def}
P30	۱/۹۶۹ ^{hi}
P20	۱/۹۷۱ ^h
P10	۱/۹۲۹ ⁱ
Pkm15	۲/۰۴۴ ^{efg}
Pkm10	۲/۱۲۶ ^{ab}
Pkm5	۲/۱۴۹ ^a
Pks15	۲/۰۹ ^{bcd}
Pks10	۲/۰۸۲ ^{cde}
Pks5	۲/۰۵۱ ^{def}

بندی، تفاوت چشمگیری بین نمونه‌ها با افزودنی‌های مختلف از لحاظ ضریب هدایت هیدرولیکی مشاهده نمی‌شود.

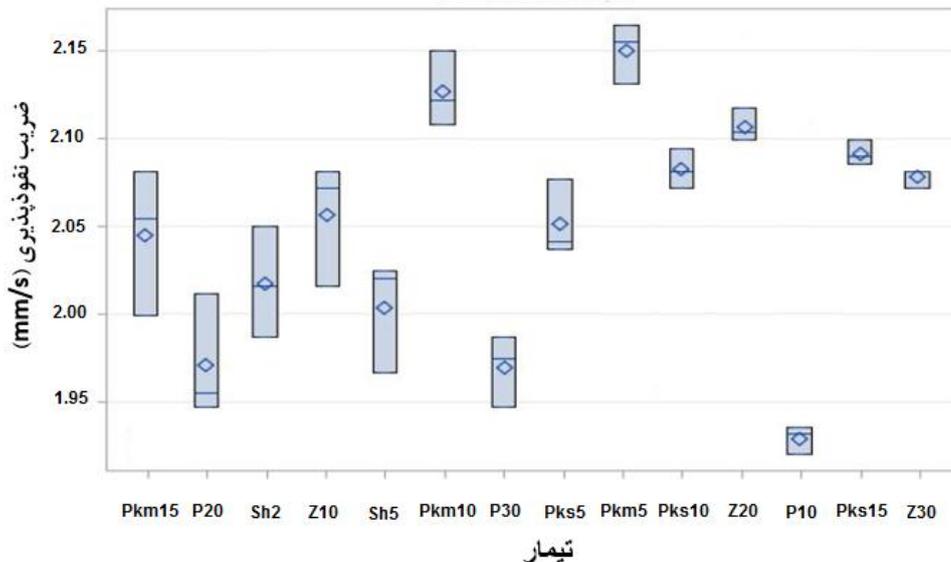
میزان پراکندگی هر کدام از طرح‌های اختلاط بتن متخلخل حول میانگین در شکل ۶ آورده شده است. این شکل نشان می‌دهد که بیشترین پراکندگی مربوط به نمونه با ۱۵٪ پوکه معدنی و کمترین پراکندگی مربوط به نمونه با ۳۰٪ زئولیت می‌باشد.

با اضافه کردن افزودنی‌های مختلف به بتن متخلخل، هدایت هیدرولیکی آن‌ها به طور کلی افزایش

از جدول ۶ مشخص است که تیمارهای شاهد با هم اختلاف معنی‌داری در سطح ۵٪ ندارند. در این سطح احتمال بیشترین و کمترین ضریب نفوذپذیری (به ترتیب ۲/۱۴۹ و ۱/۹۲۹ میلی‌متر بر ثانیه) مربوط به تیمارهای P10 و Pkm5 می‌باشد و اختلاف بین آن‌ها هم معنی‌دار است. نمونه‌های بتن متخلخل در هر کدام از تیمارهای افزودنی زئولیت، پرلیت و پوکه معدنی دارای تفاوت معنی‌داری با یکدیگر هستند. ولی نمونه‌های تیمار پوکه صنعتی در سطح احتمال ۵٪ با هم تفاوت معنی‌داری ندارند. به دلیل یکسان بودن دانه-

می‌باشد که با حذف بخشی از سنگدانه و جایگزین کردن افزودنی‌ها اتفاق افتاده است.

یافته است. این افزایش هدایت هیدرولیکی عمدتاً به دلیل وجود ساختار متخلخل در ساختمان افزودنی‌ها



شکل ۶. میزان پراکندگی حول میانگین برای ضریب نفوذپذیری در تیمارهای مختلف بتن متخلخل

۴. نتیجه‌گیری

مقاومت فشاری خوبی داشتند و هدایت هیدرولیکی آن‌ها نیز زیاد بود برای کاهش میزان رواناب در سیستم شهری مناسب باشند.

ب- درصد کاهش مقاومت فشاری برای نمونه‌های حاوی بیشترین و کمترین درصد ژئولیت، پرلیت، پوکه معدنی و پوکه صنعتی به ترتیب ۱۳، ۴۸/۴، ۱۰/۱ و ۱۲/۶ درصد به دست آمد.

ج- پوکه صنعتی بیشترین افت مقاومتی را در بین افزودنی‌ها ایجاد کرد. این امر با توجه به وزن مخصوص کم این افزودنی (۴۳۵ کیلوگرم بر متر مکعب) قابل توجیه می‌باشد. افزودنی پرلیت با وزن مخصوص ۲۵۱ کیلوگرم بر متر مکعب از این لحاظ بعد از پوکه صنعتی قرار می‌گیرد.

د- ضریب نفوذپذیری برای نمونه‌های Pkm5، Z20 و Pks5 نسبت به نمونه کنترل Sh5 به ترتیب ۵/۱، ۷/۳ و ۲/۴ درصد افزایش و برای نمونه P10، ۳/۷ درصد

در این پژوهش، برای استفاده از سیستمی کارآمد، اقتصادی و قابل استفاده در سطح شهرها و کاربرد آن در سنگفرش‌های کنار خیابان‌ها و پیاده‌روها، همراه با جذب آلاینده‌ها، نفوذ موقت و همچنین به تأخیر انداختن جریان رواناب‌های شهری، نسبت به طراحی و ساخت بتن متخلخل جاذب جهت کاهش میزان رواناب‌های شهری اقدام شد. اهم نتایج به دست آمده از این پژوهش عبارت‌اند از:

الف- با اضافه کردن افزودنی به بتن متخلخل، مقاومت فشاری نمونه‌ها کاهش یافته، اما هدایت هیدرولیکی آن‌ها به طور کلی افزایش می‌یابد. کاهش مقاومت فشاری به دلیل وزن مخصوص کم جاذب‌های استفاده شده می‌باشد و افزایش هدایت هیدرولیکی عمدتاً به دلیل وجود ساختار متخلخل در ساختمان افزودنی‌ها می‌باشد که با حذف بخشی از سنگدانه و جایگزین کردن افزودنی اتفاق می‌افتد. به نظر می‌رسد که افزودنی‌هایی که

مختلف، می‌توان با استفاده از این سیستم، حجم رواناب‌های شهری را کاهش داد. همچنین، می‌توان افزودنی‌های مورد استفاده در این تحقیق را به صورت ترکیبی، بسته به میزان کاهش حجم رواناب نیز در سیستم رواناب شهری به کار برد.

۵. سپاسگزاری

بدین وسیله از دانشکده مهندسی عمران دانشگاه سمنان که کمک شایانی در تأمین مسائل مالی و امکانات مورد نیاز این تحقیق نمودند و همچنین مسئول آزمایشگاه سازه، جناب آقای مهندس بخشایی، قدردانی می‌گردد.

کاهش داشته است که با درصد جذب آب زیاد توسط پوکه معدنی قابل توجیه است.

۵- بیشترین پراکندگی حول میانگین در تکرار نمونه‌ها برای ویژگی مقاومت فشاری مربوط به نمونه شاهد (Sh2) و کمترین پراکندگی مربوط به نمونه با ۱۰٪ افزودنی پوکه صنعتی (Pks10) می‌باشد.

و- بیشترین پراکندگی حول میانگین در تکرار نمونه‌ها برای ضریب نفوذپذیری مربوط به نمونه با ۱۵٪ پوکه صنعتی (Pks15) و کمترین پراکندگی مربوط به نمونه با ۳۰٪ زئولیت (Z30) می‌باشد.

گرچه در این تحقیق در مورد جذب و یا کاهش بار آلودگی رواناب‌های شهری آزمایشی انجام نشده، ولی به دلیل افزایش تخلخل بتن با کاربرد افزودنی‌های

۶. منابع

ترکیان، ا. و احمدی، م. ۱۳۸۵. بیوتکنولوژی زیست‌محیطی: مبانی و کاربردها (ترجمه)، مؤسسه انتشارات علمی راز دانشگاه صنعتی شریف، تهران.

جوئی، ح. ر. 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.

حسامی، س. و احمدی، س. ۱۳۹۴. ارزیابی روسازی بتنی متخلخل سازگار با محیط‌زیست با استفاده از خاکستر پسته برنج. مهندسی زیرساخت‌های حمل و نقل، ۱(۲): ۶۳-۷۶.

سقائیان نژاد، س. ۱۳۹۱. کاهش بار آلودگی رواناب‌های شهری با استفاده از بتن متخلخل جاذب. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان.

شرکت پرلیت تابنده طوس (www.Perlite.ir).

عابدی کوپایی، ج. و جواهری طهرانی، م. ۱۳۹۲. معرفی استفاده از بتن متخلخل جهت فراهم نمودن آب شرب در شرایط اضطراری. مجموعه مقالات اولین همایش ملی بحران آب، دانشگاه آزاد اسلامی واحد خوراسگان (اصفهان)، ۲۵-۲۶ اردیبهشت ماه.

عابدی کوپایی، ج. و موسوی، س. ف. ۱۳۸۲. جذب سرب از پساب صنعتی توسط خاکستر پسته شلتوک. آب و فاضلاب، ۴۸: ۱۷-۲۳.

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

نادری، م. و بنیادی، ع. ۱۳۹۱. مقایسه طرح اختلاط و مقاومت فشاری بتن‌های سبک ساخته شده با سبک‌دانه‌های لیکا، اسکرپا و پرلیت با استفاده از روش پیچش. نشریه مهندسی عمران، ۲: ۷۱-۹۰.

- ACI Committee 211. 2006. "Guide for Selecting Proportions for No-slump Concrete". ACI 211.3R Report.
- ACI Committee 522. 2006. "Pervious Concrete". ACI 522R-06 Report.
- Ardali, Y., Turan, N. G. and Temel, F. A. 2014. "Cu (II) removal from industrial waste leachate by adsorption using expanded perlite". *J. Nat. Appl. Sci.*, 19(1-2): 54-61.
- ASTM C39. 2004. "Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens". Annual Book of ASTM Standards.
- Ferguson, B. K. 2005. "Porous Pavement". Taylor and Francis Group.
- Choi, I. S., Jang, S. H. and Oh, J. M. 2010. "Examination for purification ability of water quality by applying the porous concrete". *Korean J. Limnol.*, 35(4): 312-319.
- Demirbas, A. 2008. "Heavy metal removal adsorption into agro-based materials". *J. Hazard. Mater.*, 157: 220-229.
- Dierkes, C., Gobel, P., Lohmann, M. and Coldewey, W. G. 2006. "Development and investigation of a pollution control pit for treatment of stormwater from metal roofs and traffic areas". *Water Sci. Technol.*, 54(6-7): 291-298.
- Harrisburg, P. A. 1998. "The Pennsylvania Handbook of Best Management Practices for Developing Areas". Pennsylvania Association of Conservation Districts, Pennsylvania Department of Environmental Protection.
- Hatt, B. E., Siriwardene, N., Deletic, A. and Fletcher, T. D. 2006. "Filter media for stormwater treatment and recycling: The influence of hydraulic properties of flow on pollutant removal". *Water Sci. Technol.*, 54(6-7): 263-271.
- Kozeliski, F. A. 1992. "Permeable bases help solve pavement drainage problems". The Aberdeen Group, Publication #C920660, 2 p.
- Meininger, R. C. 1998. "No-fines pervious concrete for paving". *Concrete Int.* pp. 20-27.
- Mousavi, S. F., Moazzeni, M., Mostafazadeh-Fard, B. and Yazdani, M. R. 2012. "Effects of rice straw incorporation on some physical characteristics of paddy soils". *J. Agric. Sci. Technol.*, 14: 1173-1183.
- Paliulis, D. 2016. "Removal of formaldehyde from synthetic wastewater using natural and modified zeolites". *Pol. J. Environ. Stud.*, 1: 251-257.
- Pasha, T. N., Farooq, M. U., Khattak, F. M., Jabbar, M. A. and Khan, A. D. 2007. "Effectiveness of sodium bentonite and two commercial products as aflatoxin absorbents in diets for broiler chickens". *Animal Feed Sci. Technol.*, 132: 103-110.
- Rostamian, R., Heidarpour, M., Mousavi, S. F. and Afyuni, M. 2015. "Preparation, characterization and sodium sorption capability of rice husk carbonaceous adsorbents". *Fresenius Environ. Bull.*, 24(5): 1649-1658.
- Strain, V. and Pant, K. K. 2005. "Removal of chromium from industrial waste by using eucalyptus bark". *Bioresour. Technol.*, 97: 15-20.
- Taghizadeh, M. M., Torabian, A., Borghei, M. and Hassani, A. H. 2007. "Feasibility study of water purification using vertical porous concrete filter". *Int. J. Environ. Sci. Tech.*, 4(4): 505-512.
- Tennis, P.D., Leming, M. L. and Akers, D. J. 2004. "Pervious Concrete Pavements". Portland Cement Association (PCA), Skokie, Illinois, 25 p.